

УДК 621.362.537.84

ИМПУЛЬСНЫЙ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА ТВЕРДОМ (ПОРОХОВОМ) ТОПЛИВЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

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

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета, 634050 Томск, Россия

* Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,
108840 Троицк, Москва, 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

На основе экспериментальных и численных исследований характеристик и режимов работы импульсного магнитогидродинамического генератора (МГДГ) первого поколения “Сахалин” мощностью более 500 МВт, работающего на твердом пороховом топливе (ТПТ), разработана методика построения импульсного МГДГ, работающего на продуктах сгорания современного металлизированного алюминием твердого плазмообразующего топлива “Старт-2”. Представлены результаты расчетов и оптимизации характеристик построенного импульсного МГДГ с самовозбуждающейся резистивной “безжелезной” магнитной системой с электрической мощностью более 500 МВт. Определены локальные, интегральные, удельные энергетические и массогабаритные характеристики этого генератора. Установлены параметры устойчивости сверхзвукового течения при сильном магнитогидродинамическом торможении плазмы продуктов сгорания и время самовозбуждения магнита. Проведено сравнение полученных характеристик импульсных МГДГ с аналогичными показателями МГДГ, работающих на продуктах сгорания ТПТ первого поколения. Показано, что полученные значения энергетических и массогабаритных характеристик МГДГ, работающего на ТПТ “Старт-2”, существенно превышают соответствующие характеристики импульсных МГДГ, работающих на ТПТ нового поколения.

Ключевые слова: самовозбуждающийся магнитогидродинамический генератор, металлизированное твердое плазмообразующее топливо, безударное сверхзвуковое течение, резистивная магнитная система.

DOI: 10.15372/PMTF20180608

Введение. В 70-х гг. XX в. в СССР была создана и экспериментально исследована самая мощная в мире (до настоящего времени) импульсная магнитогидродинамическая

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (код проекта 9.9752.2017/8.9) и Программы повышения конкурентоспособности Томского государственного университета (код проекта 8.2.33.2018).

© Афонин А. Г., Бутов В. Г., Панченко В. П., Синяев С. В., Солоненко В. А.,
Шветцов Г. А., Якушев А. А., 2018

(МГД) установка “Сахалин” с электрической мощностью 500 МВт, работающая на металлизированном твердом пороховом топливе (ТПТ) с легкоионизирующейся присадкой из нитрата цезия, со сверхзвуковым фарадеевским МГД-каналом со сплошными электродами [1, 2]. Разработанные МГД-генераторы (МГДГ) могут быть использованы в качестве мощного источника тока при проведении электромагнитного зондирования земной коры для прогнозирования землетрясений, поиска и разведки рудных месторождений и месторождений углеводородов, при решении задач фундаментальной геофизики и т. д. [3–8]. В генераторе “Сахалин” величина энергетической характеристики, определяющей плотность генерируемой в МГДГ мощности $N_v \sim \sigma_1 u_1^2$ (σ_1, u_1 — электропроводность и скорость плазмы на входе в МГД-канал), достигала $245 \text{ (См/м)} \cdot (\text{км/с})^2$ [2].

Разработанное в последние годы экологически чистое металлизированное алюминием ТПТ нового поколения “Старт-2” на основе бесхлорного окислителя калиевой соли динитразовой кислоты позволило увеличить температуру продуктов сгорания до значений, превышающих 4300 К, при давлениях в генераторе плазмы $5 \div 10$ МПа. Массовая доля алюминия в этом ТПТ составляет 26 %, электропроводность продуктов сгорания в два раза больше, а подвижность электронов μ_e приблизительно в 2,5 раза меньше, чем у ТПТ первого поколения, при одних и тех же значениях давления в камере сгорания генератора плазмы и скорости сверхзвукового потока плазмы на входе в МГД-канал [9]. Такие характеристики позволяют использовать ТПТ “Старт-2” при создании самовозбуждающихся сверхзвуковых импульсных МГДГ с МГД-каналом со сплошными электродами с удельными энергетическими и массогабаритными характеристиками, превышающими соответствующие характеристики, достигнутые в МГДГ “Сахалин”.

В данной работе определены технический облик и электрическая схема самовозбуждающегося сверхзвукового импульсного МГДГ мощностью более 500 МВт, работающего на продуктах сгорания ТПТ “Старт-2”, с длительностью импульса тока $5 \div 10$ с. Прототипом этого МГДГ является МГДГ первого поколения “Сахалин”. Проводится расчет энергетических и массогабаритных характеристик основных элементов МГДГ (МГД-канала, “безжелезной” магнитной системы), а также оценки времени самовозбуждения МГДГ.

1. Схема самовозбуждающегося МГДГ. Для определения параметров резистивной магнитной системы, массогабаритных характеристик МГД-канала, генератора плазмы и вспомогательных систем проектируемого МГДГ, работающего на ТПТ “Старт-2”, используется следующий подход. Характеристики, конструктивная схема, энергетические и массогабаритные характеристики, время пуска проектируемого МГДГ, работающего на

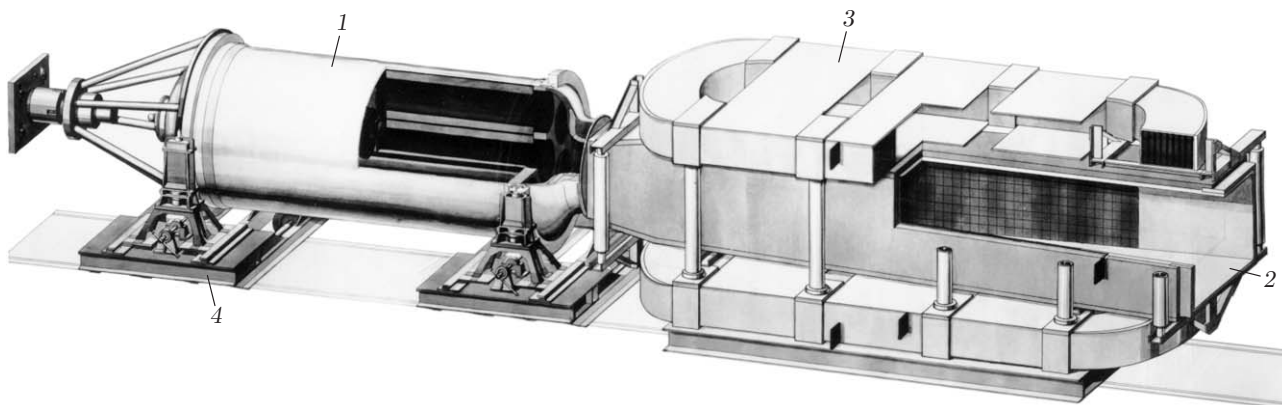


Рис. 1. Схема самовозбуждающегося МГД-генератора “Сахалин”:

1 — генератор плазмы (камера сгорания), 2 — МГД-канал, 3 — магнит, 4 — ступень

продуктах сгорания ТПТ “Старт-2”, близки к соответствующим параметрам МГДГ “Сахалин” (рис. 1) [1]. Параметры узлов проектируемого МГДГ рассчитываются на основе отношений подобия. В проектируемом МГДГ используется такая же магнитная система, как и в МГДГ “Сахалин” с МГД-каналом, состоящим из двух секций: секции питания магнита и секции питания нагрузки (см. [1, 10–12]).

2. Расчет преобразования энергии, энергетических, электротехнических и массогабаритных характеристик МГД-канала и магнитной системы. Ниже приводятся результаты расчетов основных характеристик МГД-канала и магнитной системы.

2.1. *Определение оптимального расхода, геометрических размеров и массы МГД-канала.* Уникальным свойством ТПТ “Старт-2” является достижение максимального значения комплекса $\sigma u^2 \approx 600$ (См/м) · (км/с)² при числах Маха в МГД-канале $M_1 \approx 2,8 \div 3,3$, поскольку при $M_1 \geq 2,8$ будет достигаться максимальное значение плотности мощности N_v [9]. В [13] проведено исследование преобразования энергии в МГД-канале, показавшее, что эффективным является режим сверхзвукового течения, близкого к изотермическому при $T = \text{const}$. Эти свойства лежат в основе приведенной ниже методики определения формы МГД-канала, удовлетворяющей следующим физико-техническим ограничениям.

1. В МГД-канале при дуговом протекании тока течение на электродных стенках должно быть безотрывным, что согласно [14] реализуется при отрицательном продольном градиенте давления, в частности в МГД-канале при $T = \text{const}$ [15].

2. Истечение газа в атмосферу из газодинамического тракта (ГТ) в отсутствие внешней нагрузки в режиме холостого хода МГД-канала должно быть сверхзвуковым и безотрывным, что выполняется при значении статического давления $p_{st} \geq 5,5 \cdot 10^4$ Па [16].

3. Значения теплового потока к стенкам на входе в МГД-канал при температуре огневой поверхности, приблизительно равной 2300 К (температура плавления окиси алюминия), не должны превышать значения $4 \cdot 10^6$ Вт/м² для обеспечения ресурса работы огневых стенок МГД-канала более 10 пусков при длительности пуска, приблизительно равной 10 с, в случае применения освоенных технологий производства высокотемпературных материалов и систем охлаждения ГТ МГДГ [2].

4. Допустимое число Маха газовой фазы двухфазного потока на выходе из МГД-канала при номинальной величине нагрузки $M \geq 1,1$ [17].

При выборе формы МГД-канала учитывалось влияние продольного концевое эффекта [18]. В расчетах изменение термодинамических и электрофизических характеристик учитывалось с помощью программы “Плазма”, протестированной с использованием результатов экспериментальных исследований плазмообразующих топлив [2, 9, 19].

В предлагаемой методике определения размеров электродной зоны задаются опорные значения каких-либо двух параметров, например значения электрической мощности генератора N_k и полной силы тока I_k или напряжения U_k на электродах. В качестве варьируемых параметров используются давление в камере сгорания генератора плазмы, равное $7 \div 10$ МПа, и коэффициент электрической нагрузки в МГД-канале $K_y \leq 0,85$.

При выборе в качестве опорного параметра электрической мощности N_k расход плазмы \dot{m} рассчитывается по соотношению

$$N_k = 0,5 \dot{m} \eta_e (u_1^2 - u_2^2),$$

где u_1, u_2 — скорости газа на входе в МГД-канал и выходе из него соответственно; η_e — коэффициент потерь в МГД-канале (потери на трение, приэлектродные потери и др.), значение которого в расчетах принималось равным 0,9.

Отношение скоростей u_1/u_2 при заданном отношении площадей F_2 на выходе и F_1 на входе в МГД-канал определяется из соотношения [15]

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{\rho_1 u_1}{\rho_2 u_2} = \frac{u_1}{u_2} \exp\left(\frac{\gamma M_1^2}{2} \frac{1 - K_y}{K_y} \omega_k\right), \quad \omega_k = 1 - \left(\frac{u_2}{u_1}\right)^2. \quad (1)$$

Из (1) следует зависимость $F = F_1 f(\omega)$ площади поперечного сечения МГД-канала от характеристики $\omega = 1 - (u/u_1)^2$ ($0 \leq \omega \leq \omega_k$).

Если в качестве второго опорного параметра задано напряжение на электродах U_k , то расстояние между электродными стенками h_1 на входе определяется соотношением $h_1 = U_k / (K_y u_1 B \eta_e)$. Межэлектродное расстояние на выходе h_2 и расстояния между изоляционными стенками a_1, a_2 определяются соотношениями $h_2 = h_1 u_1 / u_2$, $a_1 = F_1 / h_1$, $a_2 = F_2 / h_2$. Аналогично можно определить h_i, a_i при других заданных опорных параметрах. Выражение для длины электродной зоны L_k канала в приближении $T = \text{const}$ и постоянных K_y, B, μ_e имеет вид [15]

$$L_k = \frac{0,5\rho_1 u_1}{\sigma B^2 K_y (1 - K_y)} \int_0^{\omega_k} \frac{1}{\sqrt{1 - \omega}} \exp\left(-\frac{3}{4} \frac{\gamma M_1^2 (1 - K_y)}{K_y} \omega\right) A d\omega, \quad (2)$$

$$A = 1 + \mu_e^2 B^2 \exp\left(\frac{\gamma M_1^2}{2} \frac{1 - K_y}{K_y} \omega\right).$$

Заменяя в (2) верхний предел ω_k на ω , можно построить зависимость $\omega = \omega(x)$ ($0 \leq \omega \leq \omega_k, 0 \leq x \leq L_k$) и в предположении $T = \text{const}$ определить криволинейный профиль $F = F_1 f(x)$ МГД-канала, далее называемый исходным контуром. Следовательно, если задана величина L_k , можно получить значение индукции внешнего магнитного поля

$$B = \frac{0,5\rho_1 u_1^2 u_2 \eta_e (h_1 + h_2)}{U_k (u_2 + u_1) L_k \sigma_1 (1 - K_y)} \int_0^{\omega_k} \frac{1}{\sqrt{1 - \omega}} \exp\left(-\frac{3}{4} \frac{\gamma M_1^2 (1 - K_y)}{K_y} \omega\right) A d\omega. \quad (3)$$

По вычисленным значениям h_i, a_i ($i = 1, 2$) и L_k строится линейный МГД-канал, контуры начального и конечного сечений которого совпадают с исходным контуром сечения МГД-канала. Важным свойством исходного контура МГД-канала является монотонное уменьшение давления на интервале от входа в МГД-канал до выхода из него, что обеспечивает течение без отрыва пограничного слоя. Расчеты с использованием полной модели течения показали, что это свойство сохраняется в МГД-канале с контуром, состоящим из двух линейных участков, определенных из условия наилучшего приближения к исходному контуру.

Таким образом, при заданных значениях числа Маха на входе M_1 , давления и температуры в камере сгорания генератора плазмы величина удельного энергосъема $q = N_k / \dot{m}$, характеризующая эффективность процесса МГД-преобразования энергии, определяется допустимым значением скорости u_2 на выходе из канала и диссипативными потерями энергии сверхзвукового потока в ГТ МГДГ.

Для проектирования МГДГ мощностью приблизительно 600 МВт, работающего на топливе “Старт-2”, выбраны следующие параметры: давление и температура в генераторе плазмы $p_{ГП} = 10$ МПа, $T_{ГП} = 4470$ К, $\dot{m} \approx 500$ кг/с, на входе в МГД-канал $M_1 = 2,8$, $p_1 = 0,25$ МПа, $T_1 = 3360$ К, $u_1 = 2190$ м/с, $\sigma_1 = 111,5$ См/м, $\mu_{e1} = 0,07$ Тл⁻¹, показатель адиабаты $\gamma = 1,22$, газовая постоянная $R = 162,5$ Дж/(кг · К). МГД-канал имел следующие размеры: $L_k = 3,75$ м, $h_1 = 0,96$ м, $h_2 = 1,53$ м, $a_1 = 0,55$ м, $a_2 = 0,96$ м. Среднее значение индукции магнитного поля на оси канала равно $B = 1,85$ Тл, номинальные значения напряжения на электродах — 2850 В, полной силы тока — 220 кА.

Массогабаритные характеристики МГД-канала и его выхлопного участка определялись из условий равенства толщин электродных и изоляционных стенок и осредненной по толщине плотности материала стенки расчетного МГД-канала и МГД-канала МГДГ “Сахалин” [1]. Тогда масса МГД-канала, оцениваемая как произведение массы опорного ГТ

и отношения площадей внутренних поверхностей расчетного МГД-канала и МГД-канала МГДГ “Сахалин”, равна $m_c \approx 4,2$ т.

2.2. *Определение электротехнических и массогабаритных характеристик резистивной магнитной системы.* На основе результатов эскизной проработки размещения ГТ в магните с трапециевидными (рейстрековыми) обмотками установлено, что расстояния между полюсами расчетного магнита и магнита МГДГ “Сахалин” практически одинаковы и составляют приблизительно 1250 мм. Это позволяет при определении характеристик магнитной системы МГДГ, работающего на продуктах сгорания ТПТ “Старт-2”, использовать модельные зависимости [1, 17]

$$W_m = W_{m0}(B/B_0), \quad R_m = R_{m0}nl_w/(n_0l_{w0}), \quad L_m = L_{m0}(n/n_0)^2, \\ m_c = m_{c0}nl_w/(n_0l_{w0}), \quad m_{con} = (m_{m0} - m_{c0})(B/B_0)^2,$$

где $W_m = nI_w$ — число ампер-витков; $L_m, R_m, I_w, n, l_w, m_c$ — индуктивность, сопротивление, сила тока в витке, число витков, средняя длина витка, масса проводника в обмотке магнита; m_{con} — масса силовой конструкции магнита; m_m — масса магнита; индекс “0” соответствует характеристикам МГДГ “Сахалин”.

Потребляемая электрическая мощность магнита в режиме питания нагрузки МГДГ приблизительно равна 100 МВт при $B = 1,85$ Тл и силе тока в обмотке магнита $I_m = 50$ кА, для седлообразной обмотки потребляемая мощность магнита приблизительно равна 50 МВт. Полная масса магнита составляет $m_m = 19,1$ т, для магнита с седлообразной обмоткой $m_m \approx 13,4$ т.

3. Результаты математического моделирования процессов в МГД-канале.

Ниже приводятся результаты численных расчетов процессов, происходящих в МГД-канале.

3.1. *Математические модели течения в газодинамическом тракте МГДГ.* Расчеты проводились для трехмерных уравнений Навье — Стокса (уравнений Рейнольдса), осредненных по координате, направление которой совпадает с направлением внешнего магнитного поля. Реальное течение в МГДГ является двухфазным, в нем присутствуют полидисперсные частицы жидкого оксида алюминия (Al_2O_3), скорость и температура которых отличаются от скорости и температуры продуктов сгорания топлива “Старт-2”. Тем не менее для расчетов выбрана модель псевдогаза, в которой пренебрегается различием скоростей и температур газа и конденсированных частиц в потоке. При использовании этой модели приемлемые результаты получаются вследствие особенностей ГТ МГДГ, в котором наибольшее различие скоростей и температур газа и частиц достигается в трансзвуковой части МГДГ. В сверхзвуковой части и в МГД-канале за счет большой протяженности ГТ и незначительного изменения поперечного сечения вдоль него это различие становится незначительным [20, 21], что позволяет использовать в расчетах модель псевдогаза. На основе этой модели в работе [22] исследованы различные режимы течения в МГДГ “Сахалин”, в том числе с образованием в МГД-канале отрывной зоны. Показано, что результаты расчетов удовлетворительно согласуются с данными экспериментов. В модели показатель адиабаты газа γ_g и газовая постоянная R_g связаны с эффективными параметрами псевдогаза γ_{eff}, R_{eff} формулами [20, 22]

$$R_{eff} = (1 - z)R_g, \quad \gamma_{eff} = \gamma_g \frac{1 - z + zC_S/C_{Pg}}{1 - z + z\gamma_g C_S/C_{Pg}},$$

где z — массовая доля частиц в потоке; C_S — теплоемкость частиц; C_{Pg} — теплоемкость при постоянном давлении газовой составляющей продуктов сгорания.

3.2. *Методика и результаты численного моделирования вязкого сверхзвукового течения в МГД-канале.* Для описания течения в сверхзвуковой части МГД-канала использу-

ются декартовы координаты x, y, z . Внешнее магнитное поле направлено по координате z , по которой, так же как в [21], проводится осреднение уравнений [22]:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{T} + \mathbf{H}, \quad P = (\gamma - 1) [E_0 - \rho(u^2 + v^2)/2]. \quad (4)$$

Здесь u, v — компоненты вектора скорости в направлениях осей x, y соответственно,

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - \tau_{xx} \\ \rho v u - \tau_{xy} \\ (E_0 + p - \tau_{xx})u - \tau_{xy}v - \lambda \partial T / \partial x \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v - \tau_{xy} \\ \rho v^2 + p - \tau_{yy} \\ (E_0 + p - \tau_{yy})v - \tau_{xy}u - \lambda \partial T / \partial y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -(d \ln a / dx) \rho u \\ -(d \ln a / dx) (\rho u^2 - \tau_{xx}) \\ -(d \ln a / dx) (\rho u v - \tau_{xy}) \\ -(d \ln a / dx) (u(E_0 + p) - u \tau_{xx} - v \tau_{xy} + \lambda \partial T / \partial x) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ j_y B_z \\ -j_x B_z \\ \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} \end{bmatrix},$$

T, p, ρ — температура, давление и плотность соответственно; E_0 — полная энергия; μ, λ — вязкость и теплопроводность; функция $a(x)$ определяет форму МГД-канала между изоляционными стенками (в направлении оси z); \mathbf{j} — вектор плотности электрического тока; \mathbf{B} — вектор магнитной индукции; \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля. Компоненты тензора вязких напряжений $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ в уравнениях импульса определяются соотношениями [22]

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu D, \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu D, \quad \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}. \quad (6)$$

Расчет турбулентного течения в ГТ МГДГ проводился после осреднения по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (4)–(6), которые замыкаются с помощью SST-модели турбулентности Ментера [23]. Необходимые для расчетов характеристики течения (вязкость и теплопроводность, показатель адиабаты, газовая постоянная и др.) выбирались из программы “Плазма” [19].

В расчетах применялась дополненная процедурой монотонизации решения [24] явная двухшаговая разностная схема Мак-Кормака [7, 25, 26] (схема предиктор-корректор), широко используемая при решении уравнений Навье — Стокса с учетом сжимаемости. Для увеличения точности (за счет сохранения симметрии схемы) и упрощения расчетов каждый из векторов \mathbf{F}, \mathbf{G} в (4) разбивается на два вектора: $\mathbf{F} = \mathbf{F} + \mathbf{R}$ и $\mathbf{G} = \mathbf{G} + \mathbf{S}$, так чтобы векторы \mathbf{F} и \mathbf{G} содержали только невязкие слагаемые, а \mathbf{R} и \mathbf{S} — только компоненты тензора вязких напряжений и слагаемые, характеризующие теплопроводность. Кроме того, разностная схема записывается в криволинейной системе координат, в которой упрощается запись граничных условий. При описании турбулентного течения в ГТ МГДГ на твердых стенках учитывалось, что в их ближайшей окрестности имеют место большие градиенты скорости и температуры в направлении нормали к поверхности. Реализация разностной схемы Мак-Кормака и постановка граничных условий проводились так же, как в [22].

На рис. 2, 3 представлены результаты расчетов магнитного поля и геометрии стенок МГД-канала. На рис. 4 показаны поля давления и числа Маха.

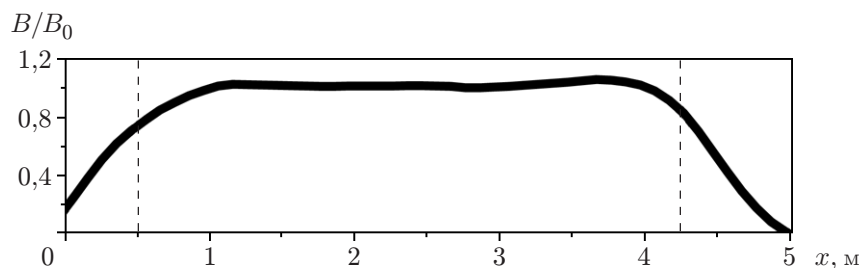


Рис. 2. Распределение магнитного поля на оси x МГД-канала (штриховые линии — границы электродной зоны)

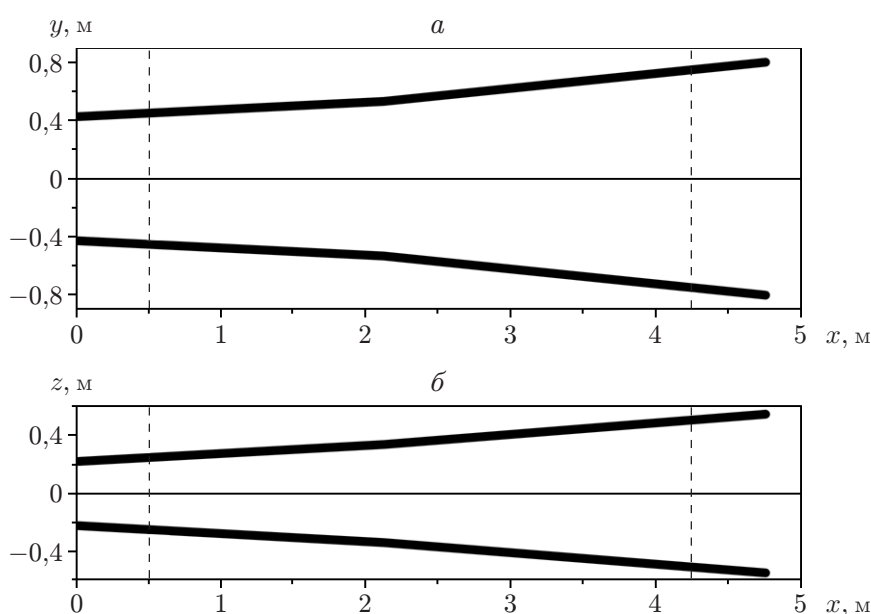


Рис. 3. Геометрия МГД-канала:

a — сечение xy ; b — сечение xz ; штриховые линии — границы электродной зоны

На рис. 5 представлены распределения теплового потока к анодной и катодной стенкам МГДГ.

На рис. 6 показаны вольт-амперная и нагрузочная характеристики спроектированного МГДГ при $I_k = 220$ кА, $N_k = 645$ МВт, $\dot{m} = 505$ кг/с.

3.3. Численный метод и результаты определения оптимального положения токо-выводящих шин МГД-канала. В МГДГ “Сахалин” магнитное число Рейнольдса равно $Re_m = \mu_0 \sigma u L_k \approx 0,5$ [27]. Для проектируемого МГДГ на продуктах сгорания ТПГ “Старт-2” $Re_m > 0,5$, поэтому при построении модели необходимо учитывать процессы, происходящие в МГДГ. Для расчета распределения индукции магнитного поля в рабочем объеме МГД-канала будем считать, что осредненная по направлению внешнего магнитного поля (z -компоненты) в сечении МГД-канала напряженность индуцированного магнитного поля определяется токами в плазме ($\langle \mathbf{B}_p \rangle(x, y)$) и токонесущих шинах ($\langle \mathbf{B}_t \rangle(x, y)$), тогда суммарную индукцию магнитного поля можно представить (далее опуская знак осреднения) в виде

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{B}_p + \mathbf{B}_t.$$

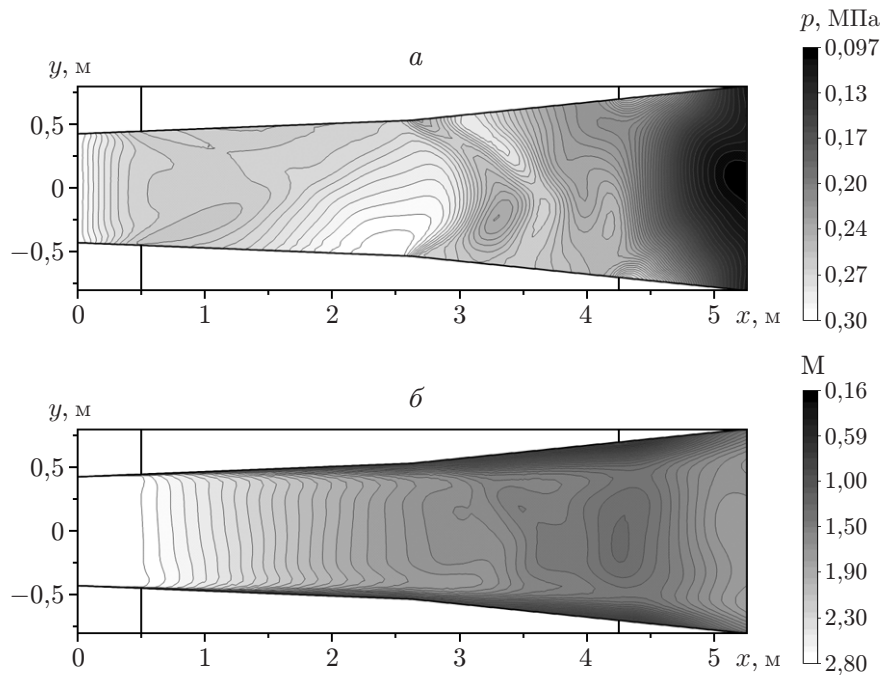


Рис. 4. Распределения давления (а) и числа Маха (б) в расчетном МГДГ

Для расчета \mathbf{B}_p используются система уравнений Максвелла и обобщенный закон Ома:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \quad \mathbf{j} + \frac{\beta}{|\mathbf{B}|} \mathbf{j} \times \mathbf{B} = \sigma[\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}], \quad \mathbf{j} = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{B} \quad (7)$$

(β — параметр Холла; μ_0 — магнитная постоянная).

Для вычисленного по формуле (3) значения индукции внешнего магнитного поля B из первых трех уравнений (7) и уравнений течения плазмы определим распределение плотности тока \mathbf{j} в МГД-канале, аналогично тому как это сделано в [25]. Далее, с использованием полученного распределения \mathbf{j} и формулы Био — Савара — Лапласа рассчитываются новые значения напряженности индуцированного магнитного поля $\mathbf{B}(x, y)$ в МГД-канале.

Пусть $B = \langle B_z \rangle$, где $\langle B_z \rangle$ — осредненное по координатам x и y поле $\mathbf{B}(x, y)$. В результате подстановки в (2) полученного значения B уточняется значение длины МГД-канала L_k . Так же вычисляются расстояния между электродными (h_1, h_2) и изоляционными (a_1, a_2) стенками на входе в МГД-канал и выходе из него. Процедура вычисления решения системы (7) описанным выше способом повторяется до достижения ею сходимости. В результате получаем поле $\mathbf{B}_p(x, y)$.

Расчет поля $\mathbf{B}_t(x, y)$, инициируемого током в токонесущих шинах, более сложен. Оценка этого поля, выполненная в [27] для МГДГ “Сахалин”, показала, что значение \mathbf{B}_t уменьшается во входной области и увеличивается в выходной области МГД-канала за счет расположения токосъемных шин с токовыводом на выходе из электродной зоны, обуславливающего неравномерное распределение локальных параметров, увеличение интенсивности взаимодействия потока с магнитным полем на выходе из МГД-канала и развитие отрывных явлений.

Для проектируемой магнитной системы МГДГ, работающего на продуктах сгорания “Старт-2”, предполагается, что токи в шинах являются поверхностными, равномерно распределенными вдоль оси z и по высоте электродов. Суммарное индуцированное поле \mathbf{B}_i зависит от положения токовыводов. Расчеты показывают, что различие распределений \mathbf{B}_i

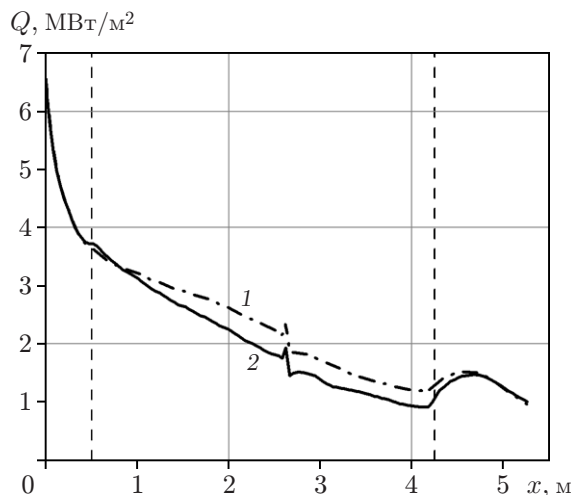


Рис. 5

Рис. 5. Тепловой поток к катодной (1) и анодной (2) стенкам МГДГ (штриховые линии — границы электродной зоны)

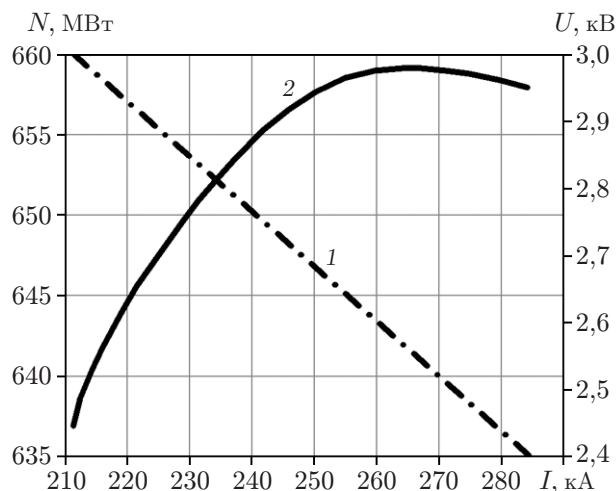


Рис. 6

Рис. 6. Вольт-амперная (1) и нагрузочная (2) характеристики МГД-канала

при расположении токовыводов на входе в МГД-канал и выходе из него составляет приблизительно 10 %.

Если токовыводы расположены симметрично в некотором сечении x между входом и выходом (рис. 7), то по разные стороны от них токи имеют разные направления и соответственно индуцированное поле меняет направление. Подбирая положение токовыводов, можно получить равномерное распределение суммарного магнитного поля в МГД-канале и его окрестности. Расчеты показали, что оптимальным является вывод электрической энергии на нагрузку на расстоянии от входа в МГД-канал, равном 0,6 его длины. Для такого варианта расположения токовыводов в МГДГ, работающем на продуктах сгорания ТПТ “Старт-2”, на рис. 8 приведены распределения внешнего, индуцированного и суммарного магнитных полей. Видно, что при выбранном положении токовыводов индуцированное поле оказывает незначительное влияние на зависимость суммарного магнитного поля от внешнего поля магнитной системы в МГДГ.

4. Электрические, удельные энергетические, массогабаритные характеристики и время самовозбуждения импульсного МГД-генератора. На этапе самовозбуждения нагрузкой МГД-канала является обмотка магнита. При джоулевых потерях в обмотке магнита МГД-канала, не превышающих 20 %, для оценки времени самовозбуждения от некоторого начального значения силы тока в магните I_{m0} до конечного значения можно использовать зависимость

$$I_m = I_{m0} e^{t/\tau_c},$$

где $\tau_c = 2E_m/(N_c - N_J)$; $E_m = L_m I_m^2/2$ — энергия, накопленная в магните; $N_c = I_m V_c$ — мощность МГД-канала; $N_J = R_m I_m$ — мощность джоулевых потерь в магните; V_c — напряжение на клеммах МГД-канала [27]. Время самовозбуждения магнита, характеристики которого близки к характеристикам магнита МГДГ “Сахалин”, определяется по формуле $t_{св} = \tau_c \ln(I_m/I_{m0})$ [27].

Для проведения оценки τ_c построена дополнительная вольт-амперная характеристика при $B = 0,2$ Тл. В результате получены значения $\tau_c \approx 0,18$ с и $\tau_c = 0,2$ с, соответствующие начальному и конечному участкам самовозбуждения. С использованием значения $\tau_c =$

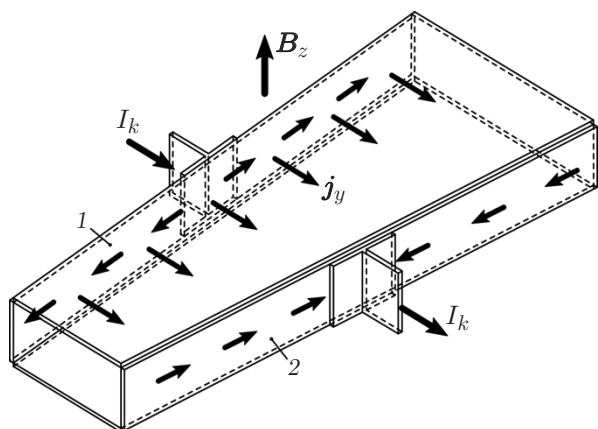


Рис. 7

Рис. 7. Схема расположения токовыводов на нагрузку в МГД-канале:

1 — анод, 2 — катод; стрелки — направления течения тока

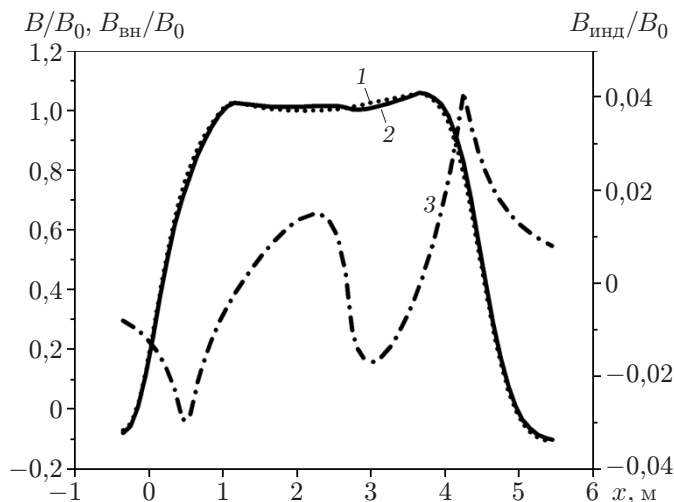


Рис. 8

Рис. 8. Распределения внешнего магнитного поля $B_{\text{вн}}/B_0$ (1), суммарного магнитного поля B/B_0 (2) и индуцированного поля $B_{\text{инд}}/B_0$ (3) по координате x при $B_0 = 1,85$ Тл

0,2 с получены следующие значения времени самовозбуждения магнита: $t_{\text{св}} = 0,4$ с при $I_{\text{св}}/I_{m0} = 10$ и $I_{m0} = 15$ кА; $t_{\text{св}} = 0,8$ с при $I_{\text{св}}/I_{m0} = 100$ и $I_{m0} = 1,5$ кА.

Массогабаритные характеристики МГД-канала и магнитной системы определялись по формулам, приведенным в [1]. Масса генератора плазмы (см. рис. 1) составила 20 % массы заряда ТПТ (приблизительно 0,5 т в случае времени пуска генератора плазмы $t_{\text{ГП}} = 5$ с и приблизительно 1 т в случае времени пуска генератора плазмы $t_{\text{ГП}} = 10$ с). Масса стапеля равна 10 % суммарной массы магнита и массы генератора плазмы, равной 2 т. В табл. 1–3 приведены значения основных характеристик МГДГ, МГД-канала и магнитной системы.

Полученные в результате расчета удельные энергетические характеристики МГДГ имели следующие значения: электрическая энергия в нагрузке на единицу массы ТПТ — более 1 МДж/кг, электрическая мощность на единицу массы МГДГ — до 20 МВт/т, электрическая энергия, выделяющаяся в нагрузке, на единицу массы МГДГ при времени пуска генератора плазмы $t_{\text{ГП}} \approx 5$ с и полном времени самовозбуждения $t_{\text{св}} \approx 1$ с — до 100 МДж/т.

Температура нагрева обмотки магнита вследствие выделения джоулева тепла допускает осуществлять два пуска ($t_{\text{ГП}} = 5$ с) подряд. Ресурс неохлаждаемого ГТ МГДГ первого поколения составлял пять пусков при времени работы генератора плазмы $t_{\text{ГП}} = 5$ с и два пуска при $t_{\text{ГП}} = 10$ с. В случае принудительного охлаждения огневых поверхностей МГД-канала его суммарный по всем пускам ресурс может достигать более 100 с.

В течение времени работы МГД-генератора величина реактивной тяги при истечении продуктов сгорания ТПТ составляет приблизительно 10^6 Н.

Заключение. Разработана методика построения и проведен расчет характеристик МГД-генератора, работающего на твердом плазмообразующем топливе “Старт-2”, с самовозбуждающейся магнитной системой с электрической мощностью более 500 МВт. Исследованы условия безударного сверхзвукового течения в канале МГДГ, энергетическая эффективность его работы в режиме генерации мощных импульсов тока.

Таблица 1

Значения основных характеристик МГДГ

Тип МГДГ	\dot{m} , кг/с	L_k , м	$h_1 \times a_1$, м	$h_2 \times a_2$, м	Параметры плазмы на входе в электродную зону					m , т
					P , МПа	T , К	$M_1 (u_1)$, м/с	σ_1 , См/м	μ_{e1} , Тл ⁻¹	
МГДГ "Сахалин"	$720 \div 1000$	4,50	$0,90 \times 1,00$	$1,60 \times 1,00$	$0,25 \div 0,35$	2750	2,4 (2050)	≈ 50	$0,17 \div 0,25$	≈ 50
МГДГ на ТПТ "Старт-2"	500	3,75	$0,96 \times 0,55$	$1,53 \times 0,96$	0,25	3360	2,8 (2190)	≈ 112	0,07	27 (19)*

* В скобках указана масса МГДГ с магнитной системой с седлообразной обмоткой магнита.

Таблица 2

Энергетические параметры МГД-канала

Тип МГДГ	I_k , кА	U_{xx} , кВ	U_k , кВ	N_k , МВт	ΔU , В	η_n , %	N_v , МВт/м ³	q , МДж/кг
МГДГ "Сахалин"	220	5	2,5	$500 \div 550$	200	12	≤ 100	0,7
МГДГ на ТПТ "Старт-2"	220	5	2,6	600	200	18	≤ 150	1,2

Таблица 3

Параметры магнитной системы

Тип МГДГ	B , Тл	$W_m \cdot 10^{-3}$, кА	n	$L_{св}$, мГн	$\tau_{m,св}$, с	$R_{св}$, МОм	α , Тл/кА	E_m , МДж	Сила тока в обмотке при соединении секций		$m_{св}$, т	$m_{сon}$, т	m_m , т
									парал- лельном $I_{св}$, кА	последо- вательном I_m , кА			
МГДГ "Сахалин"	2,50	8,4	168	6,50	2,00	3,25	0,045	≤ 100	≈ 150	≈ 50	16,5	13,5	30
МГДГ на ТПТ "Старт-2"	1,85	6,7	138	4,39	1,64	2,67	0,037	≤ 60	≈ 150	≈ 50	12,3	6,3	$\approx 19,1 (13,4)^*$

* В скобках указана масса магнитной системы в случае применения седлообразной обмотки магнита.

Полученные значения энергетических и массогабаритных характеристик МГДГ на ТПТ “Старт-2” существенно превышают соответствующие характеристики МГДГ “Сахалин”, работающего на ТПТ первого поколения. Так, коэффициент преобразования энергии и удельный энергосъем в МГДГ на ТПТ “Старт-2” равны 18 % и 1,2 МДж/кг соответственно, в то время как в МГДГ “Сахалин” их значения равны 12 % и 0,7 МДж/кг соответственно.

Рассчитанный МГДГ на продуктах сгорания ТПТ “Старт-2” является источником тока с уникальными удельными энергетическими характеристиками и может быть использован в качестве автономного транспортабельного источника энергии на автотягаче высокой проходимости, среднетоннажном судне, вертолете тяжелого класса типа МИ-26 или других транспортных средствах.

Представленный МГДГ может применяться в качестве источника тока для электромагнитного зондирования земной коры, прогнозирования землетрясений, снятия тектонических напряжений в земной коре, поиска и разведки рудных месторождений и месторождений углеводородов на площадях более 10^4 км² при глубине зондирования порядка 100 км, для решения задач фундаментальной геофизики в труднодоступных районах во всех климатических зонах Земли и т. д. [3–7].

Авторы выражают благодарность А. П. Баганову за помощь в проведении расчетов индуцированных магнитных полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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 MW 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.
2. **Панченко В. П.** О некоторых отечественных разработках МГД-установок кратковременного действия // Пути ученого. Е. П. Велихов / Под ред. В. П. Смирнова. М.: РНЦ “Курчат. ин-т”, 2007. С. 156–166.
3. **Зейгарник В. А.** Использование импульсных МГД-установок для прогноза землетрясений и поиска месторождений углеводородов // Пути ученого. Е. П. Велихов / Под ред. В. П. Смирнова. М.: РНЦ “Курчат. ин-т”, 2007. С. 211–222.
4. **Жамалетдинов А. А.** Геофизические результаты эксперимента “Хибины” // Пути ученого. Е. П. Велихов / Под ред. В. П. Смирнова. М.: РНЦ “Курчат. ин-т”, 2007. С. 223–235.
5. **Тарасов Н. Т.** Использование мощных импульсов тока от геофизических МГД-установок для снятия тектонических напряжений в коре // Пути ученого. Е. П. Велихов / Под ред. В. П. Смирнова. М.: РНЦ “Курчат. ин-т”, 2007. С. 236–248.
6. **Лисин А. С.** Результаты и перспективы мощных импульсных источников электромагнитного поля в геоэлектрике // Пути ученого. Е. П. Велихов / Под ред. В. П. Смирнова. М.: РНЦ “Курчат. ин-т”, 2007. С. 249–260.
7. **Афонин А. Г., Бутов В. Г., Панченко В. П. и др.** Анализ работы многорельсового электромагнитного ускорителя твердых тел с прямым питанием от импульсной магнитогидродинамической установки // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 5. С. 91–101.
8. **Геоэлектрические** исследования с мощным источником тока на Балтийском щите / Под ред. Е. П. Велихова. М.: Наука, 1989.
9. **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.

10. **Маттсон А., Брoган Т.** Самовозбуждающиеся МГД-генераторы // МГД-генераторы: Сб. ст. М.: ВИНТИ, 1969. Т. 3. С. 3–11.
11. **Velikhov E. P., Evstigneev V. V., Panchenko V. P., et al.** MHD installation for oil and gas field electrosearching on the sea-shelf // Proc. of the 12th Intern. conf. on MHD electrical power generation, Yokohama (Japan), 15–18 Oct. 1996. S. 1., 1996. V. 1. P. 586–594.
12. **Дегтев Ю. Г., Догадаев Р. В., Иваненко А. А. и др.** Компактная МГД-установка для генерации мощных электрических импульсов // Изв. РАН. Энергетика. 2007. № 4. С. 106–115.
13. **Баранов В. Ю., Малюта Д. Д., Панченко В. П., Улинич Ф. Р.** Качественный анализ эффективности преобразования энергии // Теплофизика высоких температур. 1973. Т. 11, № 1. С. 167–173.
14. **Golovin A. P., Dogadaev R. V., Panchenko V. P., et al.** Supersonic flow stability in channels under high MHD interaction and boundary layer suction // Proc. of the 9th Intern. conf. on MHD electrical power generation, Tsucuba (Japan), Nov. 1986. S. 1., 1986. V. 1. P. 206–216.
15. **Swift-Hook D. T.** MHD generation // Direct generation of electricity. L.; N. Y.: Acad. Press, 1965. Chap. 3. P. 65–195.
16. **Бухтеев Л. А., Догадаев Р. В., Королева Л. А. и др.** Экспериментальное и численное исследование диагонального МГД-генератора “Памир-06” на твердом (пороховом) топливе // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 4. С. 631–638.
17. **Бреев В. В., Колядин Н. М., Панченко В. П.** Расчет электромагнитных параметров магнитных систем с прямоугольными катушками. М., 1966. (Препр. / Ин-т атом. энергии им. И. В. Курчатова; № 1716).
18. **Бреев В. В.** Сверхзвуковые МГД-генераторы / В. В. Бреев, А. В. Губарев, В. П. Панченко. М.: Энергоатомиздат, 1988.
19. **Чернов Ю. Г., Сахаров Б. Б., Гуревич М. И., Веретенев В. Ю.** Пакет прикладных программ “Плазма”. М., 1981. (Препр. / Ин-т атом. энергии им. И. В. Курчатова; № 3522).
20. **Васенин И. М., Глазунов А. А., Губарев А. В. и др.** Метод и комплекс программ “Канал” расчета одно- и двухфазных течений в сверхзвуковых МГД-генераторах. М., 1990. (Препр. / Ин-т атом. энергии им. И. В. Курчатова; № 5014).
21. **Бутов В. Г., Галкин В. М., Головизнин 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).
22. **Солоненко В. А.** Численное моделирование сверхзвуковых течений электропроводного газа в канале импульсного МГД-генератора: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: Том. гос. ун-т, 2006.
23. **Menter F. R.** Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. V. 32, N 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
24. **Brown B. P., Argrow B. M.** Two-dimensional shock tube flow for dense gases // J. Fluid Mech. 1997. V. 349. P. 95–115.
25. **MacCormack R. W.** Iterative modified approximate factorization // Computers Fluids. 2001. V. 30. P. 917–925.
26. **Флетчер К.** Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991.
27. **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.