

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО РЫБОЛОВСТВУ**

Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет

Н.Ф. Емельянов

**СУДОВЫЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ
(МГД) ДВИЖИТЕЛИ**

(принципиально новый тип судовых установок электродвижения
с безвинтовым двигателем)

Учебное пособие

Владивосток 2000 г.

УДК 629.12.073

ББК 39.42-01

Е 601

Утверждено ученым советом Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета

Рецензенты:

к. т. н., доцент, заместитель начальника ДВГМА по научной работе
Огай С.А.;

к. т. н., профессор кафедры механики твердого деформируемого тела ДВГТУ Субботницкий В.В.;

к. т. н., доцент, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика судов» Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета Молочков В. Я.

ББК 39.42-01

Е 601 Емельянов Н. Ф. Судовые магнетогидродинамические (МГД) двигатели: Уч. пос. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2000, 23 с.

В работе, адресованной широкому кругу студентов и инженеров, связанных с судостроением и судоходством, рассматривается проблема прямого преобразования электрической энергии в энергию движения судна с помощью водопроточного гидрореактивного МГД-двигателя.

На основании краткого анализа приближенных уравнений сформулированы условия, выполнение которых обуславливает возможность практической реализации принципиально новой конструкции безвинтового двигателя на морских судах.

Для уяснения вопросов конструирования сверхпроводящих магнитных систем пропульсивных установок кратко рассмотрены свойства сверхпроводящих материалов и проводов, условия изготовления обмоток электромагнитов из них, криостатических устройств и вариантов расположения МГД-двигателей на судне.

Ил. 5, список лит. – 6 назв.

© Емельянов Н. Ф., 2000 г.

© Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2000 г.

Введение

Учитывая то обстоятельство, что основной движитель современных судов – гребной винт имеет ряд неустранимых недостатков, в пособии обращается внимание на безвинтовые гидрореактивные судовые электромагнитные пропульсивные установки, осуществляющие прямое преобразование тепловой энергии в электродвиговую и объединяющие в своей конструкции функции гребного электродвигателя и винта.

На основании краткого анализа известной приближенной системы уравнений МГД-преобразователя определено главное условие, выполнение которого обеспечивает получение приемлемых массогабаритных характеристик установок. Это условие состоит в возможностях получения электромагнитных полей с индукцией порядка 10 Тл.

С учетом современных научных и инженерно-технических достижений сформулированы задачи, решение которых обеспечивает конструкторскую разработку МГД-пропульсивных установок.

Поскольку основными узлами МГД-преобразователя являются сверхпроводящие электромагниты и криогенные установки, то в пособии кратко изложено само явление сверхпроводимости и описаны некоторые сверхпроводящие материалы, критические параметры которых позволяют оценить мощность достижимых магнитных полей.

Так как хладагент – гелий применяется при весьма низких температурах, то кратко сформулированы требования, которые должны быть предъявлены к надежности конструкции криостатических устройств для хранения гелия.

Из числа возможных в пособии приведены краткие описания схем вариантов исполнения МГД-двигателей постоянного и переменного тока.

Сделана попытка сопоставления принципиальной схемы судовой энергетической установки, состоящей из МГД-генератора и МГД-двигателя.

1. Принцип устройства и действия

Заветной мечтой кораблестроителей является создание судна, имеющего большую скорость хода и бесшумное движение при возможно высоком значении его полного пропульсивного коэффициента.

Одним из основных направлений решения всего комплекса задач является разработка принципиально новой судовой электроэнергетической установки с безвинтовым МГД-двигателем.

В отличие от обычных такие установки объединяют функции гребного электродвигателя и гребного винта. При этом в качестве источника тока может быть использован МГД-генератор, осуществляющий прямое преобразование тепловой энергии в электрическую, т.е. исключая многоступенчатый путь, использующийся в настоящее время на судах-электроходах.

Следует особо подчеркнуть, что сама идея создания гидрореактивного двигателя, ускоряющего поток морской воды действием электромагнитных сил, не нова.

Хорошо известно, что согласно закону электромагнитной индукции при движении проводника с током в постоянном магнитном поле со стороны последнего на проводник действует сила (сила Ампера), равная

$$F = I[l\vec{B}] ,$$

где I сила тока;

l - вектор, численно равный длине проводника и направленный в ту же сторону, что и вектор $j = I/S$ плотности тока, проходящего по проводнику сечением S ;

B - силовая характеристика магнитного поля, называемая вектором магнитной индукции.

Направление силы F при взаимной перпендикулярности l и B определяется правилом левой руки.

Если в качестве проводника электрического тока рассматривать морскую воду, то силы Ампера, возникающие в результате взаимодействия тока, пропускаемого через воду, с постоянным магнитным полем будут ускорять протекающую через поле массу m воды, вызывая непрерывное приращение скорости W_a потока. Такое приращение в соответствии с теорией идеального гидрореактивного двигателя обуславливает появление силы тяги

$$P_e = mW_a,$$

преодолевающей силу R сопротивления движению судна.

Несмотря на простоту идеи, ее техническая реализация до последнего времени не находила своего решения.

Причина такого положения дел кроется в том, что создание установки с постоянными магнитами дает возможность достичь значений к.п.д. МГД двигателя лишь не более нескольких процентов.

Если использовать электромагниты с обмотками из обычных материалов, таких как медь, алюминий и со стальным сердечником, то величина магнитной индукции B ограничивается условиями насыщения сердечника и составляет лишь около 2 Тл. При такой индукции даже для к.п.д. $3 \div 5\%$ масса электромагнита получается чрезмерно большой, порядка нескольких сотен тонн. Для получения же к.п.д. 30% и выше требуется, как показывают расчеты, магнитные поля с индукцией $B \geq 10$ Тл.

2. Теоретические основы работы МГД-двигателя

Хорошо известно, что работа обычного электродвигателя связана с перемещением металлического проводника с током в магнитном поле.

В МГД двигателе роль проводника выполняет морская вода.

Процесс МГД преобразователя приближенно описывается следующими тремя уравнениями:

– плотность электрического тока

$$j = \sigma (BV - E), \text{ А/м}^2; \quad (1)$$

– сила, действующая на единицу объема морской воды

$$f = \frac{dp}{dZ} = jB, \text{ Н/м}^3; \quad (2)$$

– электрическая мощность, сообщаемая единичному объему ускоряемой массы воды

$$N_{yy} = \rho V \frac{dh}{dx} = jE, \text{ кВт}. \quad (3)$$

В записанных уравнениях:

σ - удельная электрическая проводимость морской воды, Ом/м;

B - индукция магнитного поля, Тл;

V - скорость потока морской воды, м/с;

$E = U/v$ - напряженность однородного электрического поля; В/м;

U - напряжение между электродами, в;

v - расстояние между электродами, м;

p - давление воды, Па;

ρ - плотность забортной воды, кг/м³

h - энтальпия единицы массы воды, Дж/кг.

Если обозначить $E/BV = \eta$, называемый нагрузочным параметром, то с учетом (1) можно получить

$$N_{yy} = \sigma B^2 V^2 \eta(1 - \eta). \quad (4)$$

Из этого выражения следует, что мощность, которую можно сообщить единичному объему ускоряемой забортной воды при заданных значениях скорости V и нагрузочного параметра η , определяется прежде всего величинами индукции магнитного поля B и удельной электропроводности воды σ .

Необходимо иметь в виду, что увеличение мощности и, следовательно, пропульсивного коэффициента за счет искусственного повышения даже в 5 - 10 раз электропроводности морской воды введением различного рода присадок на входе в МГД-двигатель, а также ее нагревом в судовых условиях невозможно из-за больших масс воды, проходящих через двигатель.

Из уравнения (2) следует, что перепад давления, обусловленный действием силы Ампера, можно выразить соотношением

$$p_1 - p_2 = jBL,$$

где p_1 - давление на входе в МГД-двигатель;

p_2 - давление на выходе из МГД-двигателя;

L - длина проточного канала двигателя.

Воспользовавшись уравнением (1), можно легко получить

$$L = \frac{p_1 - p_2}{\sigma B^2 V (1 - \eta)}. \quad (5)$$

Отсюда ясно видно, что длина канала, так же, как и мощность, зависит от величины магнитной индукции B , и по мере ее роста L резко сокращается.

Таким образом, для получения приемлемых массогабаритных характеристик МГД-двигателей необходимы эффективные магнитные системы, способные создавать сильные магнитные поля в больших объемах. При этом чрезвычайно важно, чтобы такие системы потребляли минимум электроэнергии на собственные нужды, т.е. обладали минимальной энергоемкостью.

Хорошую иллюстрацию степени эффективности работы МГД-двигателя дают приведенные на рис.1 кривые зависимости его к.п.д. от скорости хода при разных значениях индукции магнитного поля.

Графики построены для подводного судна по данным американского исследователя Дороха, опубликованными в журнале [5] за 1963 г. В своих расчетах Дорох принимал водоизмещение судна $\Delta = 2000$ т, длину МГД-канала равной $L = 15$ м и площадь его поперечного сечения $S = 7$ м².

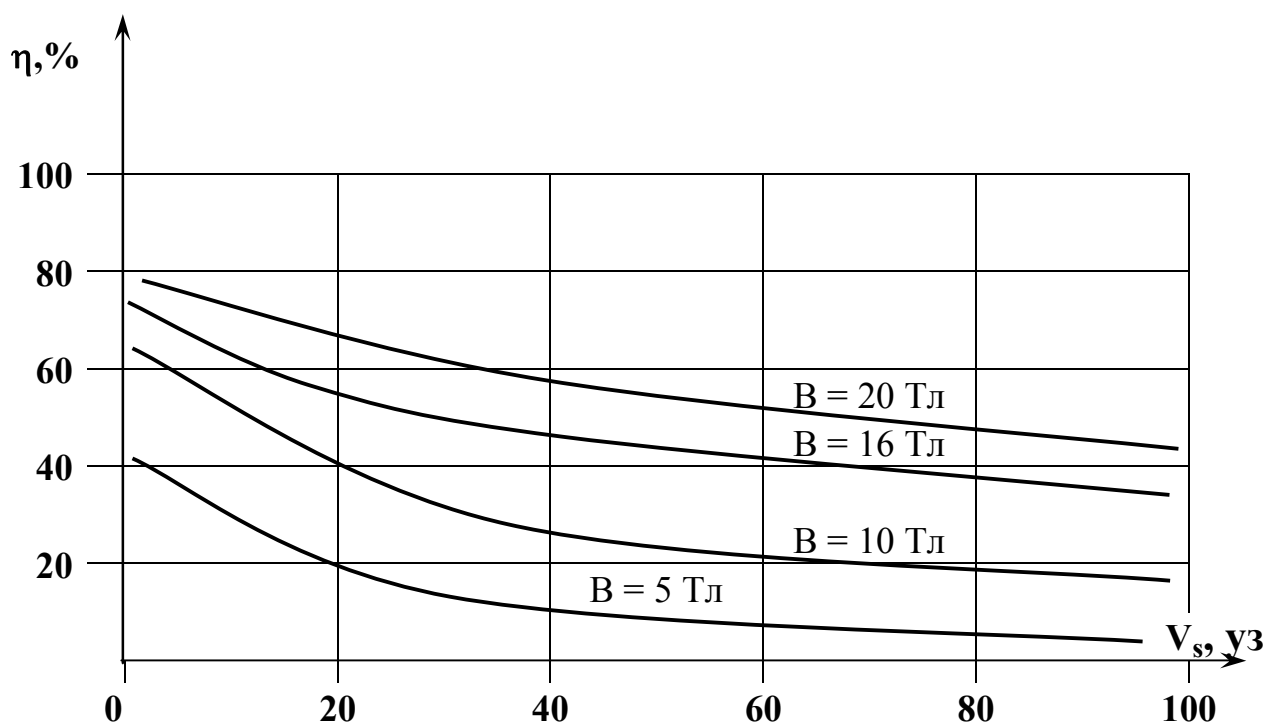


Рис. 1. Кривые зависимости к.п.д. МГД двигателя от скорости хода и индукции магнитного поля

Построенные кривые говорят о том, что по мере роста скорости хода к.п.д. уменьшается, и притом тем интенсивнее, чем меньше индукция магнитного поля.

При скорости хода 20 - 30 уз. для получения к.п.д. порядка 30% достаточно иметь поля с индукцией $B \approx 8$ Тл. Поля с $B = 10 \div 20$ Тл позволяют

получить к.п.д. в интервале 40÷75%. При скоростях хода 50 ÷ 70 уз для получения к.п.д. свыше 30% необходимы поля с индукцией $B \geq 10\text{Тл}$.

Столь сильные магнитные поля могут быть получены только при помощи сверхпроводящих магнитных систем.

Таким образом, использование систем с высокой индукцией магнитного поля позволяет сделать МГД-двигатель реальным и перспективным судовым двигателем.

3. Научно-технические проблемы и пути их решения

При разработке конструкций МГД-двигателя необходимо решить целый ряд научно-технических задач, основные из которых перечислены ниже.

1. Разработка сверхпроводящих материалов, с высокими критическими параметрами и электромагнитов на их основе с индукцией магнитного поля $B \geq 10\text{Тл}$.

2. Разработка эффективной системы защиты, обусловленной конструкцией собственно проводника и условиями его охлаждения.

3. Осуществление надежной компенсации электродинамических усилий в обмотках электромагнитов.

4. Создание компактных и надежных криогенных установок, включая криостаты, компрессоры, теплообменники и устройства для расширения рабочего тела.

5. Разработка надежных способов и систем управления, обеспечивающих эффективную работу МГД-двигателя при переменных скоростях хода судна.

6. Разработка систем удаления продуктов электролиза морской воды с целью уменьшения шума от пульсирующих пузырьков выделяющихся газов.

Важнейшей частью МГД-преобразователя (генератора или двигателя), определяющей его массу, габариты, стоимость, эффективность работы и пр., является магнитная система, обладающая минимальной энергоемкостью.

Всем этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют сверхпроводящие магнитные системы - СМС

3.1. Сверхпроводимость

Создание СМС связано с решением целого комплекса физико-технических, инженерных, технико-экономических и других задач, обуслов-

ленных самой природой явления сверхпроводимости и фундаментальными свойствами сверх проводников. Значительная часть этих задач подробно рассмотрена в [4].

Сверхпроводимость, впервые обнаруженная в 1911г. Камерлинг-Оннесом, состоит:

во-первых, в скачкообразном, практически полном исчезновении электрического сопротивления у ряда металлов, сплавов и соединений при температурах, близких к абсолютному нулю и называемых критическими температурами T_K ;

во-вторых, в сверхпроводящем состоянии вещества внутрь его объема совершенно не проникает внешнее магнитное поле.

Однако это явление наблюдается только до некоторой величины напряженности поля, называемой критической напряженностью H_K . Выше H_K сверхпроводник скачком переходит в нормальное состояние и магнитное поле пронзает его объем. Величина H_K тем выше, чем ниже температура сверхпроводника.

Способность сверхпроводника не пропускать внутрь себя магнитное поле носит название магнитоотражательного эффекта или эффекта Мейснера, который в 1933г. впервые обнаружил это явление.

Переход сверхпроводника из сверхпроводящего в нормальное состояние определяется не только критическими значениями температуры и магнитного поля, но и плотностью тока. Допустимая его величина ограничивается тем, что он может разрушить сверхпроводящее состояние, если превысит некоторое критическое значение j_K .

По своим фундаментальным свойствам все сверхпроводящие материалы условно делятся на сверхпроводники 1-го и 2-го рода. Неабсолютность такого деления объясняется тем, что сверхпроводник 1-го рода можно превратить в сверхпроводник 2-го рода, если создать в нем соответствующую концентрацию дефектов кристаллической решетки, пустых узлов, посторонних атомов.

У сверхпроводников 2-го рода в отличие от 1-го рода имеются следующие две особенности.

Во-первых, они имеют два критических магнитных поля: нижнее H_{K1} и верхнее H_{K2} . При H_{K1} внутрь тела сверхпроводника постепенно, в виде "нитей" начинает проникать магнитное поле. При достижении полем напряженности H_{K2} сверхпроводимость в объеме разрушается полностью и вся толща сверхпроводника переходит в нормальное состояние. При этом вплоть до H_{K2} равенство нулю электрического сопротивления у материала сохраняется. Таким образом, в интервале полей от H_{K1} до H_{K2} , который ока-

зывается довольно широким, сверхпроводник 2-го рода находится в смешанном состоянии, т. е. эффект Мейснера у него отсутствует, а сверхпроводимость сохраняется.

Во-вторых, ток в толщу сверхпроводника 2-го рода проникает постепенно, после того, как он станет больше нижнего критического значения $j_{к1}$. Но электрическое сопротивление остается равным нулю до тех пор, пока ток не превысит верхнего критического значения $j_{к2}$.

3.2. Сверхпроводящие материалы

В настоящее время известно более тысячи различных сверхпроводников, в том числе примерно тридцать чистых металлов. Основную же часть составляют сплавы и химические соединения. При этом оказывается, что совершенно необязательно, чтобы каждый из составляющих их компонентов был сверхпроводником. Так например, соединение CuS - сверхпроводник 2-го рода, а медь и сера в чистом виде не являются сверхпроводниками.

Для изготовления проводов, кабелей и лент СМС используются наиболее технологичные сверхпроводящие материалы с высокими критическими параметрами T_K , H_K и j_K , такие, как интерметаллическое соединение станнида ниобия Nb_3Sn с $T_K \approx 18$ К, $H_K \approx 300$ кЭ, и сплавы типа $Nb-Zr-Ti$; $Nb-Zr$ с $T_K \approx 10$ К, $H_K \approx 60$ кЭ; $Nb-Ti$ с $T_K \approx 9$ К, $H_K \approx 120$ кЭ. В нашей стране такие сплавы выпускаются под марками: 65ВТ с 65% Nb , 25% Ti и 10% Zr и других технологических компонентов, НЦ-50 и Т-60. Первый сплав предназначен для магнитных полей с $H=40$ кЭ при $j_K = 10^5$ А/см², второй - для полей с $H = 10 \div 25$ кЭ при $j_K = 2 \cdot 10^5$ А/см² и третий - для полей с $H = 80 \div 85$ кЭ с одной особенностью, состоящей в резкой зависимости критического тока от температуры.

3.3. Обмотки СМС

Обычно сверхпроводящие сплавы используются в обмотках электромагнитов в виде проволоки круглого сечения диаметром около 0,25 мм, из которой изготавливаются многожильные кабели. У таких проводов меньшая доля сечения занята неметаллической изоляцией в виде эпоксидных эмалей и при равных намагничивающих силах полная длина и число витков у многожильного провода будут меньше, чем у одинарного, что повышает надежность обмотки и облегчает ее изготовление.

Однако у крупных и мощных СМС судовых МГД-двигателей неизбежны обмотки с прямолинейными сторонами. В таких электромагнитах предпочтительнее использовать ленту достаточной ширины, так как при этом коэффициент заполнения обмотки сверхпроводящим материалом оказывается выше, чем при использовании проволоки круглого сечения.

При разработке сверхпроводящих обмоток чрезвычайно важно обеспечить высокую степень надежности и безопасности их эксплуатации, особенно в режимах, связанных с неконтролируемым переходом системы из сверхпроводящего в нормальное состояние. Для этой цели необходимо выполнение целого комплекса защитных мер.

Наиболее важной является стабилизация обмоток, т.е. осуществление мер, обусловленных конструкцией собственно проводника и условиями его охлаждения. Основная идея такой стабилизации, называемой тепловой, состоит в армировании сверхпроводника нормальным металлом с высокими электро- и теплопроводностью при одновременном эффективном охлаждении такого комбинированного проводника. Его поверхностное электролитическое покрытие медью или алюминием толщиной 0,01 - 0,03 мм обеспечивает лучшее охлаждение и мгновенное шунтирование, если скачок магнитного поля или нарушение системы охлаждения вызовет переход части проводника в нормальное состояние.

Следует подчеркнуть, что очень важно не "перестабиллизировать" обмотки, т. е. свести долю сечения комбинированного проводника, занятую нормальным металлом, к допустимому минимуму и тем обеспечить максимально возможную плотность тока в обмотке, ее минимальную массу и габариты.

Тепловая стабилизация не исключает также использование и таких видов защиты, как секционирование обмотки, отключение СМС от источника питания в начале перехода в нормальное состояние и ее разряд на внешнее электрическое сопротивление, использование вторичной обмотки из нормального металла, индуктивно связанной со сверхпроводящей обмоткой.

Чрезвычайно важным является обеспечение механической прочности обмоток.

В обмотках крупных СМС неизбежно возникновение колоссальных электродинамических усилий, которые могут деформировать и даже разрушить обмотку.

При прямолинейных ее сторонах основными усилиями являются силы отталкивания между длинными сторонами. Для их компенсации потребуется установка прочных бандажей из высокопрочных легких материалов.

Для обмоток цилиндрической формы наибольшую опасность представляют радиальные усилия, стремящиеся разорвать их витки. Эти силы значительно снижаются использованием так называемых бессиловых конфигураций, простейшей из которых является лента, намотанная на круговой цилиндр под углом 45° к его оси. Практически наиболее приемлемой формой является тороидальная катушка.

При быстром изменении магнитного поля обмоток в случае нарушения сверхпроводимости неизбежно наведение значительных вихревых токов с быстрым местным повышением температуры в окружающих металлических конструкциях и их неравномерным тепловым расширением.

Поэтому близлежащие и экранирующие металлические детали должны быть сконструированы так, чтобы в них затруднялось образование вихревых токов.

3.4. Криогенные установки

Важнейшим узлом, обеспечивающим работу СМС, является криогенная установка, построенная по рефрижераторному, т.е. замкнутому циклу, в состав которой входят: хладагент, криостат, компрессор, теплообменники и устройство для расширения рабочего тела-гелия.

Построение по замкнутому циклу характеризуется тем, что холодный газ, выходящий из охлаждаемой магнитной системы, возвращается в теплообменники, где используется для охлаждения прямого потока сжатого гелия. При этом возрастает термодинамическая эффективность охлаждения вследствие увеличения количества теплоты, передаваемой от прямого потока к обратному, и уменьшаются затраты энергии.

Низкие температуры, необходимые и достаточные для работы сверхпроводящих систем, возможно практически получить лишь в том случае, если в качестве хладагента использовать гелий, который применяется при атмосферном давлении и температуре 4,2 К.

Гелий занимает особое положение среди других веществ, используемых в криогенной технике, так как он остается жидкостью при таких температурах, при которых все другие вещества становятся твердыми. Кроме того, гелий - единственный, у которого твердая и газообразная фазы не могут существовать в равновесии. Под давлением собственных паров гелий остается жидким вплоть до самых низких температур.

Важнейшим свойством гелия является его сверхтекучесть. Такая сверхжидкость течет к более высокой температуре, в то время как нормальная жидкость перемещается в более холодную область.

Перед началом работы гелий помещается в особое устройство - криостат, служащий для поддержания низких температур. Обычно это выносной элемент рефрижератора.

Конструктивно криостат представляет собой несколько сосудов, подобных сосуду Дьюара, вставленных один в другой. Во внутренний сосуд заливается гелий, а полости между стенками откачаны до глубокого вакуума. Соответствующие поверхности полируются.

Наиболее распространены криостаты из нержавеющей стали. Однако в последние годы стали применять криостаты из алюминиевых сплавов, которые меньше весят и требуют меньше жидкого гелия на первоначальное охлаждение. Появились также криостаты из пластмасс.

Следует подчеркнуть, что судовая криогенная установка в целом и ее отдельные элементы должны обладать высокой степенью надежности.

С этой точки зрения считается перспективным использование герметичных компрессоров, не загрязняющих газ.

Расширительные машины, т. е. поршневые и турбодетандеры, должны иметь опоры на газовой смазке. Система контроля и управления криогенной установкой должна быть высоко надежной и автоматизированной, потому что при быстром испарении гелия и повышении температуры потеря сверхпроводимости ведет к быстрому нагреву и падению прочности всех элементов СМС.

3.5. О продуктах электролиза забортной воды

Прохождение электрического тока через морскую воду приводит к выделению на электродах газов, главным образом хлора и водорода.

Эти газы при выбросе струей воды из канала МГД=двигателя будут действовать как пульсирующая масса, создавая шум и заметный след.

Один из возможных способов отвода газов состоит в том, что они отбираются через пористые электроды и затем сжигаются в топливных элементах. Получающуюся при этом энергию можно обратить на приведение в действие самой системы удаления газов.

Подводя итог сказанному в настоящем параграфе, можно с уверенностью утверждать, что успехи, уже достигнутые в области прикладной сверхпроводимости и криогенной техники, позволяют разрешить еще не решенные проблемы.

Подтверждением этому может служить тот факт, что уже сейчас в институте высоких температур АН РФ построена и работает электростанция полупромышленного типа с МГД-генератором мощностью 25 МВт.

В Калифорнийском университете еще в 1966г. была построена и прошла испытания модель подводного судна с МГД-установкой. Модель имела длину 3,05 м, диаметр 0,46 м и массу 400 кг. Обмотка электромагнита имела магнитодвижущую силу $16 \cdot 10^3 \text{А}$, а электроды МГД-двигателя были изготовлены из алюминия и защищены от воздействия морской воды специальным составом. При испытаниях достигнута скорость более 1уз.

Опыт работы уже построенных МГД-установок, исследования, выполненные в лабораториях США, Японии и других стран, см [6], позволяют проверить решения ряда научно-технических проблем, и тогда встанет вопрос промышленного применения МГД преобразователей на судах.

4. Возможные варианты конструкций МГД-двигателей

В настоящее время известны несколько вариантов конструктивного исполнения МГД-двигателей. Все они по способу передачи энергии от источника тока к ускоряемому рабочему телу - морской воде могут быть:

- кондукционными, в схемах которых электроэнергия подводится к электродам, т.е. непосредственно к воде;
- индукционными, в схемах которых реализуется безэлектродное преобразование переменного тока в механическую энергию движения судна.

По действию объемной электромагнитной силы на воду МГД-двигатели могут быть двух типов:

- канальными с внутренним магнитным полем;
- бесканальными с внешним (открытым) магнитным полем.

4.1. Кондукционный канальный МГД-двигатель

Такой двигатель, см. рис. 2, представляет собой канал 1, оптимальная геометрическая форма которого определяется минимальным значением отношения его поверхности к объему, поскольку гидравлические потери зависят от величины поверхности. Это условие обуславливает рассмотрение конструкций МГД-двигателя с линейным каналом прямоугольного и круглого сечения, а также с винтовым каналом. Выполненные исследования показывают, что при неизменной длине L площадь S сечения канала оказывает значительное влияние на общий к.п.д. лишь при $S \leq 10 \text{ м}^2$.

Токопроводящие стенки 2 являются электродами, изготовленными из кирпичей двуокиси циркония.

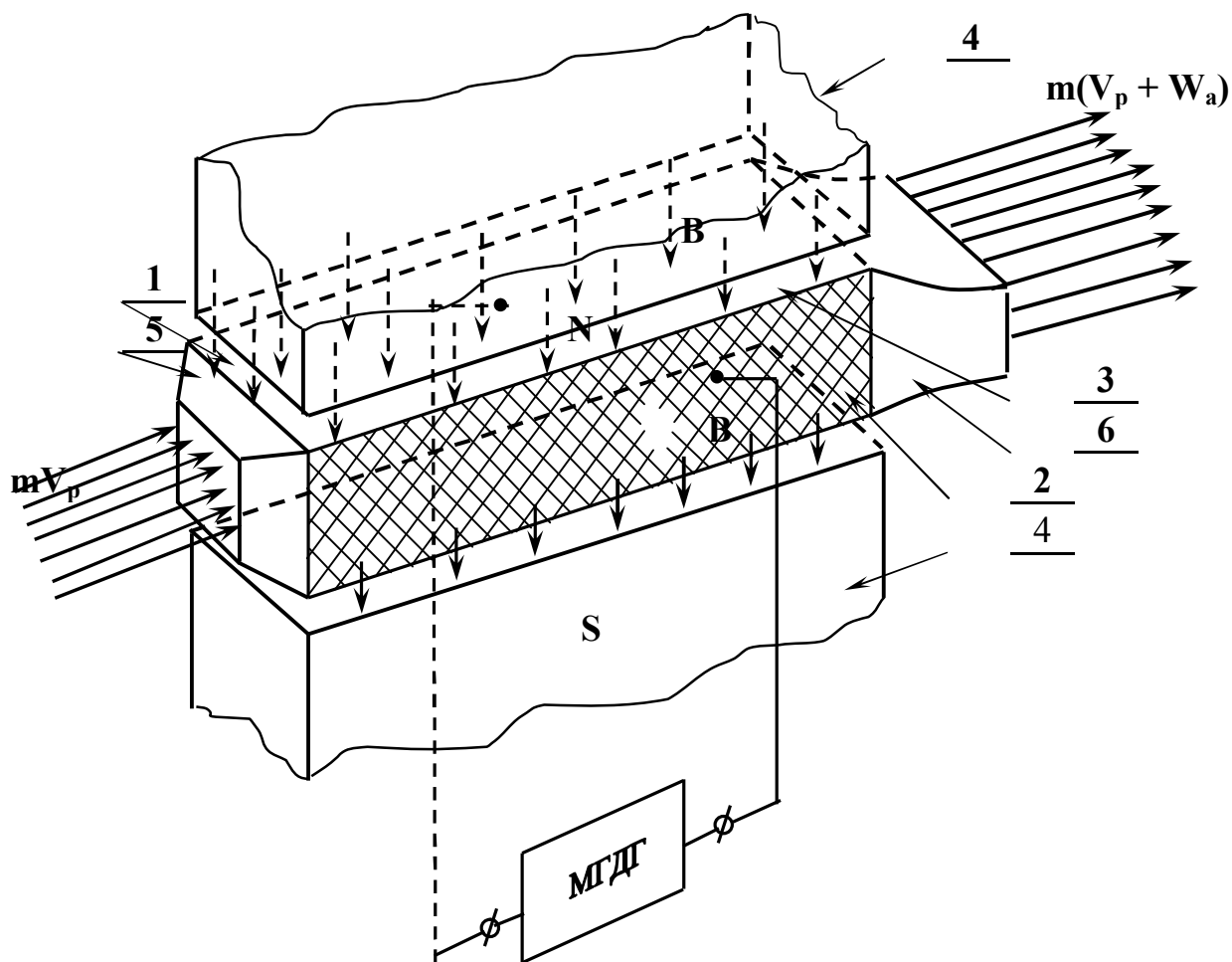


Рис. 2 Схема кондукционного канального МГД движителя

К ним подводится ток от судового электрогенератора. Сквозь токоизолированные блоками из окиси магния стенки 3 проходят линии магнитной индукции B внешнего однородного магнитного поля электромагнита постоянного тока 4. Канал имеет входной диффузорный 5 и выходной конфузорный 6 насадки, через которые протекает некоторая масса m воды при забортном давлении и скоростном напоре, обусловленными глубиной погружения МГД-двигателя и скоростью хода судна.

При подведении к электродам напряжения от источника постоянного тока, например от МГД-генератора, через морскую воду в канале потечет ток, плотность j которого определяется законом Ома для движущихся сред. В результате потоку воды сообщается механическая энергия, которая расходуется как на создание силы тяги, так и на покрытие гидродинамических потерь.

Упор, таким образом, обеспечивается изменением количества движения mV_p на входе МГД двигателя и на выходе из него - $m(V_p + W_a)$.

Достоинство канальной системы состоит в том, что до минимума снижаются магнитные и электрические поля рассеяния, поскольку электромагнитные силы создаются и воздействуют на воду в ограниченном объеме воды.

К основным недостаткам установок с канальными МГД двигателями следует отнести:

- во-первых, то, что объем воды, на который воздействуют электромагнитные силы, сравнительно невелик, и это увеличивает потери энергии в канале;
- во-вторых, из-за наличия проточного канала уменьшается полезное водоизмещение судна.

4.2. Кондукционный МГД-двигатель с внешним магнитным полем

Для увеличения мощности канального МГД-двигателя при неизменной плотности тока требуется увеличение размеров канала, что, как сказано выше, резко снижает полезный объем судна.

От этого недостатка свободен бесканальный МГД-двигатель с внешним магнитным полем, в схеме которого взаимно перпендикулярные магнитное и электрическое поля создаются в забортной воде, омывающей корпус судна. Это позволяет уменьшить гидродинамические потери, увеличить полезный объем судна. Кроме того, внешнее магнитное поле может способствовать снижению сопротивления движению благодаря ламинаризации потока воды в пограничном слое.

Считается, что МГД-установки с внешним магнитным полем наиболее целесообразно использовать для движения крупных подводных танкеров.

Японские же кораблестроители полагают, что такой двигатель весьма привлекателен для использования его на ледоколах, так как при этом корпус судна не будет иметь выступающих частей в виде гребных винтов и кронштейнов гребных валов. При такой пропульсивной установке возможен локализованный нагрев забортной воды, а также извлечение из нее газов для системы обдувки корпуса при ходе во льдах и внутрисудовых нужд.

Принципиальная схема МГД установки ледокола с внешним магнитным полем приведена на рис.3

Рассмотрение этого рисунка позволяет уяснить принцип устройства и работы МГД двигателя с открытым магнитным полем.

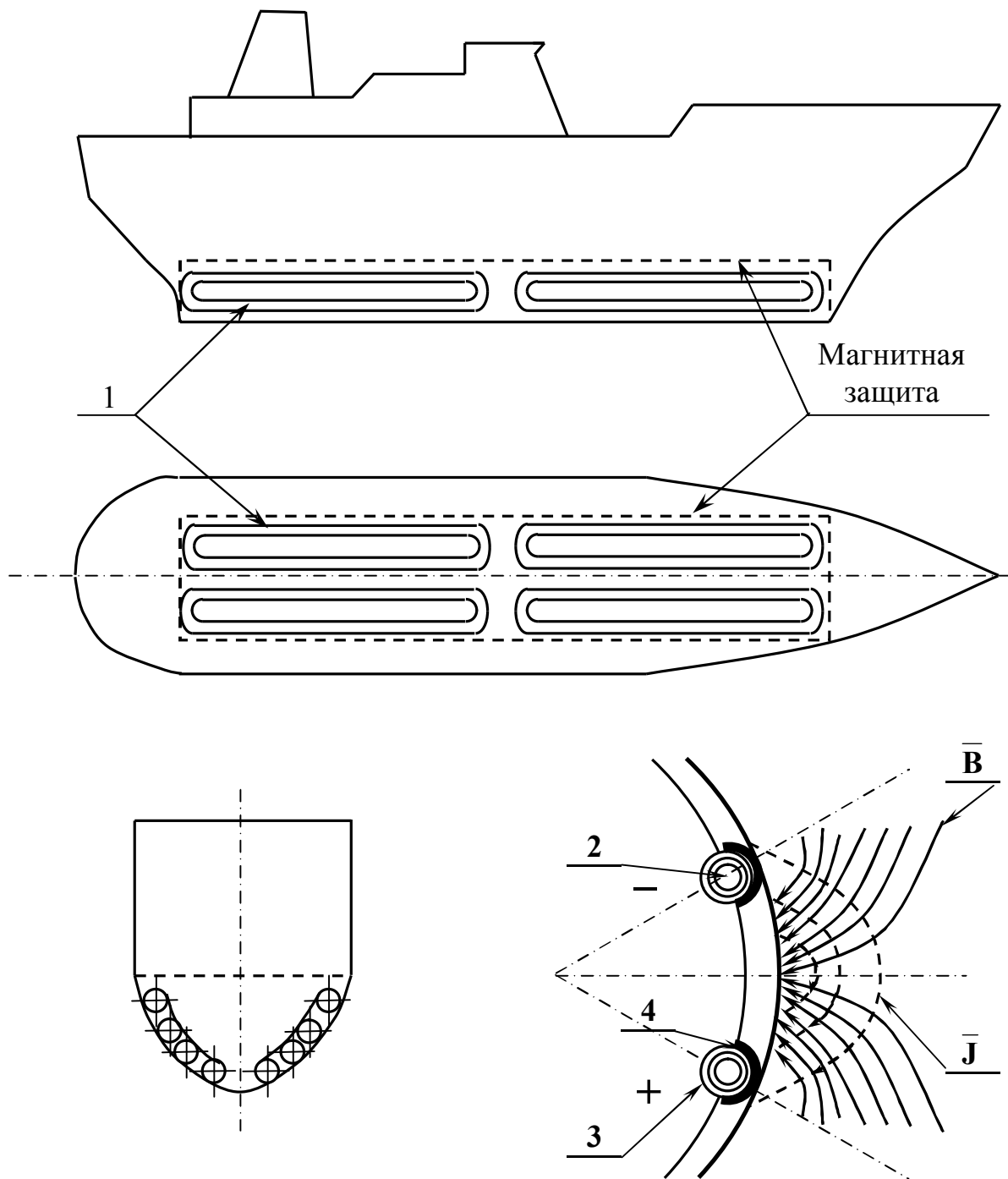


Рис. 3. Принципиальная схема МГД-двигателя ледокола с внешним магнитным полем

Здесь система возбуждения выполнена в виде сверхпроводящих короткозамкнутых обмоток 1, уложенных в продольном направлении вблизи днищевой поверхности корпуса ледокола. Проводники 2 обмоток помещены в сосуды Дьюара 3 с жидким гелием и окружены вакуумным кольцевым пространством с экраном для защиты от теплопритоков из окружающей среды. Электроды 4 расположены вдоль сверхпроводящих обмоток. Подаваемые от генераторов судовой электростанции постоянные токи, проходящие по рядом расположенным продольным проводникам обмоток, направлены в противоположные стороны. В результате этого создаваемые в забортной воде магнитные поля складываются от смежных проводников. Поскольку направление магнитного поля в основном перпендикулярно линиям электрического тока, то на морскую воду будет действовать сила, направленная вдоль корпуса судна. Реакция воды, отбрасываемой этой электромагнитной силой, создает движущую силу тяги.

Основные проблемы, подлежащие решению при реализации этого типа МГД-двигателя, состоят, во-первых, в разработке способов крепления сверхпроводящих обмоток, компенсирующих весьма значительные электродинамические усилия. Такие бандажные устройства при этом не должны создавать чрезмерных тепловых притоков.

Во-вторых, должна быть решена проблема, связанная с наличием внутри судна магнитного поля, обуславливающего притяжение стальных тел, находящихся вблизи обшивки корпуса как внутри судна, так и за его пределами, а также защита людей от воздействия полей.

4.3. Индукционные МГД-двигатели

Рассмотренные кондукционные схемы постоянного тока создают значительные трудности в обеспечении коррозионной устойчивости, как самих каналов, так и близлежащих судовых конструкций.

Эти трудности отсутствуют в схеме индукционного типа, которые позволяют осуществить безэлектродное преобразование электроэнергии переменного тока в механическую энергию движения судна.

В установках этого типа обмотка электромагнита многофазовая и создающая так называемое бегущее магнитное поле. Это поле индуцирует в рабочей среде - морской воде вихревое электрическое поле, под действием которого возникают короткозамкнутые электрические токи. Взаимодействие перемещающегося магнитного поля с вызванными в воде токами обуславливает появление объемной электромагнитной силы, ускоряющей поток воды.

Как и кондукционные, индукционные схемы могут быть канальными и с внешним бегущим магнитным полем, подобным показанному на рис.4

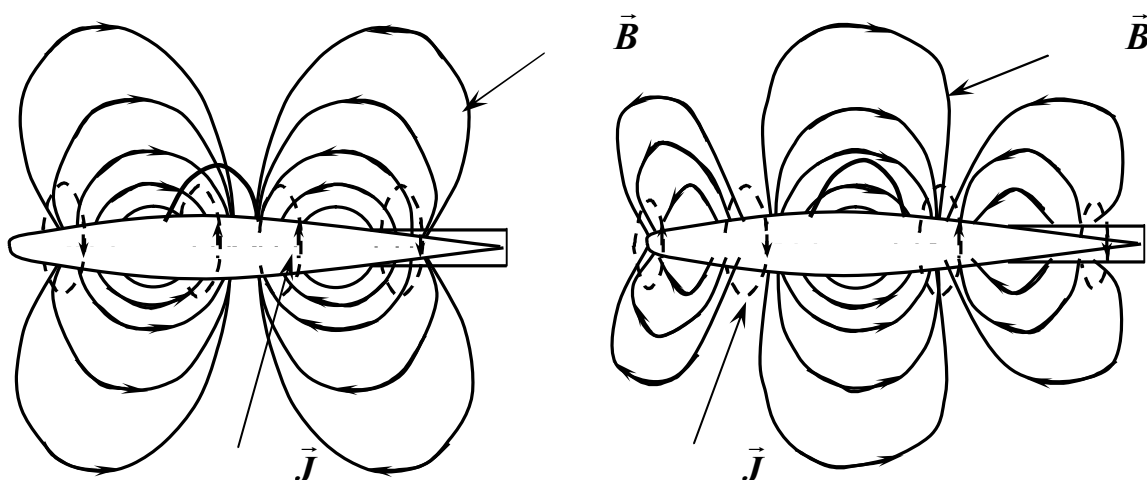


Рис. 4. Расположение магнитных полей в индукционном МГД-двигателе с внешним полем в разные моменты времени

4.4. Комплектация агрегатов электромагнитной судовой пропульсивной установки

Рассмотренные возможные конструктивные варианты представляют особый интерес в связи с возможностью использования в качестве источников электроэнергии мощных МГД-генераторов. В этом случае оказывается принципиально возможным выполнение всей энергетической установки в одном блоке, в котором у МГД-генератора и МГД-двигателя была бы общая сверхпроводящая магнитная система.

Один из вариантов схемы такой пропульсивной установки приведен на рис.5

Здесь в камеру сгорания 1 подается топливо, присадки для ионизации газов и воздух, нагнетаемый компрессором 2 через подогреватель 3. Электрическое напряжение, снимаемое с электродов 4 МГД-генератора, подается на электроды 5 МГД-двигателя. Напряжение МГД-генератора регулируется изменением тока возбуждения в электромагнитах 6 специальной системой управления 7.

Индукция магнитного поля сверхпроводящего электромагнита 8 МГД-двигателя также регулируется соответствующим изменением тока в его обмотках.

Высокая температура отработанной плазмы используется для получения пара в парообразовательных секциях 9. Полученный пар приводит в действие турбину высокого давления 10, вращающую компрессор 2 и турбину низкого давления 11, которая приводит в действие электрогенератор 12, энергия которого используется для вспомогательных общесудовых нужд.

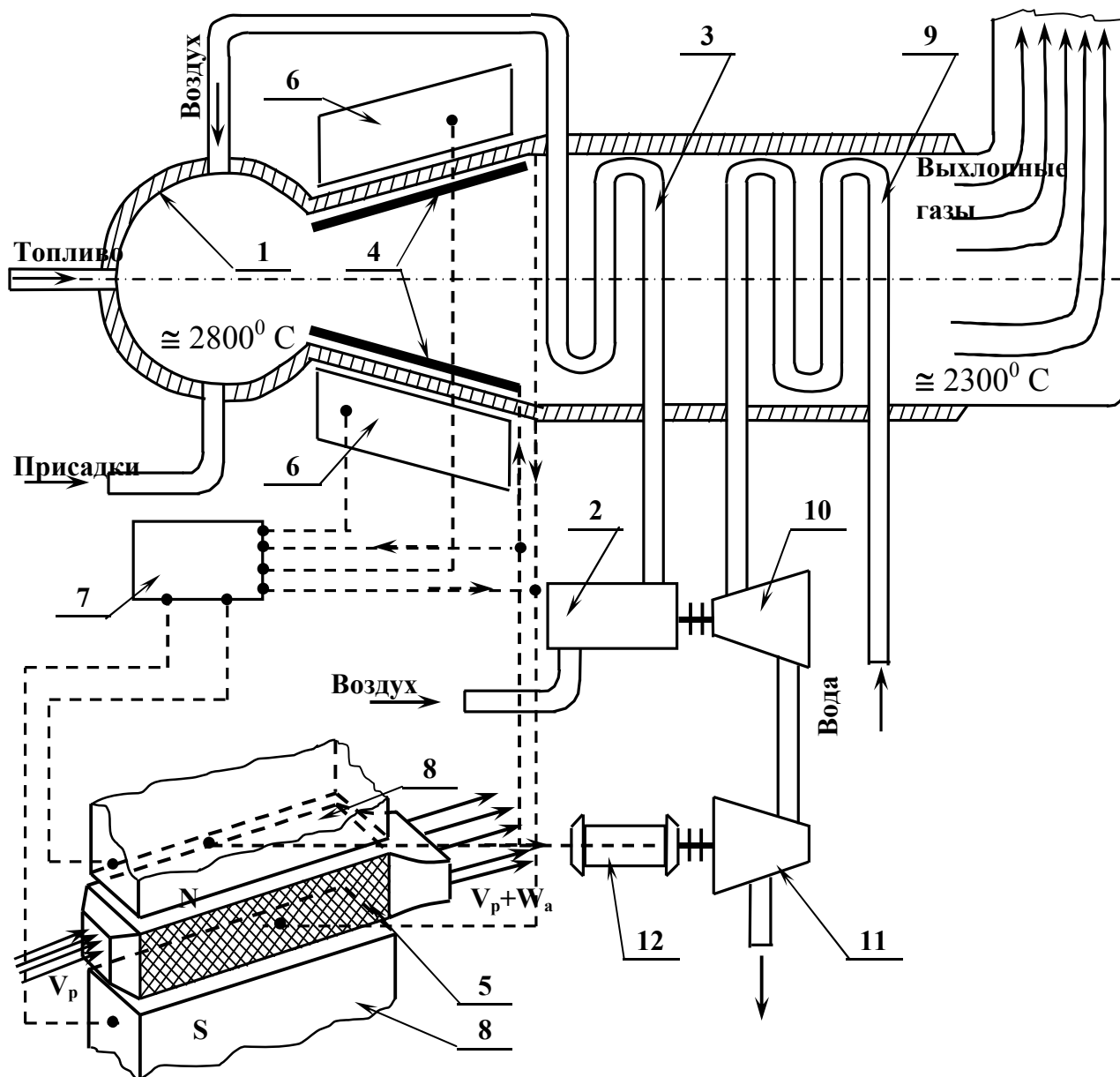


Рис. 5 Принципиальная схема электромагнитной судовой установки с каналым МГД двигателем

В заключение можно сказать, что с учетом того, что эффективность МГД-преобразователей увеличивается по мере роста мощности, то созда-

ние крупных судовых МГД-установок переходит из сферы фантастики в сферу реальных дел.

Литература

1. Башкатов В.А., Орлов П.П., Федосов М.И. Гидрореактивные импульсивные установки. Л., "Судостроение", 1977. – 236 с.
2. Ватажин А.Б., Любимов Г.А., Регирер С.А. Магнитогидродинамические течения в каналах. М., Физматгиз. 1970. – 138 с.
3. Зенкевич В.Б., Казовский Е.Я., Кремлев М.Г., Орлов П.П., Сычев В.В., Федосов М.И., Шахтарин В.Н. Сверхпроводники в судовой технике Л., "Судостроение", 1971. – 234 с.
4. Казовский Е.Я. Сверхпроводящие магнитные системы. Л., "Наука", 1968. – 176 с.
5. Dorach МНД - ship propulsion using superconducting magnets. - Report. SNAME Transactions, 1963, May . 14-15
6. Friauf J. МНД - ship propulsion "Journal of American Society of Naval Engineers", Febr., 1961, № 2.

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| 1. Принцип устройства и действия | 4 |
| 2. Теоретические основы работы МГД-двигателя | 5 |
| 3. Научно-технические проблемы и пути их решения | 8 |
| 3.1. Сверхпроводимость | 8 |
| 3.2. Сверхпроводящие материалы | 10 |
| 3.3. Обмотки сверхпроводящих магнитных систем | 10 |
| 3.4. Криогенные установки | 12 |
| 3.5. О продуктах электролиза забортной воды | 13 |
| 4. Возможные варианты конструкций МГД-двигателей | 14 |
| 4.1. Кондукционный канальный МГД-двигатель | 14 |
| 4.2. Кондукционный МГД-двигатель с внешним магнитным полем | 16 |
| 4.3. Индукционные МГД-двигатели | 18 |
| 4.4. Комплектация агрегатов электромагнитной судовой пропульсивной установки | 19 |
| Литература | 22 |