

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

K. L. Kovalev, T. A. Markina, Power facility with a built-in multipolar MHD generator,
TVT, 1995, Volume 33, Issue 3, 463–472

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt2942>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.80

May 18, 2025, 07:38:46



ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ АППАРАТЫ И КОНСТРУКЦИИ

УДК 621.362:537.84

ЭНЕРГОСИЛОВАЯ УСТАНОВКА С ВСТРОЕННЫМ МНОГОПОЛЮСНЫМ МГД-ГЕНЕРАТОРОМ

© 1995 г. К. Л. Ковалев, Т. А. Маркина

Московский авиационный институт

Поступила в редакцию 24.06.94 г.

Рассмотрена предложенная авторами схема энергосилового устройства с встроенным многополюсным МГД-генератором. В большинстве работ, посвященных бортовым МГД-генераторам большой мощности (автономных или встроенных в сопло двигательной установки), рассматриваются МГД-каналы, выполненные по двухполюсной схеме. Процессы преобразования энергии в этих МГД-генераторах обычно приводят к возмущениям потока во всем объеме канала, что в ряде случаев нежелательно по условиям работы энергосиловых установок. В зависимости от числа пар полюсов предлагаемая установка позволяет осуществить МГД-преобразование как в периферийной зоне сопла, так и в центральной части потока. Дается анализ методов и результатов расчетов объемных МГД-эффектов при конечных параметрах Холла β и МГД-взаимодействия S , а также выходных характеристик многополюсных МГД-генераторов с различными типами электродных модулей. Проводится сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Рассмотрена схема перспективной двигательной установки на криогенном топливе $H_{2ж} + O_{2ж}$ и встроенным многополюсным МГД-генератором. Обсуждаются вопросы использования встроенных многополюсных МГД-генераторов в двигательных установках на других топливных парах.

Введение. В последние годы интенсивно разрабатывается концепция создания полностью электрифицированного летательного аппарата (ЛА) [1, 2]. Для повышения тактико-технических характеристик на борту таких ЛА предполагается использовать новые типы электроэнергетических и энергосиловых установок. Для атмосферных ЛА с газотурбинными двигательными установками (ДУ), работающими на относительно низкотемпературных потоках рабочего тела ($T \leq 2000$ К), в качестве источников электрической энергии большой мощности целесообразно применять электромеханические источники (в частности, синхронные генераторы) с приводом от основных ДУ ЛА [3, 4]. На аэрокосмических ЛА (АКЛА) с высокотемпературными ($T \geq 3000$ К) ракетными двигателями (РД) в качестве мощных бортовых источников перспективно применение МГД-генераторов (МГДГ) [5, 6]. Использование МГДГ в составе энергосиловых установок позволит приступить к созданию новых типов электрореактивных двигателей для ЛА, даст возможность заменить в установках с ЖРД традиционные турбонасосные агрегаты на перспективные системы подачи топлива, а также позволит реализовать МГД-способ управления вектором тяги на АКЛА [7 - 9].

Схемы многополюсных МГДГ. В исследуемых вариантах многополюсных МГДГ электроды могут занимать часть поверхности тонких цилиндрических стержней (рис. 1а, 1б) или устанавливаться на U-образных выступах (рис. 1в) и боковых стен-

ках канала (рис. 1г) [10, 11]. Магнитное поле B создается мультиполюсной магнитной системой (МС), состоящей вне лобовых зон из $2P$ линейных участков с током, расположенных над электродами. При $P \geq 2$ такая МС имеет малые по сравнению с традиционной магнитной системой поля рассеяния, что существенно для бортового применения многополюсных МГДГ. Движущийся со скоростью v проводящий газ, взаимодействуя с магнитным полем, приводит к возникновению электрического тока в нагрузке. Внешняя коммутация электродов многополюсного МГДГ постоянного тока и обозначения основных геометрических параметров МГД-каналов с различной конструкцией модулей дана на рис. 1.

Особенности расчета объемных процессов и параметров МГДГ. В дальнейшем рассматриваются сверхзвуковые (числа $M > 1$) режимы работы МГДГ при малых магнитных числах Рейнольдса ($Rm \ll 1$) и конечных параметрах Холла ($\beta \neq 0$). Толщины пограничных слоев на боковых стенках и электродных модулях считаются малыми (дополнительный учет их влияния на параметры генератора проводится отдельно при решении соответствующих электродинамических задач). Трехмерные МГД-процессы в основной зоне генератора описываются уравнениями магнитной газодинамики для идеального невязкого проводящего газа. При малых параметрах МГД-взаимодействия ($s \ll 1$) решение задачи ищется методом

возмущения, путем разложения зависимых переменных в асимптотические ряды по степеням s [11]. При $s \ll 1$ определение полей магнитной индукции \mathbf{B} и плотности тока \mathbf{J} в МГД-канале проводится в кинематическом приближении по заданным параметрам газового потока. Для длинных цилиндрических МГД-каналов ($\lambda = L/r_0 > (4 - 5)$, см. рис. 1) распределение \mathbf{B} и \mathbf{J} вдали от концевых зон находится из независимого решения двух эллиптических задач вида [11]

$$\Delta A_z = 0, \quad \begin{cases} \Delta_{r\phi} \Psi + \Delta_{r\phi} \ln[\sigma/(1 + \beta^2)] \nabla_{r\phi} \Psi = 0, \\ \mathbf{B} = \text{rot}(A_z, i_z), \quad \mathbf{J} = \sigma[\nabla_{r\phi} \Psi + i_z \beta |\nabla_{r\phi} \Psi|]/(1 + \beta^2). \end{cases}$$

Здесь $A(0, 0, A_z)$ и $\Psi = vA - U$ – векторный потенциал магнитного поля и потенциал плотности электрического тока соответственно; U – потенциал электрического поля в МГД-канале; σ и v – электропроводность и скорость газа соответственно.

Объемные возмущения газодинамических параметров при $s \ll 1$ в МГД-каналах находятся по известным значениям \mathbf{B} и \mathbf{J} из соответствующего решения для $M > 1$ неоднородной гиперболической задачи вида [11]

$$\Delta_{r\phi} \chi - (M^2 - 1) \partial^2 \chi / \partial z^2 = f(\mathbf{J}, \mathbf{B}, \bar{r}),$$

$$v_s = -\text{grad}_{r\phi} \chi + \int_0^z (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dz,$$

где χ – потенциал возмущения скорости $v_s(v_r, v_\phi, v_z)$; $f(\mathbf{J}, \mathbf{B}, \bar{r})$ – известная функция от $\mathbf{J}, \mathbf{B}, \bar{r}$, структура которой определяется конструкцией электродных модулей (рис. 1).

Аналитические решения для расчета параметров A_z, Ψ, χ многополюсных МГДГ при $s \ll 1$ даны в [11]. На рис. 2а и 2б представлены результаты расчета типичных распределений функции магнитного потока A_z и потенциала плотности тока Ψ в цилиндрических МГДГ с U -образными электродами. Функция $A_z = \text{const}$ приведена для случая $P = 3$ и 5. Изолинии $\Psi[r, \phi, k_f(1 - k/k_x)] = \text{const}$ построены для $P = 3$, параметра нагрузки $k = 0.5$ и типичных значений коэффициентов снижения тока короткого замыкания k_f и напряжения холостого хода k_x (коэффициенты k_f и k_x учитывают влияние σ и v на Ψ в приэлектродном пограничном слое). Там же на рис. 2в приведены распределения возмущений безразмерной скорости $v_s(v_{sr}, v_{s\phi}, v_{sz})$ в МГДГ с $\lambda = L_k/r_0 = 3$ при различных числах Холла ($\beta = 0$ и $\beta = 1.72$). Расчеты A_z, Ψ и v_s приведены для случая малых поперечных размеров линейных участков МС. Из рис. 2 видно, что распределения A, Ψ и v_s при $P \geq 2$ неоднородны по сечению канала. Процесс МГД-преобразования энергии локализован в периферийной зоне. При $\beta \neq 0$ осесимметричность полей возмущения

скорости v_s нарушается и в МГД-канале формируются поперечные вихри вне течения. Последнее приводит к отклонению возмущенного потока к катодным электродам.

Известно, что идеальные однополюсные МГДГ ($P = 1$) с электродами, расположенными на боковых стенках канала (конструкция типа рис. 1г), при постоянном уровне магнитного потока в межэлектродной зоне обладают более высокими значениями энергетических показателей. Однако их техническая реализация в бортовых энергосиловых установках имеет ряд недостатков. К ним, в первую очередь, относятся: контрактия токов на электродных кромках, большие поля рассеяния МС, большие расходы ионизирующих присадок, возмущения во всем объеме сопла [11]. Как отмечалось выше, свободными от указанных недостатков являются многополюсные МГДГ с U -образными электродами, обеспечивающие диффузионный характер протекания токов в канале, небольшие поля рассеяния и малый расход ионизирующих присадок в зоне эффективного МГД-взаимодействия [6].

Оценку выходных параметров многополюсных МГДГ с $s \leq 1$ в слаборасширяющихся по длине МГД-каналах можно провести на основе усредненных по сечению квазиоднородных безразмерных МГД-уравнений вида [11]

$$\rho v_z F(z) \left(1 - q(z) - \frac{\pi \delta^*}{r_0} \right) = 1, \quad (1)$$

$$\rho v_z \frac{dv_z}{dz} = - \frac{1}{\gamma M^2} \frac{dp}{dz} + s \frac{1}{\lambda} \langle \mathbf{J} \times \mathbf{B} \rangle_z + 2 \left(\frac{C_f}{D_f} + \frac{C_p}{D_p} \right) \rho v_z^2, \quad (2)$$

$$\rho v_z \frac{d}{dz} \left(T + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 v^2 \right) = s M^2 (\gamma - 1) \langle \mathbf{J} \cdot \mathbf{B} \rangle \frac{1}{\lambda} + 2 C_f \frac{\rho v_z}{D_f} (T_* - T_w), \quad (3)$$

$$\frac{d\delta^{**}}{dz} + \frac{\delta^{**}}{\rho} \frac{d\rho}{dz} + (2 + H) \frac{\delta^{**}}{v_z} \frac{dv_z}{dz} = \frac{C_f}{2}, \quad (4)$$

$$p = \rho T, \quad T_* = T + 0.9 \frac{\gamma - 1}{2} M^2 v_z^2,$$

$$r_0 s = \frac{\sigma_3 B_0^2 L_0}{\rho_0 v_0}, \quad \sigma_3 = \frac{\sigma}{1 + \beta^2}.$$

Здесь C_f, C_p – коэффициенты трения в канале и потерь давления на электродных модулях [12, 13]; $D_f = 4F/\Pi, D_p = 4FL/(2P\pi r_0^2)$ – гидравлические диаметры; q – коэффициент затенения потока электродными модулями; δ^* и δ^{**} – соответственно

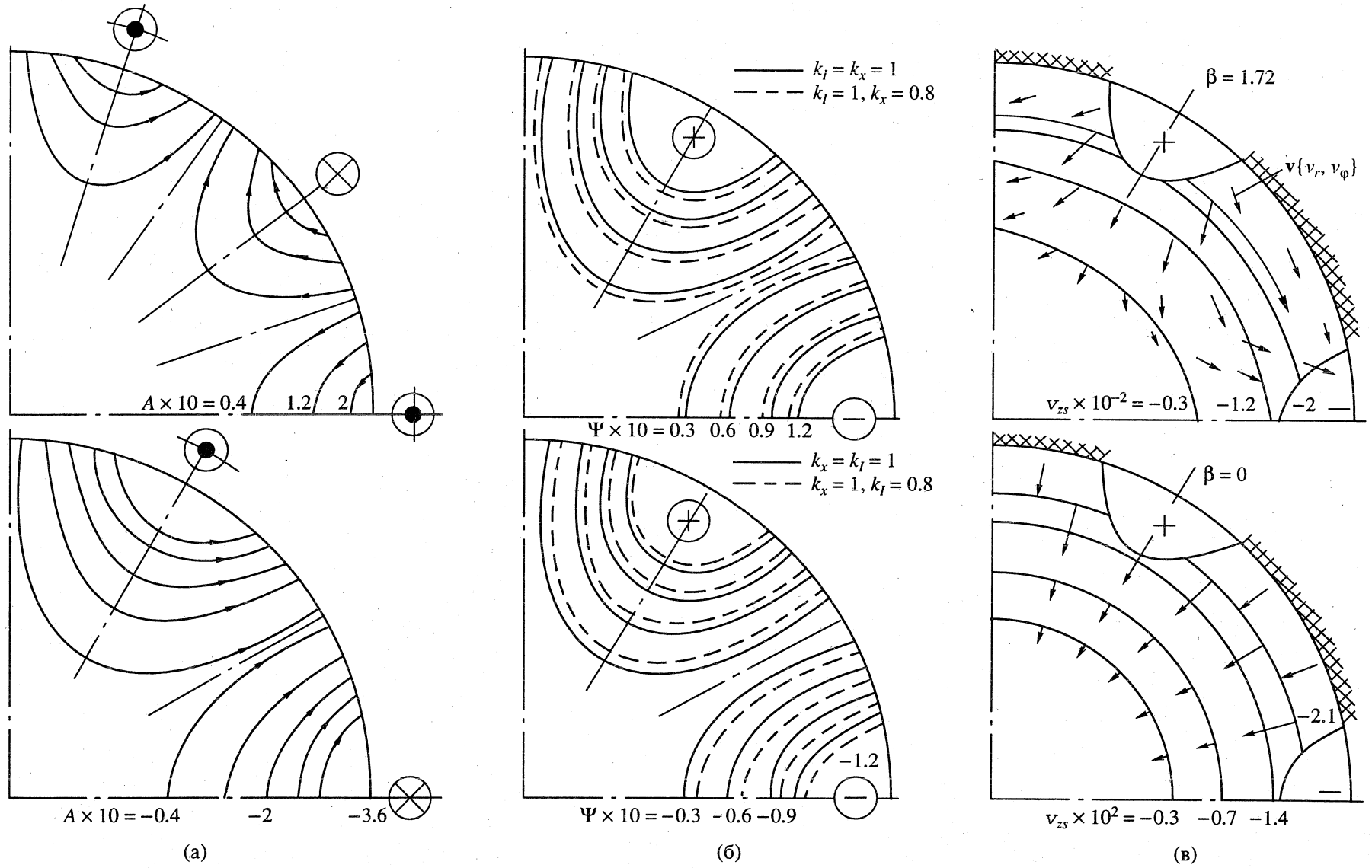


Рис. 2. Распределения по сечению канала функции магнитного потока A (а), потенциала плотности тока Ψ (б) и возмущений скорости $v(v_r, v_\phi, v_z)$ (в).

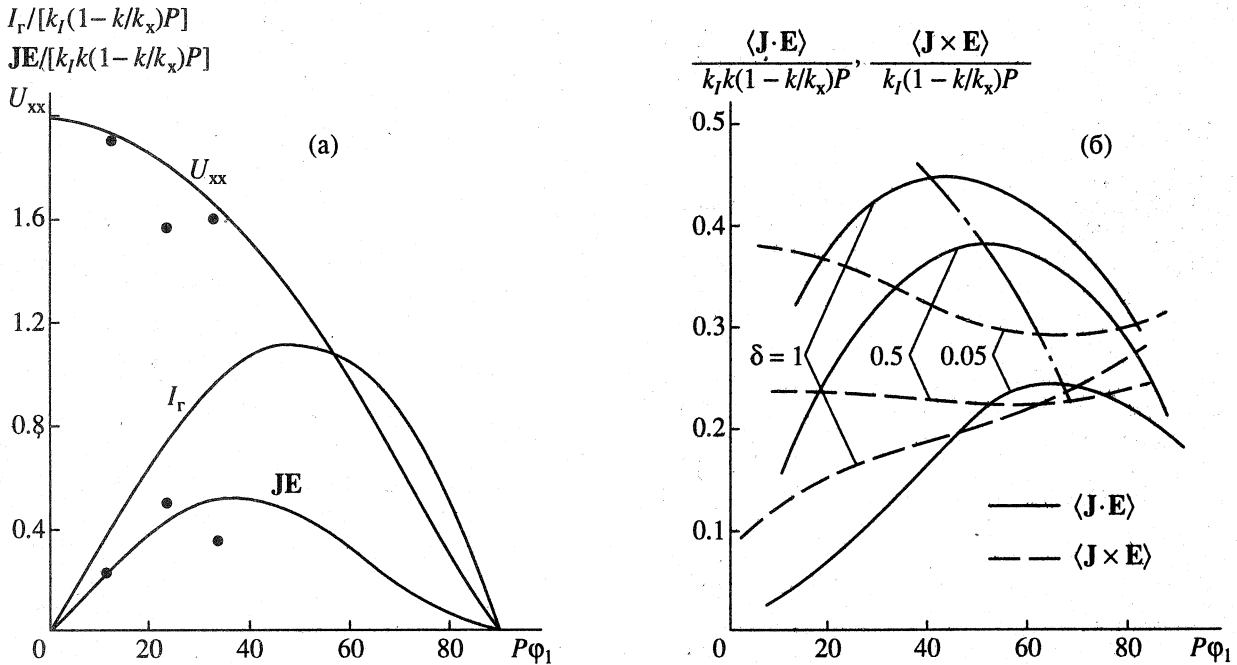


Рис. 3. Зависимости безразмерных усредненных величин $\langle \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \rangle$, $\langle \mathbf{J} \times \mathbf{B} \rangle_z$ тока короткого замыкания I_Γ и напряжения холостого хода U_{xx} от относительных размеров электродных модулей в МГД-каналах с U-образными (а) и сегментными (б) электродами.

толщины вытеснения и потери импульса; γ – коэффициент адиабаты; $\lambda = L/r_0$ – относительная длина МГД-канала; ρ, p, T, v_z – соответственно безразмерные плотность, давление, температура и осевая скорость газового потока; s и M – соответственно параметр МГД-взаимодействия и число Маха, определенные по параметрам газа на входе; $H = \delta^*/\delta^{**}$ – формпараметр пограничного слоя; T_w – температура стенки канала.

В рамках этого подхода коэффициент трения C_f определяется на основе предельных законов трения и теплообмена [12]. Усредненные по сечению удельные электромагнитные силы $\langle \mathbf{J} \times \mathbf{B} \rangle_z$ и электрическая мощность $\langle \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \rangle$ в (1) - (4) находятся из решения двумерных электродинамических задач о поперечном краевом эффекте в цилиндрических многополюсных МГД-каналах [11].

На рис. 3 представлены типичные зависимости величин $\langle \mathbf{J} \times \mathbf{B} \rangle_z$, $\langle \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \rangle$, тока короткого замыкания I_Γ и напряжения холостого хода U_{xx} от размеров электродных модулей r_s МГД-каналов с U-образными (рис. 3а) и сегментными (рис. 3б, здесь $\delta = (\phi_0 - \phi_1)/\phi_0$) электродами. Там же на рис. 3а точками показаны результаты экспериментальных исследований характеристик многополюсных МГД-каналов [14]. Опытные данные получены для $P = 1, 2, 3$ на плазменных МГД-моделях с длиной канала $L_k = 1.75$ м и радиусом $r_0 = 0.6$ м при следующих параметрах аргонового потока: расход $G \sim 2$ г/с, параметр Холла $\beta \sim 1 - 2$, эффективная проводимость в ядре $\sigma_s \sim 50 - 100$ См, параметр МГД-взаимодействия $s \sim 0.1$ [14, 15]. Из рис. 3 видно,

что опытные данные согласуются с теоретическими зависимостями, что позволяет рекомендовать их для расчетов конкретных вариантов ДУ с многополюсным МГДГ.

При заданной геометрии сопла ДУ и $s \ll 1$ приближенные аналитические решения системы (1) - (4) для размерных величин тока I_Γ и мощности N_Γ МГДГ с U-образными электродами имеют вид [11]

$$I_\Gamma = 2\pi P \int_0^{L_k} \left\{ \sigma_s k_l \left(1 - \frac{k}{k_x}\right) v \left(\frac{\mu_0 I_0}{\pi}\right) \left(\frac{r_0}{\rho_s}\right)^P \times \right. \tag{5}$$

$$\left. \times \left(\frac{Pr_s}{r_0}\right) \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{Pr_s}{r_0}\right)^2\right) \right\} dz,$$

$$k(z) = U_0 k_x \left\{ 4 v(z) \left(\frac{\mu_0 I_0}{\pi}\right) \times \right. \tag{6}$$

$$\left. \times \left(\frac{r_0}{\rho_s}\right)^P \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{Pr_s}{r_0}\right)^2\right) \right\}^{-1},$$

$$N = U I_\Gamma(z),$$

$$\langle k \rangle = \frac{u}{u_{xx}} = k_x \int \sigma dz / \left(\int \left(\frac{\sigma}{k(z)}\right) dz \right). \tag{7}$$

Здесь U – напряжение МГДГ; $k(z)$ – локальный коэффициент нагрузки; I_0 – полный ток (намагничивающая сила) секции МС; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ – магнитная проницаемость. Характерные размеры

элементов в поперечном сечении МГДГ показаны на рис. 1.

Соотношения (5) - (7) позволяют рассчитывать выходные характеристики встроенного многополюсного МГДГ при $s \ll 1$ и могут быть использованы в задачах оптимизации параметров энергосилового установок.

Конструктивная схема и параметры ДУ с МГДГ. На рис. 4 представлен вариант выполнения ДУ с встроенным в сопло ЖРД многополюсным МГДГ. Установка работает на компонентах криогенного топлива $H_{2ж} + O_{2ж}$. Легкоионизируемая присадка цезия подается непосредственно в пристеночную зону сопла. Относительный расход цезия $\gamma_c \sim G_c/G_E \sim 0.3/(P+1)$ (здесь G_c и G_E - соответственно расход цезия и топлива в ДУ) выбирается таким образом, чтобы в кольцевой зоне Δ многополюсного МГДГ соответствующей области эффективного МГД-взаимодействия потока ($\Delta \sim r_0/(P+1)$) обеспечивался необходимый уровень ионизации и проводимости [11]. Корпус U-образных охлаждаемых электродных модулей 1 МГДГ выполнен из меди и облицован со стороны высокотемпературного потока сегментами 2 из пирогرافита (см. рис. 4). Крепление омедненных с внутренней поверхности графитовых сегментов к медному корпусу электродов осуществляется с помощью пайки. Отвод тока от электродных модулей производится через медные, изолированные от корпуса трубчатые токовводы 3, через которые осуществляется подача хладагента ($H_{2ж}$). С внешней стороны сопла ДУ электроды одинаковой полярности (через один) соединяются с кольцевыми охлаждаемыми токовводами 4. Для обеспечения электрической изоляции горячие стенки сопла 5 отделены от электродов жаропрочными проставками 6 на основе бетона с наполнителем типа MgO. В межэлектродной зоне стенки сопла по определенной технологии покрываются тонкими электроизолирующими модулями на основе Al_2O_3 . Интенсивное охлаждение сопла окислителем ($O_{2ж}$) обеспечивает дополнительную его защиту от пробоя за счет образования холодного пристеночного пограничного слоя. Мультиполюсная магнитная система состоит из $2P$ рейстрекковых катушек 7 (секций). Каждая секция намотана армированным проводом из сверхчистого алюминия A_{9999} с высокой электропроводностью [15]. Предусмотрено охлаждение секций жидким водородом через систему продольных осевых каналов. Мультиполюсная МС с силовыми элементами размещена на наружной стенке сопла в герметичном сварном корпусе 8. Для снятия силовых нагрузок на МС, возникающих при работе МГДГ, предусмотрено дополнительное крепление корпуса МС к несущей ферме ДУ. Оценки на прочность и жесткость обмотки и бандажных элементов МС проводились по методам, изложенным в [16].

Основные параметры перспективной энергосилового установки с ЖРД и встроенным многополюсным МГДГ приведены в табл. 1. Свойства продуктов сгорания рабочего тела $H_{2ж} + O_{2ж}$ с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 0.8$ и присадкой щелочного металла Cs и удельные показатели ЖРД брались из [17, 18]. Расчеты выходных характеристик МГДГ по (5) - (7) проводились для значений пар полюсов $P = 3, 5$. Значения коэффициентов снижения тока короткого замыкания k_l и холостого хода k_x выбирались соответственно 0.9 [11, 19]. Коэффициент нагрузки $k = 0.75$. В табл. 1 представлены результаты расчетов параметров встроенного МГДГ для двух значений числа пар полюсов $P = 3$ и $P = 5$, МС которых характеризуется слабыми полями рассеяния в дальней зоне. Размеры электродных модулей $\bar{r}_s = r_s/r_0 = 0.05$ выбраны из условий малости потерь удельной тяги ДУ от выступающих в поток электродов по сравнению с потерями от МГД-процессов в сопле ДУ ($r_s \ll r_0 \sqrt{N\lambda^2/kGv^2PC_*}$, где $C_* \approx 1$ [10]). Зависимость выходных параметров при других значениях r_s и P дана на рис. 5.

Анализ полученных расчетных данных (см. табл. 1 и рис. 5) показывает, что предложенный вариант двигательной установки с тягой $P \sim 80.0$ т и многополюсным МГДГ позволяет получить электрическую мощность $N \sim 10$ МВт при небольших потерях тяговых характеристик ($\Delta P/P \sim \Delta P_y/P_y \sim 0.005$). При одинаковом значении намагничивающей силы (полного тока) в секции МС с ростом P при $r_s P < 0.5$ увеличивается полезная мощность генератора и снижается размер кольцевой зоны $\Delta_s \sim r_0/P$, где заметно возмущение газового потока. При том же составе продуктов сгорания увеличение мощности многополюсного МГДГ можно получить при $r_s P < 0.5$, увеличивая размеры электродных модулей. Однако при этом будут возрастать потери тяги ДУ за счет аэродинамических потерь в сопле. Повышение мощности МГДГ, работающего на основе рабочего тела $H_{2ж} + O_{2ж}$ с щелочными присадками, можно получить при использовании дополнительных добавок в топливо порошка алюминия, увеличивающего температуру горения и, следовательно, электропроводность газа в МГД-канале [20].

Предложенная схема с многополюсным МГДГ может использоваться и в энергосиловых установках, работающих на других топливных парах (например, $O_{2ж} +$ керосин с ионизирующими небольшими присадками щелочных металлов ($\sim 1 - 2\%$ калия)). Оценки показывают, что значения эффективной проводимости продуктов сгорания топлив на основе $O_{2ж} +$ керосин с присадками щелочных металлов того же порядка, что и для топлив $O_{2ж} + H_{2ж} + Cs$ [20]. Последнее позволяет заключить, что в этом случае электрическая

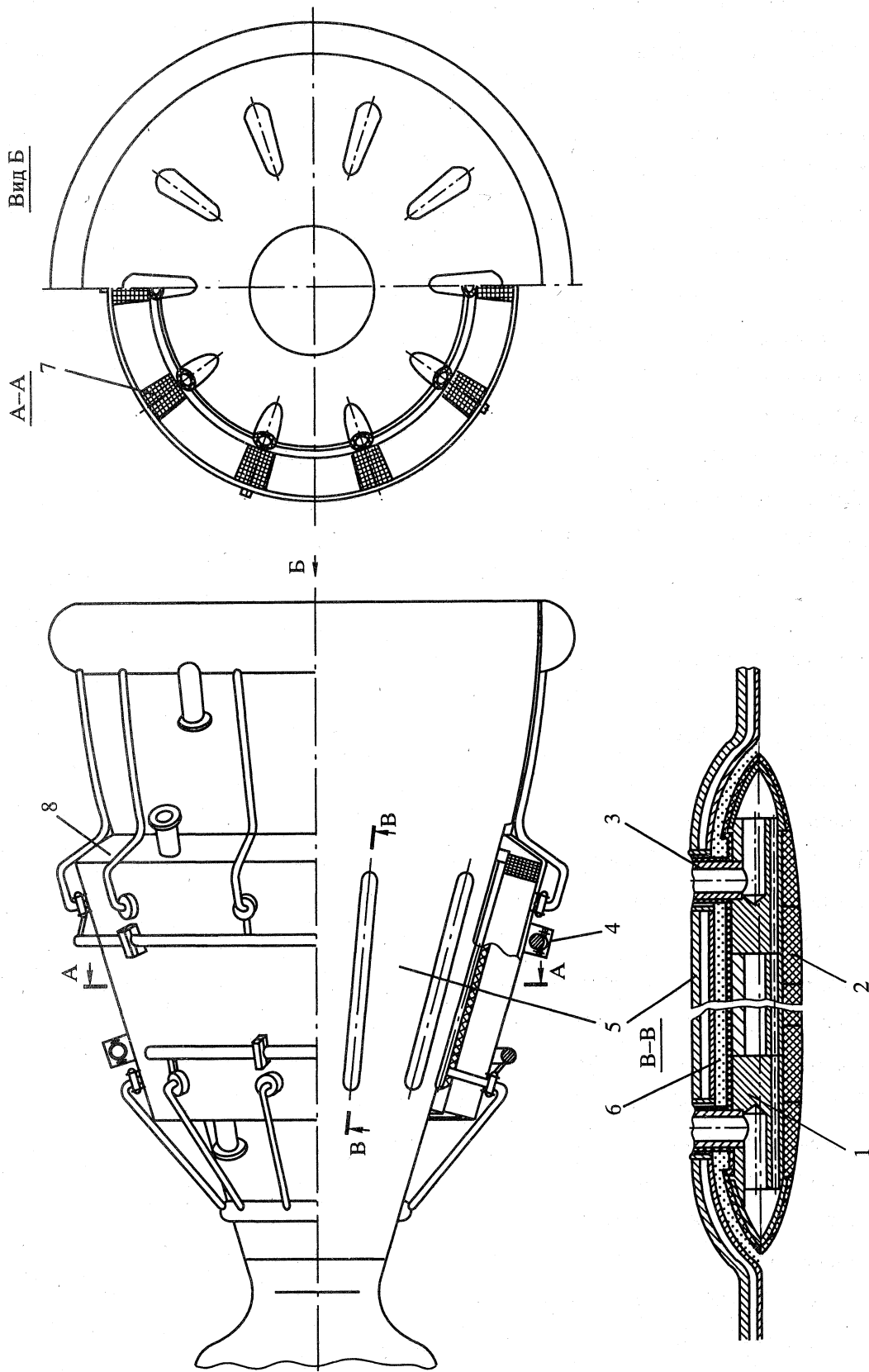


Рис. 4. Конструктивная схема энергосиловой установки с встроенным многопортным МГДГ.

Таблица 1

Параметры энергосиловой установки	Значение	
I. Двигательная установка		
Общий расход рабочего тела, G_{Σ} , кг/с	200	
Расход горючего H_2 /окислителя O_2 , G_H/G_C , кг/с	30/170	
Давление в камере сгорания, p_k , МПа	5	
Температура в камере сгорания, T_k , К	3500	
Степень расширения по давлению, ϵ	100	
Удельная тяга (без МГДГ), P_y , м/с	4125	
Тяга двигателя без учета МГДГ, P_T , т	82.5	
Тепловая мощность ДУ, N , МВт	2000	
II. МГД-канал		
Число Маха на входе, M_k	2.4	
Температура на входе, T_k , К	2600	
Давление на входе, p_k , МПа	0.37	
Проводимость на входе, σ_k , См/м	15.0	
Число пар полюсов, P	3	5
Параметр Холла, β	0.17	0.25
Мощность генератора, N_k , МВт	7.0	10
Напряжение, U , кВ	1.6	1.18
Электрический ток, I , кА	4.45	8.47
III. Магнитная система		
Плотность тока, J_m , МА/м ²	100	
Намагничивающая сила, $I_c = I_w$, МА	0.75	
Число секций, P	3	5
Индукция на внешнем радиусе МГД-канала, B_k , Тл	1	1.5
IV. Массогабаритные параметры ЭУ		
Радиус критического сечения, $R_{кр}$, м	0.175	
Средний радиус МГД-канала, R_k , м	0.45	
Средний радиус МС, R_m , м	0.52	
Радиус сопла на выходе, R_f , м	0.65	
Длина МГД-канала, L_k , м	0.6	
Длина МС, l_m , м	0.75	
Общая длина ЭУ (камера сгорания + сопло), L , м	2.75	
Полная масса МГДГ, γ_m , кг	200	
Удельная масса МГДГ, γ , кг/кВт	0.036	0.02
Потери удельной тяги ДУ + МГДГ, $P_{умгдг}/P_y$	0.004	0.006

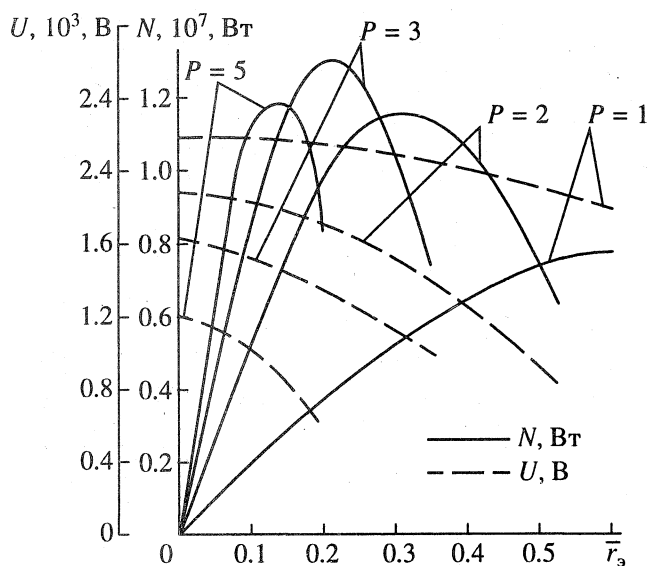


Рис. 5. Зависимость мощности и напряжения многополюсного МГДГ от размеров электродных модулей $r_3 = R_{к\phi}$ и числа пар полюсов P .

мощность многополюсных МГДГ при тех же размерах МГД-канала и намагничивающей силы МС ($B \sim 1.5$ Тл) будет по порядку величины близка к соответствующим расчетным значениям N , приведенным в табл. 1 и на рис. 5. Следует отметить, что в ДУ с МГДГ, работающих на $O_{2ж} +$ керосин, целесообразно использовать сверхпроводниковый вариант МС с предстартовым ее захлаживанием в наземных условиях жидким гелием. Потери жидкого гелия из-за теплопритоков в холодную зону сверхпроводниковой МС на борту ЛА при наличии в системе криостатирования промежуточных экранов, охлаждаемых жидким кислородом, будут относительно невелики (менее 1 л/ч) [4].

Выводы. 1. Предложенный вариант энергосиловой установки с встроенным многополюсным МГДГ позволяет получить электрическую мощность за счет МГД-преобразования части энергии газового потока в периферийной зоне струй ракетного двигателя.

2. Проведен анализ объемных МГД-эффектов и выходных характеристик многополюсного МГДГ с электродными модулями различного конструктивного выполнения. Показано, что теоретические зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными на плазменной модели многополюсного МГД-канала.

3. Разработан вариант конструктивной схемы энергосиловой установки с встроенным в сопло многополюсным МГДГ, работающим на продуктах сгорания криогенного топлива $H_{2ж} + O_{2ж}$ с присадками цезия. Показано, что такая установка обеспечивает получение электрической мощнос-

ти ~ 10 МВт. При этом потери удельной тяги ДУ относительно невелики и составляют величину менее $\sim 1\%$.

4. Предложенный вариант энергосиловой установки со встроенным многополюсным МГДГ может оказаться перспективным при работе установки на других топливных парах (например, кислорода и керосина с присадками калия).

Авторы благодарят Д.А. Бута, У.Г. Пирумова и Р.А. Глиника за внимание к работе и ценные критические замечания и А.Е. Ларионова за помощь в проведении расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spitzer C.R. A New Direction in Energy Conversion. The All-Electric Aircraft // Proc. 20th Intersoc. Energy Conversion Eng. Conf. New York, 1986. V. 1. P. 388.
2. Spitzer C.R. The All Electric Aircrafts. A Systems View and Proposed NASA Research Programs // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. 1984. № 3(20). P. 261.
3. Secunda R.R. Integrated Engine-Generator for Aircraft Secondary Power // AIAA Paper. 1972. V. 1056. P. 1.
4. Kovalev L.K., But D.A., Poltavets V.N., Koneev S.-M.A. Analysis of Thermal Processes in Electrode Walls and Their Influence on the Operation of MHD Installations // 6th Int. Conf. on MHD Electrical Power Generation. USA. 1975.
5. Carabetta R.A., Chambers H.F., Staars Jr.G.F., Owens W.R. An Overview of DOE and SDIO MHD Program Activities at PETS 26th Aerospace Sciences Meeting, Jan. 11 - 14. 1989. Reno. Nevada.
6. Kovalev L.K., Larionoff A.E., Poltavets V.N., Kovalev K.L. Theoretical and Experimental Studies of Faraday Multipole MHD Generators // 11th Int. Conf. on MHD Electrical Power Generation. China. 1992.
7. Marston Charias H. MHD Accelerator Performance Specfield Interaction Parameter // AIAA Journal. 1987. V. 4. № 11.
8. Moder J.P., Blandio J.S., Frazier S.R., Rosa R.J. Lazer Energized MHD Generator for Hypersonic Electric Air-Turbo-rockets // AIAA Paper. 1987. № 1816.
9. Бреев В.В., Губарев А.В., Панченко В.П. Сверхзвуковые МГД-генераторы. М.: Энергоиздат, 1988.
10. Aitov N.L., Zeigarnik V.A., Rikman V.Yu. et al. An Experimental Studies with Disk MHD Channels on Argon Plazma. 32nd SEAM. USA. 1994.
11. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л. Фарадеевские многополюсные магнитогидродинамические генераторы постоянного и переменного тока // Электричество. 1990. № 7.
12. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972. С. 342.

13. *Краснов Н.Ф.* Аэродинамика. Т. 2. М.: Высшая школа, 1980. С. 415.
14. *Ковалев Л.К., Конев С.-М.А., Ларионов А.Е., Царьков В.Д.* Экспериментальное исследование многополюсных фарадеевских МГД-генераторов // Магнитная гидродинамика. 1990. № 4.
15. *Бут Д.А., Глиник Р.А., Кейлин В.Е. и др.* Экспериментальное исследование характеристик гиперпроводящих соленоидов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1982. № 2(10). С. 45.
16. *Bout D.A., Kovalev L.K., Larionoff A.E.* Stressed Deformed State of Superconducting Windings and Ring Girders // 10th Int. Conf. on MHD Generation. Tiruchirappalli. India. 1989. V. 1. P. 6/18.
17. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Т. 2 / Под ред. Глушко В.П. М.: ВИНТИ, 1972.
18. *Дудко Д.Я., Емец Ю.П., Репн И.И.* Состав и электрофизические параметры водородно-кислородной плазмы // ТБГ. 1981. Т. 19. № 4. С. 697.
19. *Ковалев Л.К., Никитин Ю.М., Никитина И.А., Тютин В.К.* Влияние пограничного краевого эффекта на характеристики кондукционного МГД-канала с неоднородным потоком // ТВТ. 1975. Т. 13. № 3. С. 605.
20. *Недоспасов А.В., Побережский Л.П., Чернов Ю.Г.* Состав и свойства рабочих тел МГД-генераторов открытого типа. М.: Наука, 1977. С. 239.