ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2019, том 486, № 2, с. 178–183

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 537.84: 533.95: 621.31

ИМПУЛЬСНЫЙ МГД-ГЕНЕРАТОР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Академик РАН Е. П. Велихов[1], А. Г. Афонин[2], В. Г. Бутов[2], В. П. Панченко[3,*], С. В. Синяев[2], В. А. Солоненко[2], Г. А. Швецов[4], А. А. Якушев[3]

Поступило 26.12.2018 г.

Представлены результаты расчётно-теоретического исследования по созданию мощного (≈600 МВт) импульсного МГД-генератора на продуктах сгорания твёрдого (порохового) плазмообразующего топлива “Старт-2” нового поколения. Приведены схема, методики, результаты расчётов и оптимизации характеристик импульсного МГД-генератора с самовозбуждающейся резистивной “безжелезной” магнитной системой. Определены локальные, интегральные, удельные энергетические и массогабаритные характеристики. Полученные характеристики в 1,5–2 раза превышают аналогичные показатели МГДГ первого поколения.

Ключевые слова: импульсный МГД-генератор, электрическая схема, твёрдое (пороховое) топливо, МГД-канал, сверхзвуковое течение, магнитная система, самовозбуждение, математическая модель, метод, расчёт, характеристики.

DOI: https://doi.org/10.31857/S0869-56524862178-183

ВВЕДЕНИЕ

В СССР в 1970–1980 гг. была разработана и экспериментально исследована самая мощная (до 600 МВт) в мире импульсная МГД-установка “Сахалин” на твёрдом (пороховом) плазмообразующем топливе (ТПТ) первого поколения [1–3]. Разработанное в последние годы экологически безопасное ТПТ нового поколения “Старт-2” на основе бесхлорного окислителя калиевой соли динитразовой кислоты позволило повысить температуру продуктов сгорания до 4400 K при давлениях в генераторе плазмы(ГП) 5–10 МПа, что обеспечило экспериментальные значения электропроводности σ продуктов сгорания до 120 См/м, подвижности электронов $\mu_e \approx 0{,}07$ Тл$^{-1}$ при числах Маха потока 2,6–2,8 [4]. Эти показатели в 2–2,5 раза лучше по сравнению с продуктами сгорания ТПТ первого поколения. В данной работе представлены результаты расчётно-теоретического исследования, направленного на физико-техническое обоснование, определение схемы и характеристик самовозбуждающегося МГД-генератора (МГДГ) на ТПТ нового поколения “Старт-2”, предназначенного для применения в качестве многоразового автономного импульсного (5–10 с) источника мультимегаваттной мощности для питания различных активно-реактивных нагрузок.

1. При разработке импульсного МГДГ нового поколения, получившего название “М-2”, использовались экспериментальные данные, технические характеристики и конструктивно-технологические решения, реализованные при создании импульсного МГДГ “Сахалин” [1–3].

В качестве магнитной системы рассматривалась резистивная магнитная система с двумя катушками рейс-трековой (трапецеидальной) формы с двумя секциями обмоток в каждой.

Четыре секции обмотки соединяются параллельно в режиме самовозбуждения МГДГ и последовательно при работе на нагрузку. Электропитание магнита в номинальном режиме работы МГДГ осуществляется секцией *А* канала с секционированными электродами длиной L_A, расположенной в его входной области (рис. 1). Расположенная ниже по потоку секция канала *Б* длиной $L_Б$ имеет сплошные электроды и обеспечивает электропитание нагрузки и электрически не связана с секцией *А*.

Принцип работы самовозбуждающихся МГД-генераторов хорошо известен [5, 6]. Электрические

[1]*Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва*

[2]*Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета*

[3]*Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ), Москва*

[4]*Институт гидродинамики Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск*

**E-mail: panchvictor@gmail.com*

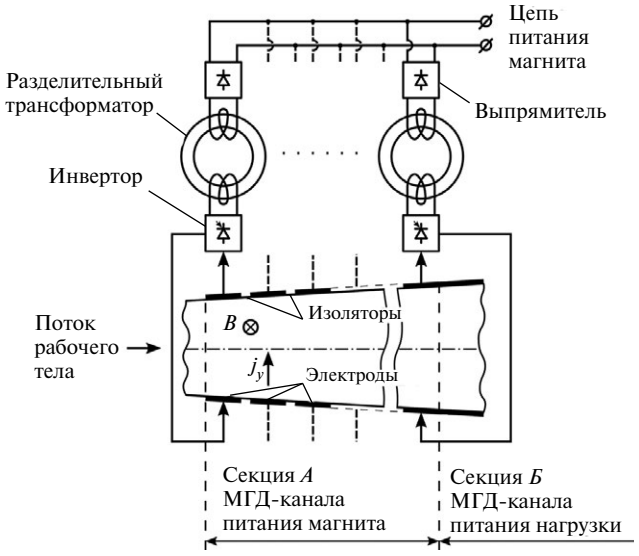

Рис. 1. Схема секции *А* МГД-канала для электропитания магнитной системы.

схемы и циклограммы работы самовозбуждающихся МГД-генераторов, в том числе МГДГ “Сахалин”, приведены в [2, 5, 6]. При выполнении условия самовозбуждения начальные (индекс 0) значения тока I_0 в обмотках магнита и индукции магнитного поля B_{00} (B_0 — индукция в центре канала), создаваемые системой начального возбуждения (СНВ), возрастают во времени по закону, близкому к экспоненциальному, за характерные времена 0,5–2 с до номинальных значений. После завершения самовозбуждения происходит перекоммутация четырёх секций обмоток магнита из параллельного соединения в последовательное, что приводит к увеличению постоянной магнита $\alpha_м = B_0/I$ в четыре раза. Достигнутые значения индукции магнитного поля B_0 и тока в катушках магнита обеспечиваются в дальнейшем генерацией электрической мощности в секции *А* (рис. 1).

2. Определение характеристик МГДГ “М-2” проводили в два этапа. Сначала выполнялся проектный расчёт с помощью математической модели течения равновесной плазмы в МГД-канале, которая базируется на квазиодномерном описании изотермического (T = const, обратная задача) однофазного течения идеального газа в линейном канале со сплошными электродами фарадеевского МГДГ при постоянной по его длине индукции магнитного поля. В этом приближении система квазиодномерных уравнений сводится к квадратурам, которые решаются численно с применением итерационной процедуры. В результате определяются профиль проточной части МГД-канала, его длина и необходимая индукция магнитного поля.

В качестве исходных данных задавались условная формула ТПТ “Старт-2”, электрическая мощность и напряжение V = const на сплошных электродах МГД-канала, постоянство локального коэффициента электрической нагрузки $k = V/(uBh)$, где u — скорость, h — межэлектродное расстояние.

В математической модели учитывались апробированные физико-технические ограничения и приближения, а потери энергии в МГД-канале — путём введения интегрального коэффициента потерь электрической мощности, величина которого принималась равной 0,9. Свойства продуктов сгорания ТПТ рассчитывали с помощью программы “Плазма” [7].

В качестве варьируемых параметров использовались давление в ГП 7–11 МПа, которое определяет температуру продуктов сгорания, число Маха 2,3–3,3, локальный коэффициент электрической нагрузки $k \le 0{,}85$, постоянная по длине индукция магнитного поля.

Полученные в результате расчёта нелинейные зависимости межэлектродного $h(x)$ и межизоляционного $a(x)$ расстояний в канале прямоугольного сечения аппроксимировались двумя линейными участками каждый.

В результате проведённых расчётов определены оптимальные параметры МГДГ “М-2”: давление 10 МПа и соответствующая ему температура 4470 K в генераторе плазмы, расход продуктов сгорания 500 кг/с; число Маха 2,8 на входе в канал $L_0 = 0$; статические давление 0,25 МПа, температура 3360 K, скорость 2190 м/с, $\sigma_1 = 112$ См/м, $\mu_{e1} = 0{,}070$ Тл$^{-1}$, длина МГД-канала $L_к = 3{,}75$ м, межэлектродное расстояние на входе 0,96 м, на выходе 1,53 м, расстояние между изоляционными стенками на входе $a_1 = 0{,}55$ м, на выходе $a_2 = 0{,}96$ м, расстояние от входа в канал до излома профилей стенок $x_3 = 2{,}12$ м, размеры сечения канала в нём $a_3 = 0{,}64$ м, $h_3 = 1{,}07$ м, длина секции *А* $L_A = 0{,}75$ м. Индукция магнитного поля в канале постоянна и составляет $B_0 = 1{,}85$ Тл, напряжение в режиме электропитания нагрузки 2850 В, полный ток МГД-канала (сумма токов секций *А* и *Б*) 220 кА.

На рис. 2 показан профиль проточной части МГД-канала $a(x)$ и $h(x)$ и распределение z-компоненты индукции магнитного поля $B_z(x)$ (см. ниже).

3. В результате эскизной проработки размещения газодинамического тракта (ГТ) МГДГ “М-2” в магните с обмотками из алюминиевого сплава определено расстояние между катушками, которое составило 1250 мм и оказалось близким к аналогичной величине в МГДГ “Сахалин”. В связи с этим для

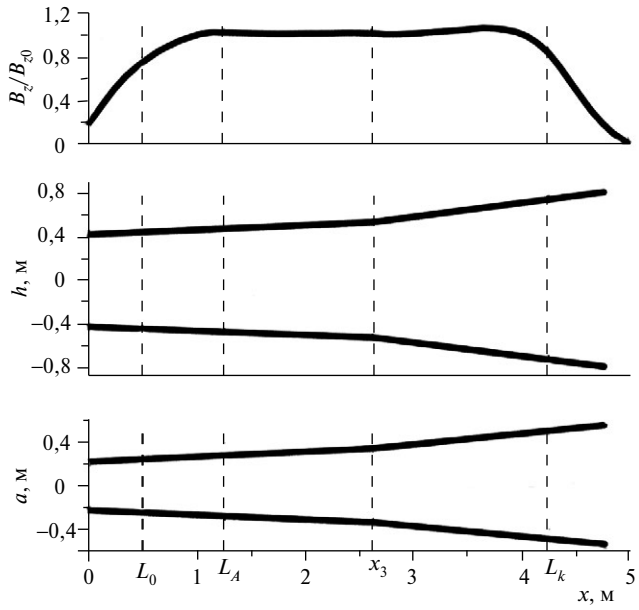

Рис. 2. Относительное распределение индукции внешнего магнитного поля по оси канала и профилей стенок линейного МГД-канала прямоугольного сечения.

Таблица 1. Параметры магнита МГДГ “М-2”

Число ампер-витков, кА	$6{,}9\times10^3$
Полное число витков	138
Индуктивность (при самовозбуждении), мГн	4,39
Постоянная времени магнита, с	1,64
Сопротивление обмотки, мОм	2,67
Постоянная магнита, Тл/кА	0,037
Число коммутируемых секций	4
Запасённая энергия, МДж	до 60
Энергия, выделяющаяся в обмотке, МДж	до 200
Рабочий ток в обмотке, кА	
при параллельном соединении секций	~150
при последовательном соединении секций	~50
Потребляемая мощность в номинальном режиме работы, МВт	105 (50*)
Масса проводника обмотки, т	12,3
Масса силовой конструкции магнита, т	6,3
Масса магнитной системы, т	19,1 (13,4*)

* для магнита с катушками седлообразной формы.

определения характеристик магнита МГД-генератора “М-2” использовали соотношения подобия. Полученные значения характеристик магнита приведены в табл. 1.

4. Для уточнения (поверочного расчёта) характеристик МГДГ “М-2” была разработана физико-математическая модель и соответствующая ей компьютерная программа, основанная на нестационарном квазидвумерном (в плоскости x–y описании течения вязкого и теплопроводного псевдогаза, которая моделирует реальную двухфазную смесь, при числе $R_m \ll 1$.

Для описания турбулентного течения в ГТ МГДГ использовалась (k–ω) SST-модель турбулентности Ментера [8]. Для уравнений газо- и электродинамики ставились общепринятые граничные условия. Численное решение системы магнитогидродинамических уравнений проводилось по явной двухшаговой разностной схеме Мак-Кормака (предиктор-корректор), дополненной процедурой монотонизации решения [8–10]. При этом использовалось распределение суммарного значения индукции магнитного поля в плоскости x–y, рассчитанное по методике, приведённой в п. 6.

Расчёт электродинамических величин проводился также в квазидвумерном приближении при числе $R_m \ll 1$ по уравнениям для электрического поля, плотности тока и обобщённого закона Ома при рассчитанных ранее распределениях газодинамических параметров [11].

В названном приближении поле $E = -\mathrm{grad}\,\varphi$ и система уравнений сводится к нелинейному квазидвумерному уравнению для потенциала φ (продольная краевая задача). Для его решения использовался метод конечных объёмов, основанный на решении уравнения для потенциала в интегральном виде, и процедура последовательной верхней релаксации с показателем релаксации 1,5.

5. В результате поверочного расчёта определены планарные распределения газо-, термо- и электро-

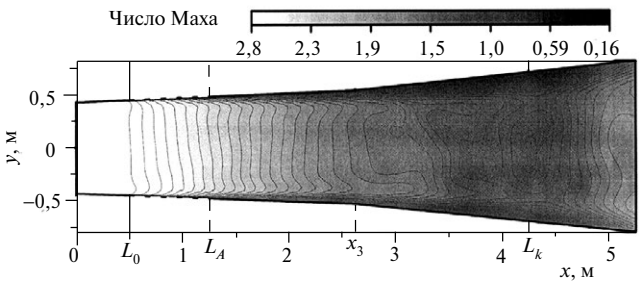

Рис. 3. Планарное распределение числа Маха в газодинамическом тракте МГДГ.

динамических параметров в МГД-канале. На рис. 3 представлено поле числа Маха в плоскости $z = 0$ расчётной области.

В номинальном режиме работы течение остаётся сверхзвуковым и безударным, достаточно однородным по поперечному сечению и без отрыва пограничных слоёв. Плотность теплового потока при температуре 2300 K внутренних поверхностей стенок ГТ изменяется вдоль канала от 3,7 МВт/м^2 на входе и до 1,0 МВт/м^2 на конце катодной стенки, а на конце анодной стенке — на 20% меньше. Планарное (в плоскости $z = 0$) распределение плотности тока, вольт-амперная и нагрузочная характеристики имеют вид, типичный для фарадеевских МГД-каналов со сплошными электродами [6, 11, 12]. В основной части (секции *Б*) МГД-канала плотность фарадеевского тока достигает 15 А/см^2, а продольного (холловского) 4,5 А/см^2.

6. В связи с небольшим (10–20%) влиянием индуцированного магнитного поля (значение числа $R_m \approx 0{,}5$) на поле магнитной системы и характеристики МГДГ задачу об индуцированном магнитном поле в плазме рассматривали приближённо, а расположение токосъёмных шин МГД-канала выбирали из конструктивных соображений [12].

Для корректного расчёта характеристик импульсных МГДГ в рассматриваемом Q2D-приближении, в котором индукция $B_z(x, y)$ предполагается постоянной в межизоляционном зазоре $a(x)$ канала, необходимо определить суммарное значение индукции $B_z(x, y) = B_м + B_i$. Так как индукция $B_м(x, y)$ магнитной системы известна, то необходимо рассчитать суммарную индукцию индуцированных магнитных полей $B_i(x, y) = B_p + B_t$. Индукция $B_p(x, y)$ создаётся токами в плазме, а B_t — в плоских электродах и в двух токосъёмных шинах.

Для расчёта $B_p(x, y)$ как функции $j(x, y)$ использовалась система уравнений Максвелла, обобщённый закон Ома и закон Био–Савара–Лапласа. Так как в рассматриваемой задаче уравнения газо- и электродинамики решаются независимо и последовательно, то значения B_p, характеристик и размеров МГД-канала определялись в результате итерационного процесса.

Если расположить токосъёмные шины симметрично и перпендикулярно плоским электродам в некотором сечении x_4 между входом и выходом из МГД-канала, то токи в них и, соответственно, индуцированные поля от них будут иметь различные направления. Для рассматриваемого канала МГДГ “М-2” в номинальном режиме его работы оптимальным является расположение шин токовыводов на расстоянии $x_4 = 0{,}6L_к = 2{,}25$ м от входного сечения. В этом случае индуцированные поля практически не изменяет распределение внешнего поля, создаваемого магнитной системой МГДГ (рис. 4).

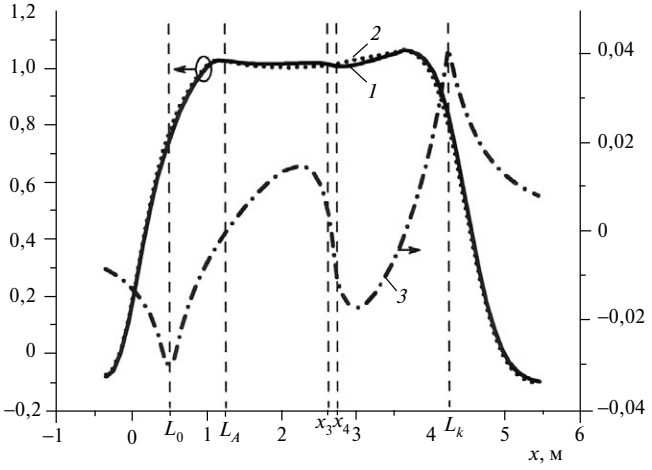

Рис. 4. Относительные ($B_0^0 = 1{,}85$ Тл) распределения осреднённых значений z-компонент индукций магнитных полей: *1* — суммарная индукция; *2* — индукция внешнего магнитного поля; *3* — индукция индуцированных полей.

7. На этапе самовозбуждения МГДГ начальное значение тока $I_{м0}$ ($B_{00} = \alpha_м I_{м0}$), созданное СНВ, возрастает во времени по закону, близкому к экспоненциальному (без учёта приэлектродных потерь): $I_м(t) = I_{м0}\exp(t/\tau_с)$, где $\tau_с = E_м/(N_k - N_j)$, $E_м = L_м I_м^2/2$, $N_k = I_м V_k$, $N_j = R_м I_м^2$, V_k — напряжение на электродах канала [5, 6, 12].

Время самовозбуждения $t_в$ определяется заданным коэффициентом усиления тока $K_i = I(t_в)/I_0$ или ограничено предельными характеристиками, связанными с сильным торможением и изменением структуры сверхзвукового потока. Для МГДГ “М-2” $\tau_с \approx 0{,}2$ с и при начальном токе $I_0 = 15$ кА и $K_i = 15$ оценка времени самовозбуждения даёт величину 0,55 с.

Размеры, материалы стенок и массы ГТ, ГП и стапеля МГДГ “М-2” определялись из подобия аналогичным параметрам МГДГ “Сахалин”. Массы названных узлов составили 4,2 и 0,5 т при времени пуска 5 с (≈1 т при 10 с) и 2 т соответственно [1, 2].

В табл. 2 приведены значения основных характеристик МГДГ “М-2” (без учёта СНВ).

Нагрев проводника обмотки магнита позволяет проводить два пуска МГДГ “М-2” по 5 с каждый подряд. Ресурс стенок неохлаждаемого ГТ составит не менее 5 пусков при их длительности 5 с и 2 пуска при длительности 10 с. При принудительном охлаж-

Таблица 2. Основные характеристики МГДГ “М-2”

	МГДГ “Сахалин”	МГДГ “М-2”
Расход рабочего тела, кг/с	720–800	500
Максимальная электрическая мощность МГД-канала, МВт	510* (до 600)	570–650
Максимальная индукция, Тл	2,5	2,0
Длина электродной зоны, м	4,50	3,75
Сечение канала М×М: на входе на выходе	 0,9×1,0 1,6×1,0	 0,9×0,50 1,4×0,94
Ток канала в номинальном режиме, кА	220	220
Напряжение, кВ	2,5	2,6
Параметры плазмы на входе в электродную зону:		
давление, МПа	0,25–0,35	0,25
температура, К	2750	3360
число Маха (скорость, м/с))	2,4 (2050)	2,8 (2190)
электропроводность, См/м	≈50	≈110
подвижность электронов, 1/Тл	0,17–0,25	0,07
Коэффициент преобразования энергии, %	12	18
Плотность мощности, МВт/м^3	до 100	до 150
Удельный энергосъём в канале, МДж/кг	0,7	1,2
Масса магнитной системы, т	30	19 (13,4**)
Масса МГДГ, т	50	27 (22**)
Электрическая энергия, переданная нагрузке за время электропитания 5 с, ГДж	1,9*	~2,5

* эксперимент; ** для седлообразной формы катушек магнита.

дении стенок ГТ МГДГ “М-2” его суммарный ресурс может достигать 100 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое численное исследование и эскизная проработка МГДГ “М-2” на ТПТ “Старт-2” показали, что в настоящее время можно создавать импульсные МГДГ мультимегаваттной мощности со значительно лучшими удельными и интегральными характеристиками.

Для импульсных МГДГ мощностью 500–600 МВт удельные характеристики достигают следующих значений: коэффициент преобразования энергии до 18%, удельная электрическая энергия в нагрузке с единицы массы ТПТ до 1,2 МДж/кг, а в нагрузку — до 1,0 МДж/кг, плотность мощности в МГД-канале до 150 МВт/м^3, удельная электрическая мощность, передаваемая в нагрузку на единицу массы МГД-генератора, до 18 МВт/т, удельная электрическая энергия, передаваемая в нагрузку на единицу массы МГДГ при времени её электропитания, 5 с (время самовозбуждения ≈1 с) — до 90 МДж/т, а при использовании магнита с седлообразной формой катушек массой 13,4 т до 110 МДж/т.

Эти характеристики в 1,5–2 раза превышают аналогичные показатели МГДГ первого поколения, что позволяет рассматривать мультимегаваттные МГДГ нового поколения в качестве импульсных (5–10 с) автономных, компактных и многоразовых источников электропитания активно-реактивных нагрузок токами в сотни килоампер и энергией в 1–10 ГДж и существенно расширяет возможности их применения.

Благодарности. Авторы благодарят А.П. Баганова и Л.А. Королёву за помощь в проведении расчётных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Малюта Д.Д.*, *Панченко В.П.* Создание импульсных МГД-генераторов. Пути ученого. Е.П. Велихов. М.: РНЦ Курчатовский ин-т, 2007. С. 141–146.

2. *Velikhov E.P.*, *Matveenko O.G.*, *Panchenko V.P.*, *et al.* Pulsed MHD Power System "Sakhalin"– the World Largest Solid Propellant Fueled MHD Generator of 500 MWe Electric Power Output.Proc.13th Int. Conf. on MHD and HTT. Beijing, 1999. V. 2. P. 387–398.
3. *Велихов Е.П.*, *Матвеенко О.Г.*, *Панченко В.П. и др.* Импульсная МГД-установка "Сахалин" электрической мощностью 500 МВт на твердом пороховом топливе // ДАН. 2000. Т. 370. № 5. С. 617–622.
4. *Велихов Е.П.*, *Догадаев Р.В.*, *Панченко В.П.*, *Якушев А.А. и др.* Исследование свойств продуктов сгорания твердого (порохового) плазмообразующего топлива для импульсных МГД-генераторов // ДАН. 2010. Т. 433. № 2. С. 190–195.
5. *Маттсон А.*, *Броган Т.* Самовозбуждающиеся МГД-генераторы. В сб.: МГД-генераторы. М.: ВИНИТИ, 1969. Т. 3. С. 3–11.
6. *Бреев В.В.*, *Губарев А.В.*, *Панченко В.П.* Сверхзвуковые МГД-генераторы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 240 с.
7. *Чернов Ю.Г.*, *Сахаров Б.Б.*, *Гуревич М.И.*, *Веретёнов В.Ю.* Пакет прикладных программ "Плазма" Препр. М.: Изд-во ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1981. № ИАЭ-3522. 50 с.
8. *Menter F.R.* Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. 1994. V. 32. № 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/ 3.12149.
9. *MacCormack R.W.* Iterative Modified Approximate Factorization // Computers & Fluids. 2001. V. 30. P. 917–925.
10. *Афонин А.Г.*, *Бутов В.Г.*, *Панченко В.П.*, *Синяев С.В. и др.* Анализ работы многорельсового электромагнитного ускорителя твердых тел с прямым питанием от импульсной МГД-установки // ПМТФ. 2015. Т. 56. № 5. С. 91–101.
11. *Солоненко В.А.* Численное моделирование сверхзвуковых течений электропроводного газа в канале импульсного МГД-генератора. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Томск: Изд-во ТГУ, 2006. 26 с.
12. *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. M.: Inst. High Temperatures RAS, 2002. P. 322–331.

PULSED MHD GENERATOR OF A NEW GENERATION

Academician of the RAS Ye. P. Velikhov[1], A. G. Afonin[2], V. G. Butov[2], V. P. Panchenko[3], S. V. Sinyaev[2], V. A. Solonenko[2], G. A. Shvetsov[4], A. A. Yakushev[3]

[1]*National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation*

[2]*Research Institute of Mathematic and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

[3]*Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Moscow, Russian Federation*

[4]*Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

Received December 26, 2018

The results of calculation and theoretical investigation for the creation of a powerful (~600 MW) pulsed MHD generator on the combustion products from solid (powder) plasma-forming fuel "Start-2" of a new generation are presented. The scheme, methods, results of calculations, and optimization of characteristics of the pulsed MHD generator with the self-excited resistive "iron-free" magnetic system are described. The local, integral, and specific energy and mass-dimensional characteristics are determined. The obtained characteristics are 1.5–2 times higher than those of the first generation MHD generator.

Keywords: pulsed MHD generator, electric circuit, solid (powder) fuel, MHD channel, supersonic flow, magnetic system, self-excitation, mathematical model, method, calculation, characteristics.