

Таким образом, расчеты показывают, что плазме ПФ может быть передана значительная энергия от взрывного МГД-генератора.

Поступила 7 IV 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bernard A. et al. The dense plasma focus — a high intensity neutron source.— Nuclear Instruments and Methods, 1977, vol. 145, p. 191.
2. Mather J. Methods of Experimental Physics. N. Y., Academic Press, 1971.
3. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., Мир, 1972.
4. Ананин С. И., Вихрев В. В. и др. Согласование взрывомагнитного генератора с плазменным фокусом.— В сб.: Материалы III Всесоюзн. конф. по плазменным ускорителям. Минск, 1975.
5. Агафонов В. И. и др. Исследование нецилиндрического Z-пинча при токах свыше 1 МА.— In: Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Res. Vol. 2. Vienna, 1969.
6. Basque G., Jolas A., Watteau J. P. Comparison of two-dimensional snowplough with experiment.— Phys. Fluids, 1968, vol. 11, N 6.
7. Batler T. D. Coaxial snowplough discharge.— Phys. Fluids, 1969, vol. 12, N 9.
8. Импенник В. С. Двумерные нестационарные численные модели плазмы.— В кн.: Численные методы в физике плазмы. М., Наука, 1977.
9. Вихрев В. В. Согласование разрядного контура с движением оболочки в нецилиндрическом Z-пинче.— ПМТФ, 1973, № 2.

УДК 538.4 : 629.12

### О ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ МОРСКОГО МГД-ДВИЖИТЕЛЯ

А. П. Васильев, И. М. Курко

(Оренбург, Пермь)

В литературе [1—3] последних лет появился ряд работ, посвященных проблеме создания кондукционных МГД-двигателей на морской воде. Однако в них не рассматривались важные с точки зрения эффективности МГД-двигателей режимы работы с наибольшим КПД.

В данной работе рассмотрены основные физические особенности рабочих процессов кондукционных МГД-двигателей, найдены оптимальные режимы их работы, приводятся результаты инженерного расчета эффективности кондукционных МГД-двигателей, показывающие высокую экономичность подобных МГД-машин.

Морским МГД-двигателем называется прямоточный гидрореактивный МГД-двигатель, установленный для перемещения на транспортном объекте и использующий в качестве электропроводного тела морскую воду.

Так как морская вода имеет электропроводность  $\sigma \sim 4-6 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ , т. е. в  $10^5-10^6$  раз меньше, чем электропроводность жидких металлов, то реальным видом МГД-двигателей могут быть только кондукционные МГД-двигатели.

В дальнейшем всюду используется термин «МГД-двигатель», если сущность рассматриваемых вопросов зависит только от внутриканальных процессов, и — «МГД-двигатель», если учитываются условия его перемещения.

Основным параметром реактивного МГД-двигателя является тяга, под которой понимают главный вектор объемных и поверхностных сил, действующих на элементы его конструкции со стороны внешнего и внутреннего потоков (фиг. 1).

Определенная таким образом тяга МГД-двигателя называется эффективной, и для нее можно записать выражение

$$(1) \quad \mathbf{R}_0 = - \int_{V^*} \mathbf{j} \times \mathbf{B} dV - \int_{\Sigma^*} p_n d\Sigma - \int_{\Sigma_*} \pi_n d\Sigma,$$

где  $\Sigma^*$  и  $\Sigma_*$  — соответственно внутренний и внешний обводы МГД-двигателя;  $V^*$  — рабочий объем канала, ограниченный поверхностью  $\Sigma^*$  и сечениями  $a-a$  и  $2-2$ .

В дальнейшем принято, что магнитные потоки замкнуты внутри объема  $V^* + V_*$ , где  $V_*$  — объем конструкции МГД-двигателя, ограниченный поверхностями  $\Sigma^*$  и  $\Sigma_*$ .

В выражении (1) приняты следующие обозначения:  $p_n$  и  $\pi_n$  — соответственно плотность поверхностных сил во внутреннем и внешнем потоках,  $j$  — плотность тока,  $B$  — индукция магнитного поля,  $n$  — внешняя нормаль к соответствующей поверхности.

Согласно третьему закону Ньютона,  $-R_0$  представляет собой главный вектор объемных и поверхностных сил, действующих со стороны МГД-двигателя на внешний и внутренний потоки.

В выражение (1) входят внешние силы сопротивления, зависящие от компоновки МГД-двигателя с транспортным объектом. По этой причине принято рассматривать изолированный реактивный двигатель [1, 3], в котором эти силы сопротивления равны нулю. Для этого полагают, что внешнее обтекание двигателя является обратимым, а тягу изолированного двигателя называют внутренней.

Получим расчетное соотношение для внутренней тяги  $R$  реактивного МГД-двигателя. Для этого при установившемся режиме его работы применим к объему морской воды  $V$  (см. фиг. 1), ограниченному поверхностью трубки тока  $\Sigma = \Sigma_0 + \Sigma^* + S_1 + S_2$ , уравнение импульсов [4]

$$(2) \quad \int_{\Sigma} \rho v_n v d\Sigma = \int_V j \times B dV + \int_{\Sigma} p_n d\Sigma,$$

где  $\rho$  — плотность морской воды.

Полагая, что в сечениях  $1-1$  и  $2-2$  скорости потока однородны, а внутренние напряжения сводятся к давлениям, т. е.  $p_n = -pn$ , и учитывая, что в соответствии с принятыми выше допущениями  $\int_{V-V^*} j \times B dV = 0$ ,

а для внешнего потока верно равенство  $\pi_n = -p_0n$ , где  $p_0$  — давление окружающей среды (изменением гидростатического давления пренебрегаем), из (1), (2) путем несложных преобразований получим искомое выражение для вектора внутренней тяги  $R$  реактивного МГД-двигателя

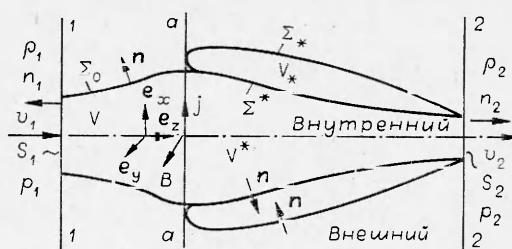
$$(3) \quad R = - \int_{S_1+S_2} (p_n + np_0 - \rho v_n v) d\Sigma = (p_1 - p_0 + \rho_1 v_1^2) S_1 \frac{v_1}{v_1} - \\ - (p_2 - p_0 + \rho_2 v_2^2) S_2 \frac{v_2}{v_2},$$

где  $n_1 = -v_1/v_1$ ;  $n_2 = v_2/v_2$ .

Учитывая теперь, что давление в невозмущенном набегающем потоке  $p_1 = p_0$ , и принимая, что давление в струе на срезе сопла  $p_2 = p_0$ , из (3) получим используемую в дальнейшем формулу тяги реактивного МГД-двигателя [1-4]

$$(4) \quad R = G(v_2 - v_1),$$

где  $G = \rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2$  — массовый расход морской воды через канал МГД-двигателя;  $v_1$  и  $v_2$  — соответственно скорость невозмущенного на-



Ф и г. 1

бегающего потока (скорость перемещения транспортного объекта) и скорость струи на срезе сопла относительно системы координат, жестко связанной с МГД-двигателем.

Рассмотрим теперь показатели энергетической эффективности пропульсивной установки. Полный КПД МГД-двигателя определится отношением тяговой мощности к подведенной электрической

$$\eta_0 = Rv_1 \left( \int_{V_+} \mathbf{j} \mathbf{E} dV \right)^{-1},$$

где  $V_+$  — объем, включающий активную и концевые зоны канала МГД-двигателя.

Пропульсивный или тяговый механический КПД МГД-двигателя равен отношению тяговой мощности к произведенной двигателем механической

$$\eta_1 = Rv_1 \left( \int_{\Sigma} \rho \frac{v^2}{2} v_n d\Sigma \right)^{-1} = Rv_1 \left[ G \left( \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) \right]^{-1} = \frac{2}{1 + v_2/v_1}.$$

Здесь было принято во внимание соотношение (4) и условие равенства давлений в сечениях  $S_1$  и  $S_2$ .

Электрический КПД МГД-двигателя характеризуется отношением электромагнитной мощности в активной зоне МГД-канала к подведенной электрической

$$(5) \quad \eta_2 = \int_{V_a} \mathbf{v} (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) dV \left( \int_{V_+} \mathbf{j} \mathbf{E} dV \right)^{-1},$$

где  $V_a$  — объем активной зоны канала МГД-двигателя.

Гидравлический КПД МГД-двигателя равен отношению механической мощности к электромагнитной, т. е.

$$\eta_3 = \int_{\Sigma} \rho \frac{v^2}{2} v_n d\Sigma \left( \int_{V_a} \mathbf{v} (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) dV \right)^{-1}.$$

Очевидно, что имеет место тождество

$$(6) \quad \eta_0 = \eta_1 \eta_2 \eta_3.$$

Гидравлический КПД, характеризующий совершенство проточной части МГД-двигателя, в дальнейшем удобно использовать в виде

$$(7) \quad \eta_3 = \frac{v_1 + v_2}{\langle v \rangle} R \left( \int_{V_a} \mathbf{e}_z (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) dV \right)^{-1},$$

где  $\langle v \rangle$  — средняя скорость морской воды в канале МГД-двигателя, определяемая равенством

$$\int_{V_a} \mathbf{v} (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) dV = \langle v \rangle \int_{V_a} \mathbf{e}_z (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) dV.$$

Электрический КПД  $\eta_2$  учитывает различные причины потерь энергии: джоулеву диссипацию в активной и концевых зонах МГД-канала [5], а также дополнительную джоулеву диссипацию на двухфазных приэлектродных пузырьковых слоях, обусловленных электролизом морской воды и приводящих к эффектам химической поляризации электродов.

Введение понятия идеального морского МГД-двигателя, в котором отсутствуют процесс электролиза морской воды и диссипация электрической энергии вне объема  $V_a$ , дает возможность раздельного рассмотрения этих причин потерь энергии.

Для этого запишем электрический КПД (5) в виде произведения

$$(8) \quad \eta_2 = \frac{\int_{V_a} \mathbf{v} (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) dV}{\int_{V_a} (\mathbf{jE})_0 dV} \frac{\int_{V_a} (\mathbf{jE})_0 dV}{\int_{V_a} \mathbf{jE} dV} \frac{\int_{V_a} \mathbf{jE} dV}{\int_{V_+} \mathbf{jE} dV},$$

где

$$(9) \quad \eta_2 = \int_{V_a} \mathbf{v} (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) dV \left( \int_{V_a} (\mathbf{jE})_0 dV \right)^{-1}$$

— электрический КПД идеального морского МГД-двигателя;  $(\mathbf{jE})_0$  — плотность электрической мощности в его канале. Второй сомножитель в (8)

$$(10) \quad \eta_3 = \int_{V_a} (\mathbf{jE})_0 dV \left( \int_{V_a} \mathbf{jE} dV \right)^{-1}$$

учитывает потери электрической мощности в активной зоне МГД-канала, обусловленные газовыделением на электродах, и может быть назван электрохимическим КПД морского МГД-двигателя.

Третий сомножитель в выражении (8)

$$(11) \quad \eta_4 = \int_{V_a} \mathbf{jE} dV \left( \int_{V_+} \mathbf{jE} dV \right)^{-1}$$

отображает влияние джоулевой диссипации в концевых зонах канала МГД-двигателя на его эффективность.

Полный КПД МГД-двигателя  $\eta_0$  с учетом выражений (6) и (8)—(11) может быть записан в виде произведения

$$\eta_0 = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5.$$

Сравнение же эффективности МГД-двигателя с другими типами пропульсивных установок, например с гребным винтом, следует проводить по величине

$$(12) \quad \eta = \frac{\eta_0}{\eta_1} = \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5,$$

которая может быть названа полным КПД МГД-двигателя или внутренним КПД МГД-двигателя.

Из литературы [3] известны две инженерные схемы МГД-двигателя: с изоскоростным и с изобарным МГД-каналами. Эти схемы позволяют оценить предельные возможности реактивных МГД-двигателей по КПД и удельной тяге.

Следует отметить, что изобарный вариант МГД-двигателя имеет ряд преимуществ перед изоскоростным. К ним можно отнести разгруженность стенок канала, простоту ликвидации пузырьковых приэлектродных слоев жидкости, а также отсутствие эффектов выталкивания газовых пузырьков [6—8] против основного потока, которые в изоскоростном канале в некоторых случаях могут приводить к заклиниванию водозаборника МГД-двигателя и срыву устойчивой его работы.

Рассмотрим изобарный МГД-двигатель с длиной канала  $h$ . Пусть расстояние между электродами будет  $a(z)$ , где  $z$  — продольная координата канала, а между изоляционными стенками  $l = \text{const}$ . Представляет интерес приближенно определить профиль канала, обеспечивающий  $\partial p / \partial z = 0$ , при условии  $B(z) = B = \text{const}$ ,  $\text{Re}_m \ll 1$  и  $\rho = \text{const}$ .

Совместное рассмотрение уравнения импульсов в гидравлическом приближении

$$\rho v \frac{dv}{dz} = j(z) B - \frac{\lambda_m}{D} \rho \frac{v^2}{2},$$

где  $\lambda_m$  — коэффициент гидравлического трения;  $D$  — гидравлический диаметр канала, и выражения для плотности электромагнитной силы

$$j(z)B = \frac{\sigma}{a(z)}(U - a_1 v_1 B)B,$$

где  $U$  — разность потенциалов между электродами;  $a_1 = a(0)$ ;  $v_1 = v(0)$ , причем положено, что  $a(0) - a(h) \ll a(h)$ , а также условий неразрывности потока и однозначности приводит к выражению

$$(13) \quad z^0 = -\frac{1}{f^0} \frac{1}{\alpha - \beta} \ln \left| \frac{1 - \beta}{a^0 - \beta} \frac{a^0 - \alpha}{1 - \alpha} \right|,$$

из которого может быть определен искомый профиль изобарного МГД-двигателя. В (13) приняты следующие обозначения:

$$z^0 = \frac{z}{a_1}, \quad f^0 = (\rho v_1^2)^{-1} \sigma (U - a_1 v_1 B) B, \quad a^0 = \frac{a(z)}{a_1},$$

а  $\alpha$  и  $\beta$  — корни уравнения

$$(a^0)^2 - \frac{\lambda_m}{4} \frac{m}{f^0} a^0 - \frac{\lambda_m}{4f^0} = 0,$$

где  $m = a_1/l$ .

Гидравлическое приближение может вызвать вопрос о его достаточности в расчете МГД-двигателя. В связи с этим необходимо отметить, что МГД-двигатели предполагается использовать при больших скоростях перемещения транспортных объектов и для высокого уровня тяг. В этом случае движение жидкости в МГД-канале происходит с большими числами Рейнольдса ( $\sim 10^7 - 10^8$ ), при которых максимальная скорость в любом поперечном сечении канала мало отличается от средней.

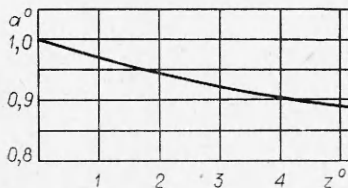
На фиг. 2 изображен профиль изобарного канала МГД-двигателя, рассчитанный по соотношению (13) при следующих исходных данных:  $v_1 = 20$  м/с,  $\lambda_m = 7,13 \cdot 10^{-3}$ ,  $a_1 = 3,85$  м,  $U \simeq 10^3$  В,  $\sigma = 5$  (Ом·м) $^{-1}$ ,  $B = 10$  Т,  $m = 4$ . График показывает, что кривизна линий тока жидкости в канале двигателя мала, а также мал образуемый ими угол, т. е. поток в канале МГД-двигателя является плавно изменяющимся и его можно рассматривать как одномерный.

Несомненный интерес представляет режим работы МГД-двигателя с наибольшим КПД  $\eta$ . Этот режим может быть найден в результате решения следующей задачи: при известных физических постоянных морской воды  $\sigma$  и  $\rho$  и при заданных величинах  $R$ ,  $v_1$ ,  $m$ ,  $B$  и  $h$  определить геометрию канала МГД-двигателя, его электрические параметры и параметры эффективности, при которых МГД-двигатель будет работать в режиме наибольшего КПД  $\eta$ .

Для отыскания этого режима введем в рассмотрение величину  $\Theta$ , дополняющую электрический КПД идеального МГД-двигателя  $\eta_2$  до единицы, т. е.

$$(14) \quad \eta_2 + \Theta = 1.$$

Следует отметить, что в насосном режиме кондукционной МГД-машины  $\Theta = s > 0$  (скольжение), а в генераторном —  $\Theta = s/(s - 1)$ ,  $s < 0$ . Удобство этого обозначения заключается в упрощении выражений при работе МГД-двигателя в генераторном режиме, например при торможении судна.



Ф и г. 2

В изобарном канале при отсутствии входного и выходного патрубков  $\langle v \rangle \approx 0,5(v_1 + v_2)$ . Тогда из (7) гидравлический КПД  $\eta_3$  может быть преобразован к виду

$$(15) \quad \eta_3 = \frac{\rho v_1}{\sigma h B^2} \frac{1 - \Theta}{\Theta} (k - 1),$$

где  $k = v_2/v_1$  определяется из магнитогидродинамической модификации уравнения Бернулли

$$k = \frac{4 - \zeta_\Sigma}{4 + \zeta_\Sigma} + \frac{4}{4 + \zeta_\Sigma} \frac{\sigma h B^2}{\rho v_1} \frac{\Theta}{1 - \Theta}.$$

Здесь  $\zeta_\Sigma$  — суммарный коэффициент гидравлического сопротивления канала МГД-двигателя, который наряду с обычными гидравлическими потерями в проточной части двигателя учитывает также потери механической мощности струи, обусловленные ее входом и выходом из зоны однородного магнитного поля. Коэффициент  $\zeta$ , учитывающий эти потери, может быть найден из решения задачи о джоулевых потерях в концевых зонах канала [5] в виде

$$(16) \quad (1/2)\zeta = \psi(\infty)\sigma a B^2/\rho v,$$

где  $a$  — расстояние между электродами, причем скорость струи считается однородной, а коэффициент  $1/2$  учитывает наличие двух зон.

Потери же энергии, обусловленные продольным концевым эффектом, могут быть определены в результате решения модельной задачи об эффективном внутреннем сопротивлении канала и вычисления значения геометрической функции  $\Phi$  [5], которой в дальнейшем удобно поставить в соответствие геометрическую проводимость продольного концевого эффекта  $C$  по выражению  $\Phi = (h/a)(C + 1)$ .

Простое предположение о независимости  $C$  от скольжения позволяет записать (11) в виде

$$(17) \quad \eta_4 = \Theta/(\Theta + C).$$

Полный КПД МГД-двигателя (12) с учетом (14), (15) и (17) примет удобный для исследования вид

$$(18) \quad \eta = \frac{4}{4 + \zeta_\Sigma} \Theta \frac{1 - \Theta}{\Theta + C} \left(1 - K \frac{1 - \Theta}{\Theta}\right) \eta_3,$$

где  $K = \frac{4}{2} \frac{\zeta_\Sigma \rho v_1}{\sigma h B^2}$  — параметр изобарного МГД-двигателя.

На электрохимический КПД  $\eta_5$  существенное влияние оказывает величина плотности тока  $j$ , с увеличением которой повышается объемное содержание газа в пузырьковом приэлектродном слое и уменьшается эффективная электропроводность двухфазной морской воды.

Если рассмотреть аналогию между процессами пузырькового кипения жидкости при вынужденной конвекции и газовыделением на платиновых электродах морского МГД-двигателя, то из формулы (18.4) работы [9] с использованием законов электролиза Фарадея можно получить следующую оценку для предельно допустимой плотности тока в МГД-двигателе:

$$(19) \quad j_{*i} = 4 \frac{F}{\mu_i} c_{f0} \Phi_* (1 - \Phi_*) \sqrt{\rho \rho_i w_0},$$

где индекс  $i$  указывает на принадлежность величин к аноду или катоду МГД-двигателя;  $F$  — число Фарадея;  $\mu_i$  — молекулярный вес соответствующего газа (хлор на аноде, водород на катоде);  $c_{f0}$  — коэффициент трения при  $j = 0$ ;  $\Phi_*$  — критическое содержание газа в пузырьковом

потоке;  $\rho_i$  — плотность соответствующего газа;  $w_0$  — объемная скорость жидкой фазы, отнесенная к полному сечению канала МГД-двигателя.

Условие плотнейшей упаковки сферических пузырьков в жидкости приводит к значению  $\varphi_* = \pi/6$ .

Расчет  $j_{*i}$  по выражению (19) показывает, что ее значение в  $10^3$ — $10^4$  раз больше, чем плотность тока, ожидаемая в реальных системах. Основываясь на этой оценке, можно считать, что при  $j \ll j_{*i}$  электрохимический КПД  $\eta_5 \approx 1$ .

Следует также отметить, что на подавление эффектов газовыделения в морском МГД-двигателе существенное влияние оказывает повышение давления окружающей среды.

Учитывая сделанные замечания, можно показать, что наибольшее значение  $\eta$  (18) достигается при

$$(20) \quad \Theta_{\text{opt}} = \sqrt{C^2 + \frac{K(1+2C)+C}{K+1}} - C.$$

Аналогичный метод исследования может быть применен и для нахождения оптимального режима работы МГД-двигателя и с изоскоростным каналом. В этом случае оптимальный режим работы двигателя дается выражением

$$(21) \quad \Theta_{\text{opt}} = \sqrt{C^2 + \frac{Q(1+2C)+C}{Q+1}} - C,$$

$$\text{где} \quad Q = \frac{1}{2} \frac{\zeta_{\Sigma} \rho v}{\sigma h B^2}$$

— параметр изоскоростного МГД-двигателя;  $v$  — скорость морской воды в его канале.

Соотношения (20), (21) могут быть положены в основу инженерного расчета соответствующих схем реактивных МГД-двигателей. Рассмотрим вкратце последовательность этого расчета с использованием (20). Предварительно отметим, что коэффициент гидравлического сопротивления МГД-канала в начале расчета не известен и должен уточняться в результате последовательных приближений. В первом приближении задаем значение  $\zeta_{\Sigma}^{(1)}$  и по исходным данным вычисляем параметр изобарного МГД-двигателя  $K^{(1)}$ . Далее принимаем, что в первом приближении  $C^{(1)} = 0$ , и по (20) определяем  $\Theta_{\text{opt}}^{(1)}$ . По величинам  $\zeta_{\Sigma}^{(1)}$ ,  $K^{(1)}$ ,  $\Theta_{\text{opt}}^{(1)}$  из модифицированного уравнения Бернулли вычисляем приведенную скорость истечения  $k^{(1)} = v_2/v_1$  в предположении, что скорость воды на входе в канал двигателя равна скорости перемещения судна  $v_1$ . По формуле тяги (4) при известной  $k^{(1)}$  находится площадь поперечного сечения канала на входе

$$S_1 = \frac{R}{\rho v_1^2 (k-1)}.$$

Величины  $S_1$  и  $m$  позволяют определить размеры МГД-канала  $a$  и  $l$  на входе, а уравнение неразрывности при  $l = \text{const}$  и  $k^{(1)}$  — геометрию канала на выходе. Заметим, что профиль канала после уточнения всех величин может строиться по (13). Далее по эмпирическим гидравлическим формулам с учетом наличия поперечного магнитного поля вычисляем коэффициент гидравлического сопротивления на трение, коэффициент сопротивления (16) и суммарный коэффициент сопротивления канала МГД-двигателя. Пренебрегая кривизной канала по его размерам в среднем сечении с использованием решений работы [5], вычисляем геометрическую функцию и геометрическую проводимость продольного эффекта  $C^{(2)}$ . Затем расчеты повторяются для уточнения  $\zeta_{\Sigma}$  и  $C$  и всех величин, зависящих от них. Как показывает практика вычислений,



для этого достаточно провести 2—3 приближения. После этого из (14) с учетом закона Ома получим среднюю плотность тока

$$\langle j \rangle = \frac{1}{2}(k + 1) \frac{\Theta_{\text{opt}}}{1 - \Theta_{\text{opt}}} \sigma v_1 B$$

и ток через активную зону канала МГД-двигателя

$$I_0 = \sigma U \Theta_{\text{opt}} l \int_0^h \frac{dz}{a(z)} \approx \langle j \rangle lh.$$

По выражению (17) определяется полный ток через МГД-двигатель

$$(22) \quad I = I_0 \left( 1 + \frac{C}{\Theta_{\text{opt}}} \right).$$

Напряжение на электродах МГД-двигателя находим по величине  $\Theta_{\text{opt}}$  из выражения

$$(23) \quad U = \frac{a_1 v_1 B}{1 - \Theta_{\text{opt}}}.$$

Электрическая мощность  $N$  для питания МГД-двигателя определяется произведением выражений (22), (23) и имеет вид

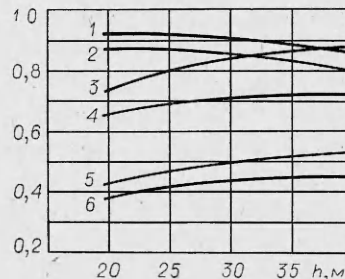
$$N = \frac{a_1 v_1 B I_0}{1 - \Theta_{\text{opt}}} \left( 1 + \frac{C}{\Theta_{\text{opt}}} \right).$$

Отметим, что управляющими параметрами, влияющими на величину  $\Theta_{\text{opt}}$ , являются геометрия канала МГД-двигателя, в частности высота электродов, и электрические параметры  $I$  или  $U$ , посредством которых обеспечивается оптимальное значение  $\Theta$  для двигателя с конкретным набором исходных данных:  $R, \sigma, h, v_1, m, \rho$ .

Расчет реактивного МГД-двигателя при другом наборе исходных данных, например при заданной геометрии двигателя найти тягу в оптимальном режиме работы, видоизменяется, по принципиально не отличается от изложенного.

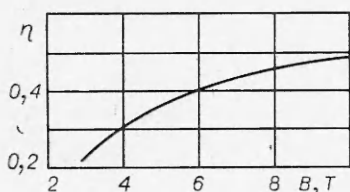
На фиг. 3 представлены результаты расчета морского МГД-двигателя с изобарным каналом. Исходными данными были следующие величины:  $R = 100$  т,  $v_1 = 20$  м/с,  $\sigma = 5$  (Ом·м)<sup>-1</sup>,  $B = 10$  Т,  $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. В расчете варьировалась длина канала  $h$ , в зависимости от которой рассчитывались величины:  $\eta_1$  — кривая 1,  $\eta_2$ —2,  $\eta_3$ —3,  $\eta_4$ —4,  $\eta_5$ —5,  $\eta_6$ —6. Расчет конечных потерь осуществлялся по формулам работы [5]. Непроводящие перегородки в канале отсутствовали. Из графиков видно, что с увеличением длины канала двигателя его КПД  $\eta$  увеличивается и достигает значения 50%. Повышение  $\eta$  можно объяснить снижением «концевых» потерь с увеличением длины канала  $h$ . Было бы ошибкой считать, что сокращение длины канала  $h$  приведет к уменьшению габаритов сверхпроводящей магнитной системы, поскольку с уменьшением  $h$  увеличится площадь поперечного сечения канала МГД-двигателя при постоянной его тяге.

На фиг. 4 показана зависимость  $\eta$  от индукции магнитного поля  $B$ . Исходные данные в этом расчете были такими же, как в предыдущем примере, а  $h = 30$  м. График показывает, что с увеличением индукции поля  $B$  КПД МГД-двигателя монотонно возрастает. Кроме того, из фиг. 4 следует, что при  $B \leq 4$  Т проектирование морских МГД-

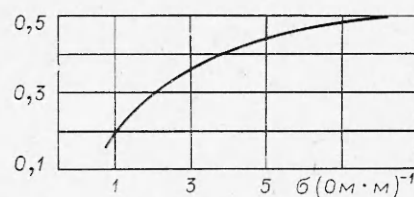


Ф и г. 3





Фиг. 4



Фиг. 5

двигателей становится нецелесообразным из-за низкого КПД. Следует также отметить, что с уменьшением  $B$  при заданной тяге  $R$  существенно увеличиваются габариты МГД-канала.

На фиг. 5 изображена зависимость  $\eta$  изоскоростного варианта МГД-двигателя от электропроводности морской воды. Исходные данные принимались равными:  $R = 100$  т,  $h = 30$  м,  $v_1 = 20$  м/с,  $v = 25$  м/с,  $B = 10$  Т,  $a = l = 2,32$  м, причем геометрия канала была оптимальной для электропроводности  $\sigma = 5$  (Ом·м)<sup>-1</sup>. Из фиг. 5 видно, что с уменьшением электропроводности морской воды, например в северных морях, эксплуатация МГД-двигателей, спроектированных для южных морей, становится нецелесообразной из-за резкого снижения КПД. Наоборот, использование МГД-двигателей, спроектированных для северных морей, в водах с большой электропроводностью будет приводить к повышению их КПД.

В рамках гидравлического приближения при малых числах  $Re_m$  решена вариационная задача по оптимизации режимов работы морского МГД-двигателя. Проведенные расчеты эффективности МГД-двигателей подтверждают тезис о перспективе создания подобных систем.

Поступила 13 III 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Л. Г., Хожанов А. И. Магнитная гидродинамика в судовой технике. Л., Судостроение, 1967.
2. Dorax R. A. Magnetohydrodynamic ship propulsion using superconducting magnets. — Soc. of Naval Architects and Marine Eng. Trans., 1963, vol. 71.
3. Башкатов В. А., Орлов П. П., Федосов М. И. Гидрореактивные пропульсивные установки. Л., Судостроение, 1977.
4. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1, 2. М., Наука, 1970.
5. Ватажин А. Б., Любимов Г. А., Регирер С. А. Магнитогидродинамические течения в каналах. М., Наука, 1970.
6. Попов В. И. Коэффициент электромагнитного выталкивания частиц двухфазных проводящих диамагнитных систем. — Магнитн. гидродинамика, 1978, № 3.
7. Kolin A. An electromagnetokinetic phenomenon involving migration of neutral particles. — Science, 1953, vol. 117, Febr. 6.
8. Кирко И. М. МГД-машина как сепаратор для непроводящих включений в жидком металле. — В кн.: Применение магнитной гидродинамики в металлургии. Свердловск, изд. УНЦ АН СССР, 1977.
9. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Новосибирск, Наука, 1970.