

Оглавление

1. Принцип действия и определение МГД-преобразователей. Особенности, преимущества и недостатки	2
2. Классификация МГД-преобразователей. Типичные схемы энергетических установок с МГД-генераторами.....	5
3. Основные элементы (узлы), критерии и масштабы процессов в МГД-преобразователях.....	13
4. Основные характеристики МГД- преобразователей.....	14
5. Рабочие тела плазменных МГД-генераторов.....	15
6. Электрические схемы каналов МГД-генераторов.....	23
7. Течения электропроводных сред в каналах МГД-генераторов. Характерные неустойчивости низкотемпературной плазмы	26
8. Магнитные системы МГД-генераторов.....	32
9. Особенности конструкций и материалы огневых стенок каналов МГД-генераторов	35
9.1. Основные типы и особенности конструкций каналов МГД-генераторов	35
9.2. Материалы огневых стенок каналов МГД-генераторов	38
10. Энергетические установки с МГД-преобразователями и области их применения	40
Литература	55

1. Принцип действия и определение МГД-преобразователей. Особенности, преимущества и недостатки

Работа магнитогидродинамических (МГД) преобразователей видов энергии, к которым относятся МГД-генераторы электрической энергии, МГД-ускорители плазменных сред, МГД-насосы, компрессоры и дроссели, основана на принципах магнитной гидродинамики. Названные преобразователи являются объектами новой и наукоёмкой техники, их исследования и техническая реализация начались примерно 50 лет назад.

МГД-преобразователь (МГДП) является электроэнергетическим (или электротермодинамическим) устройством, в котором в соответствии с закономерностями магнитной гидродинамики происходит прямое преобразование тепловой и (или) кинетической энергии электропроводящей среды (рабочего тела) в электрическую постоянного (или переменного) тока (МГД-генератор (МГДГ) или наоборот (МГД-ускоритель (МГДУ), МГД-компрессор (насос, дроссель). К настоящему времени наиболее полно исследованы МГДГ и жидкометаллические (ЖМ) МГД-насосы и дроссели, техническая реализация которых доведена до опытно-промышленного производства.

Принцип действия МГДГ основан на законе электромагнитной индукции М.Фарадея. При движении электропроводящей среды с электропроводностью σ [См/м] со скоростью $\mathbf{v}$ [м/с] вдоль оси канала прямоугольного сечения в магнитном поле с индукцией $\mathbf{B}$ [Тл], направленном вдоль оси «z», в каждой её точке возникает локальная э.д.с. (индуцированное поле) $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ [В/м], а на электродах, расположенных на расстоянии h друг от друга, э.д.с. величиной $\mathbf{v} \cdot \mathbf{B} \cdot h$ (рисунок 1). При подключении электродов МГДГ к нагрузке (внешней сети) в электропроводящей среде, обычно это низкотемпературная плазма, потечёт ток плотностью $\mathbf{j}$ [А/м²], а в цепи - полный ток I , порядка $\mathbf{j} \cdot \mathbf{a} \cdot L$, где a – ширина электродов в канале в направлении $\mathbf{B}$, L – их длина (рисунок 1). Между электродами - анодом с потенциалом ϕ_a и катодом с ϕ_k возникнет разность потенциалов $V_\varepsilon = \phi_a - \phi_k$, а в плазме – электрическое поле $E \approx V_\varepsilon / h$ [В/м], направленное против индуцированного $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Плотность тока в плазме определяется обобщённым законом Ома $\mathbf{j} + \mathbf{j} \times \beta = \sigma \times (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ (β -параметр Холла для электронов, см. ниже) с эффективным (или действующим) полем $\mathbf{E}^* = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

Простейшая схема *кондукционного МГД-генератора* с фарадеевским линейным каналом показана на рисунке 1. В кондукционных МГДГ генерируемый в плазме ток поступает на токосъемные электроды и далее в нагрузку (сеть). Фарадеевский канал МГДГ называется потому, что ток на электроды течёт по направлению индуцированной по закону Фарадея э.д.с. (по оси «y»).

[Оглавление](#)

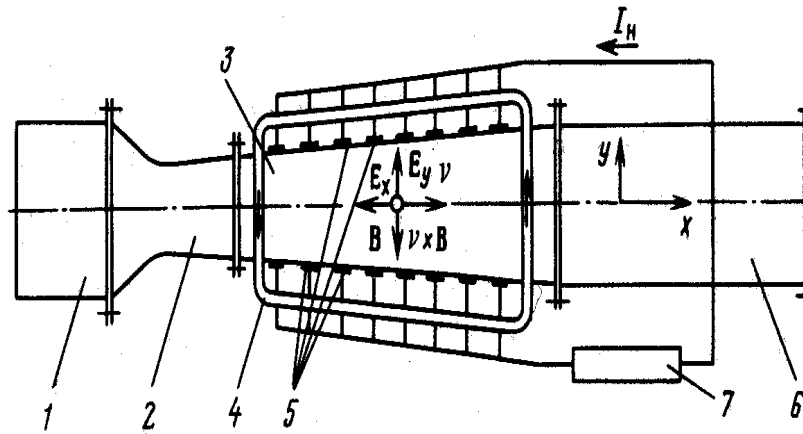


Рисунок 1 - Схема кондукционного МГД-генератора: 1 – источник рабочего тела, 2 - сопло, 3 –МГД-канал, 4 – электромагнит, 5 – электроды, 6 - диффузор

При протекании тока в магнитном поле в плазме возникает электромагнитная или пондеромоторная (сила Ампера) плотностью $F = j \times B$ [Н/м³], направленная против направления течения (или против течения в случае МГДУ). Плазма в единицу времени совершает работу по преодолению пондеромоторной силы плотностью $A = [j \times B] \cdot v$ [Вт/м³], основной частью которой передаётся в виде полезной электрической мощности плотностью $N_{уд} = j \cdot E$ [Вт/м³] во внешнюю нагрузку (в сеть), а другая часть - диссипирует в плазме в виде джоулева тепла плотностью $Q_{дж} = j^2 / \sigma$ [Вт/м³]. При $h \sim a \sim 1$ м, длине канала 7 м (число калибров $k = L/h = 7$), $\sigma \sim 20$ См/м, $v \sim 1000$ м/с, $B \sim 3$ Тл, достигаются следующие параметры (при коэффициенте электрической нагрузки 0.7 (см. ниже): э.д.с. ~ 3 кВ, напряжение на электродах $V_э \sim 2.1$ кВ, ток $I_э \sim 140$ кА, электрическая мощность $N_э \sim 300$ МВт. Для холловских МГДГ (см. ниже) напряжение увеличивается в $\sim \beta \cdot k$ раз.

Ток в плазме индуцирует вторичное магнитное поле с индукцией $B_i \sim R_m \cdot B$, где $R_m = \mu_0 \sigma v L$ - магнитное число Рейнольдса. В случае плазменных МГД-генераторов обычно $R_m \ll 1$ ($\sigma \leq 50$ См/м, $v \sim 10^3$ м/с, $L \sim 1$ м). В этом приближении, которое называется гальваническим или безиндукционным, индуцированным магнитным полем B_i можно пренебречь по сравнению с внешним B .

В индукционных МГДГ при наложении на поток электропроводной среды переменного во времени и бегущего (синусоидального) по направлению потока внешнего магнитного поля со скоростью, меньшей скорости потока, в среде индуцируются вихревые электрические поля, приводящие к появлению в плазме замкнутых токов. Возбуждаемые этими токами вторичные переменные магнитные поля индуктивно связаны с внешними (статорными) обмотками и при магнитном числе $R_m \gg 1$ эффективно возбуждают в них переменный электрический ток, который передаётся во внешнюю сеть. Значение числа $R_m \gg 1$ достигается при ис-

[Оглавление](#)

пользовании жидких металлов или высокотемпературной плазмы с электропроводностью, большей 10^4 См/м. В связи с этим при использовании низкотемпературной плазмы в качестве рабочего тела эффективным является кондукционный тип МГДГ.

Таким образом, высокотемпературный газ в МГД-генераторе выполняет двойную роль: термодинамического рабочего тела (тепловая машина) и электрического проводника (электрогенератор).

Из принципа действия МГДГ следуют как необходимые условия обеспечения его работы, так и структурная схема, основными элементами (узлами) которой являются: источники энергии и массы (в открытом цикле) рабочего тела, разгонное устройство (сопло), МГД-канал, магнит, диффузор (выхлопное устройство) (рисунок 1).

Принцип действия, термодинамическая, функциональная, структурная и электрическая схемы определяют как характерные процессы, их масштабы, характеристики основных узлов и устройства в целом, так и преимущества МГДГ по сравнению с классическим (машинным) методом преобразования тепловой энергии с помощью паро- или газотурбинных установок.

Основные преимущества МГДГ заключаются в возможности использования высокой температуры рабочего тела, обеспечивающего высокую начальную температуру термодинамического цикла, в отсутствии движущихся узлов (масс), в объёмных съёме электрической мощности и взаимодействии плазмы с магнитным полем, в том числе дистанционном и бесконтактном, в простоте конструкции и управления, большой единичной мощности (до нескольких ГВт в одном агрегате), высоких удельных массо-габаритных характеристиках, практически «мгновенном» запуске и безинерционном изменении режима работы, возможности работы в различных условиях и положениях и ряде других.

Так как тепловые, гидравлические и отчасти электрические потери в газодинамическом тракте МГД-генераторов пропорциональны его поверхности, а съём электрической мощности – объёму канала, то эффективность преобразования энергии возрастает с ростом его тепловой мощности. Так, уровень коэффициента преобразования энергии (к.п.э.) $\geq 15\%$ достигнут в МГД-генераторах на равновесной плазме только при их мультимегаваттной мощности. Считается, что плазменные МГД-генераторы становятся конкурентоспособными относительно других источников электроэнергии при мощностях ≥ 10 МВт.

Очевидно, что возможно обращение энергетического и силового взаимодействия электропроводного газа или жидкости с магнитным полем. Этот принцип заложен в основу работы МГД-ускорителей, МГД-компрессоров (насосов) и МГД-дресселей.

Оглавление

2. Классификация МГД-преобразователей. Типичные схемы энергетических установок с МГД-генераторами

Основная классификация МГД-преобразователей проводится по их назначению – МГД-генераторы электрической энергии, МГД-ускорители и МГД-насосы, компрессора, дроссели. В каждой из этих групп МГДП классифицируются по различным признакам: по используемому источнику первичной энергии и (или) источнику рабочего тела (ИРТ), по типу используемого рабочего тела (равновесная или неравновесная плазма, двухфазная плазма, жидкие металлы и т.п.), по термодинамической схеме энергетической или двигательной (силовой) установки (ЭУ) с МГДГ, по геометрической форме каналов МГДП (линейные, дисковые, коаксиальные, спиральные и др.), по способам коммутации электродов, по режимам течения (дозвуковой, сверхзвуковой) и т.д.

Выделяют два типа МГДП: кондукционные постоянного (рисунок 1) или переменного тока и индукционные МГД-преобразователи переменного тока (синхронные и асинхронные, параметрические). Принципиальное значение имеет классификация по термодинамической схеме ЭУ с МГДГ, которая не отличается от известных открытого и замкнутого циклов газотурбинных установок.

В *открытых циклах* (схемах или контурах) МГД-установок в качестве их рабочего тела используются продукты сгорания ископаемых или химических горючих в воздухе или в других окислителях (или унитарные топлива) с присадками легкоионизирующихся щелочных металлов (K, Cs и др.). В энергетических стационарных установках открытого цикла МГД-генераторы рассматриваются только как высокотемпературная надстройка к традиционным паро-жидкостному (цикл Ренкина) (рисунок 2) или газотурбинному (цикл Брайтона) циклам, позволяющие повысить его к.п.д. до 60%, т.е. в составе бинарных (рисунок 2, 3) или тройных циклов.

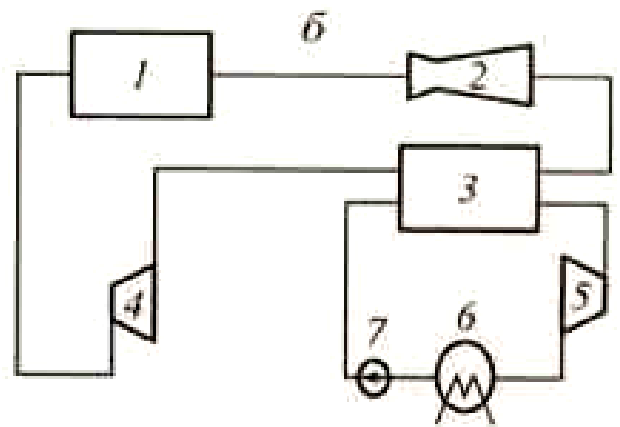
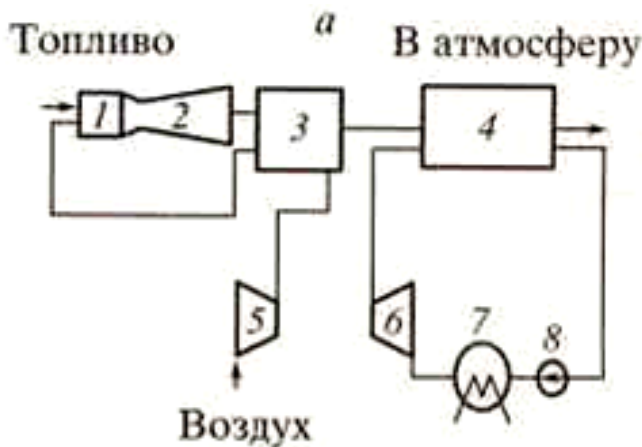


Рисунок 2 - Схема бинарной паротурбинной ЭУ с МГД-генератором открытого цикла:
1 – камера сгорания; 2 – МГДГ; 3 – воздухо-по-догреватель; 4 – парогенератор; 5 – воз-душный компрессор; 6 – паровая турбина; 7 – конденсатор; 8 - насос

Рисунок 3 - Схема бинарной паротурбинной ЭУ с МГД-генератором замкнутого цикла:
1 – источник тепловой энергии; 2 – МГДГ;
3 – парогенератор; 4 – компрессор; 5 – паровая турбина; 6 – конденсатор; 7 - насос

МГД-генераторы с использованием в качестве рабочего тела инертных газов с добавкой паров легкоионизирующихся щелочных металлов (К, Cs и др.) рассматриваются в составе бинарных (рисунок 3) или тройных *замкнутых циклов* (контуров или схем) ЭУ. В таких схемах в качестве источника тепла рассматриваются высокотемпературный (ВТ) газоохлаждаемый ядерный, термоядерный реакторы или высокотемпературный теплообменник (ВТО) (нагреватель или теплоаккумулятор), передающий тепловую энергию первичного источника инертному газу (рисунок 4).

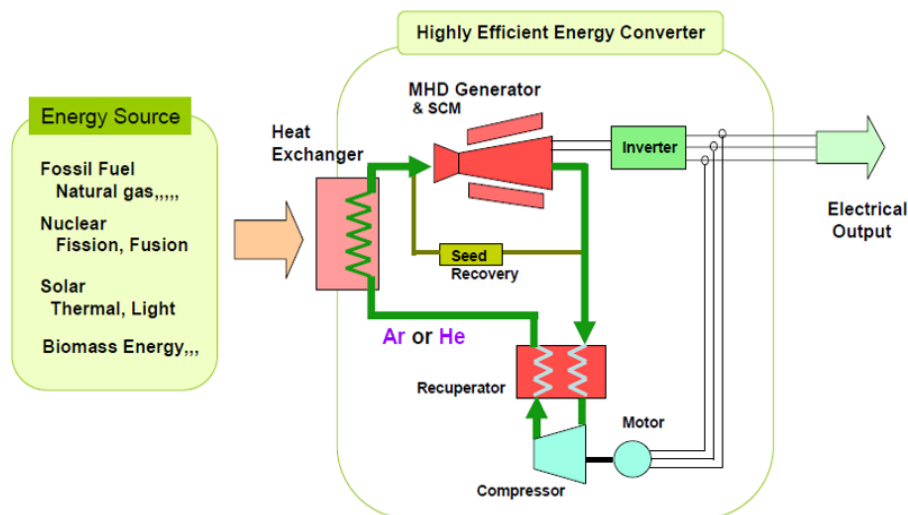


Рисунок 4 - Схема простейшего замкнутого цикла Брайтона с МГД-генератором

Замкнутый цикл (контур) Ренкина с МГДГ можно реализовать при использовании в качестве рабочего тела жидких металлов или их смесей.

Возможность и перспективность применения жидкометаллических МГД-преобразователей (генераторов (ЖМ-МГДГ), МГД-насосов, дросселей) в ядерной энергетике, прежде всего в космической и транспортной, обусловлена их особенностями и следующими причинами:

- возможностью работы с агрессивными, радиоактивными и высокотемпературными средами;
- жидкие металлы обладают электропроводностью, на 4-5 порядков выше, чем низкотемпературная плазма. Это позволяет создавать поток рабочего тела с высоким магнитным числом Рейнольдса $R_m > 1$ и, следовательно, индукционные МГД-генераторы переменного тока повышенного напряжения;
- высокая плотность металла обеспечивает большие плотности мощности на единицу поперечного сечения канала и компактность энергетического оборудования;
- жидкие металлы имеют хорошие теплофизические и радиационные свойства, что позволяет использовать их в схемах с высокотемпературными ядерными и термоядерными реакторами, в том числе на быстрых нейтронах;
- возможностью создания автономных компактных энергетических установок замкнутого цикла на основе ВТЯР с жидкометаллическим теплоносителем, МГД-генератором и МГД-насосом, т.е. ЭУ без движущихся узлов (частей);
- простотой конструкции, надёжностью и совместимостью с ВТЯР и энергетическим оборудованием.

Основной недостаток жидкометаллического МГД-генератора заключается в том, что жидкий металл несжимаем и, следовательно, не может быть использован в качестве термодинамического рабочего тела ЭУ. Но кинетическую энергию потоку металла можно передать при расширении сжатого рабочего тела - пара или газа – или механическим путём. Способы осуществления такого обмена энергиями могут быть различными.

Использование в ЭУ, работающей по циклу Ренкина, ядерного реактора с жидкометаллическим теплоносителем, МГД-генератора и МГД-насоса позволяет осуществлять прямое преобразование ядерной энергии в электрическую без движущихся частей (узлов). Термодинамический цикл и процессы в такой ЭУ близки к паротурбинным. Основная трудность МГД-преобразования заключается в эффективном разгоне жидкости или двухфазной смеси «пар-жидкость» в сопле при сохранении приемлемой электропроводности. Этот процесс, наряду с гидравлическими и тепловыми потерями, определяет к.п.д. таких установок.

В *однокомпонентной* схеме нагретый в источнике тепловой энергии (реактор, радиоизотопный источник, ВТО) до температуры T_r пар металла, обычно влажный, на входе в со-

пло с помощью добавок переводится в пенообразную двухфазную эмульсию (гель) с достаточной электропроводностью (рисунок 5). Такая эмульсия (гель) разгоняется в двухфазном сопле за счёт срабатывания давления до скоростей 30-100 м/с. Далее рабочее тело поступает в канал переменного сечения кондукционного или индукционного МГД-генератора и далее в диффузор. Из диффузора двухфазный поток отводится в конденсатор, охлаждается до температуры насыщения при давлении, близком к давлению на выходе из диффузора, и конденсируется. Образовавшийся жидкий металл сжимается с помощью МГД-насоса (или механического насоса) и направляется в нагреватель, замыкая цикл Ренкина.

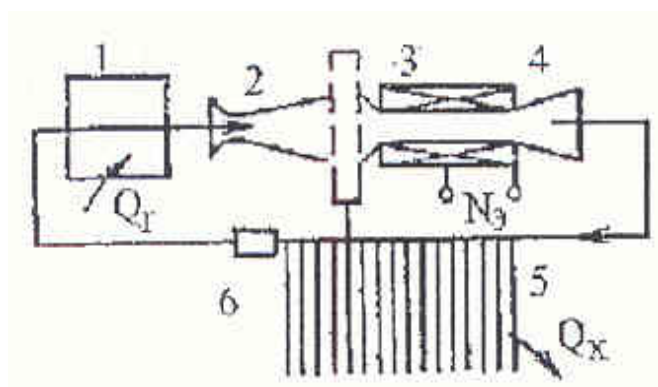


Рисунок 5 - Схема ядерной однокомпонентной энергоустановки с жидкометаллическим МГД-генератором: 1 – источник тепловой энергии, 2 – сопло, 3 – МГД-генератор, 4 – диффузор, 5 – конденсатор, 6 - МГД-насос

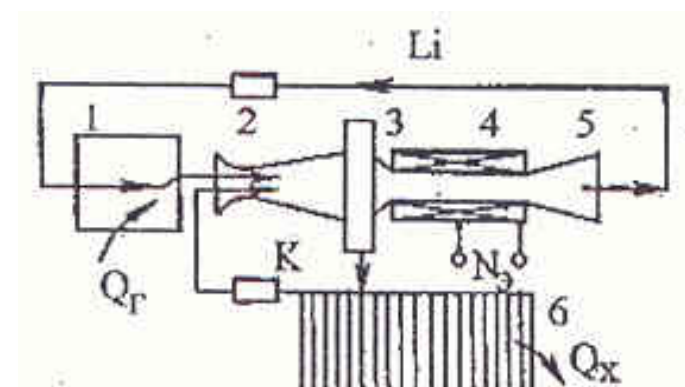


Рисунок 6 - Схема ядерной двухкомпонентной энергоустановки с жидкометаллическим МГД-генератором: 1 – источник тепловой энергии, 2 – сопло, 3 – сепаратор, 4 – МГД-генератор, 5 – диффузор, 6 – конденсатор

В двухкомпонентной схеме МЖ-МГДГ, более эффективной по разгону жидкого металла, используются два типа теплоносителя – высококипящий (литий $T'_{Li}=1620$ К) и низкокипящий (калий $T'_K=1036$ К или цезий $T'_{Cs}=945$ К) и два фазовых состояния – пар и жидкость (рисунок 6). Высококипящий жидкий компонент нагревается в источнике энергии до T_T и подаётся в смеситель, расположенный на входе в сопло. Туда же подаётся низкокипящий компонент (например, калий). Расходы компонент рассчитываются таким образом, чтобы после их смешения и теплообмена образовалась двухфазная смесь калиевого пара (носителя потенциальной энергии) с жидкими каплями лития при средней температуре T_{cm} . При квазиравновесном расширении в сопле двухфазная смесь разгоняется за счёт срабатывания давления газовой фазы до заданной скорости 50-100 м/с. В расположенном за соплом сепараторе (например, в виде наклонённой под углом к потоку пластины (клина)) жидкая фаза отделяется и её поток направляется в канал МГД-генератора. Далее жидкий литий с остаточной кинетической энергией замедляется в диффузоре, подаётся в МГД-насос, сжимается и на-

[Оглавление](#)

правляется в источник тепловой энергии. Пар калия из сепаратора поступает в холодильник-конденсатор, где охлаждается и конденсируется, и далее в жидком виде сжимается МГД-насосом и подаётся в смеситель. Давление на входе в сопло определяется условием существования сухого пара калия при температуре его кипения.

Открытая схема МГД-установок с использованием специальных топлив.

В таких установках обычно в качестве плазмообразующих топлив используются ракетные топлива (жидкие, твердые, гибридные, комбинированные и др.) или взрывчатые вещества, т.е. цикл таких установок термодинамически разомкнут (рисунки 7-9).

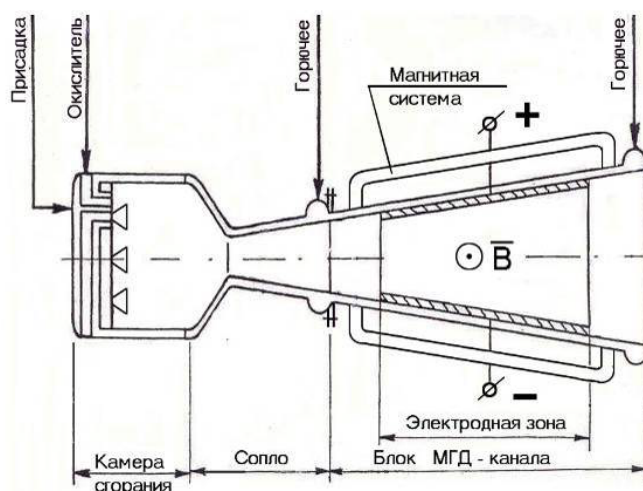


Рисунок 7 - Схема МГДГ кратковременного действия на жидком топливе

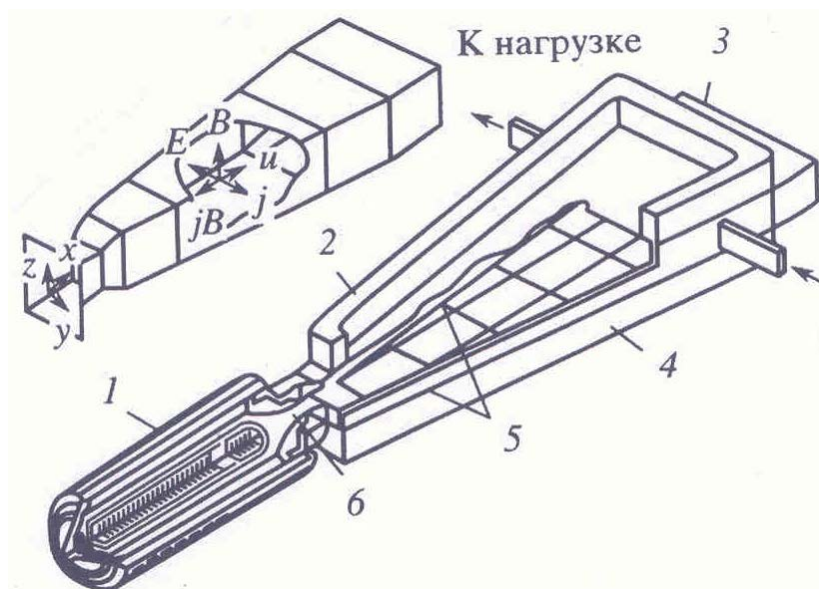


Рисунок 8 - Схема импульсного МГДГ на твердом (пороховом) плазмообразующем топливе: 1 – пороховой источник плазмы, 2 – магнитная система, 3 – выхлопной участок, 4 – МГД-канал, 5 – электроды, 6 – сопло

[Оглавление](#)

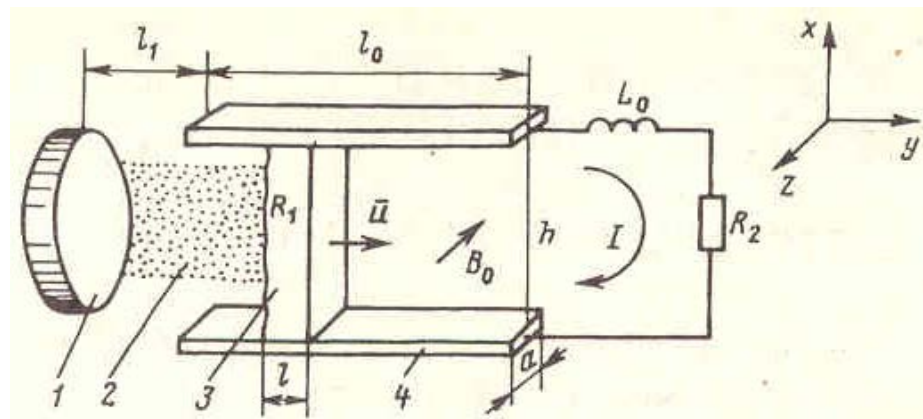


Рисунок 9 - Схема взрывного МГДГ с линейным каналом: 1 – заряд ВВ с присадкой, 2 – поток продуктов детонации, 3 – плазменный сгусток, 4 – электроды МГД-канала

Принципиальным является разделение МГДП по времени генерации (потребления) мощности и режиму работы (циклограмме): стационарные (тысячи часов) (рис.2-6), кратковременного действия (минуты-десятки минут) (рис.7, см. п.10), импульсные (секунды-десятки секунд) (рис.8, см. п.10), взрывные (0.1-1 мс) (рис.9, см. п.10). Это определяет структурную и электрическую схемы, тип системы охлаждения МГДГ и характеристики ЭУ с МГДГ.

В МГД-ускорителях плотных плазменных сред происходит обратное МГД-генератору преобразование вида энергии, т.е. подводимая электрическая энергия преобразуется в кинетическую и тепловую. В канале МГД-ускорителя происходит ускорение плазменной среды под действием пондеромоторной силы (силы Ампера), что позволяет получать в лабораторных условиях гиперзвуковые скорости потока, характерные для аэрокосмических полётов.

При скоростях воздушного или газового потока с числом Маха $M > 10$ температура (энтальпия) и давление торможения достигают величин, недостижимых при сжигании химических топлив (> 10 кК, > 20 МДж/кг, ≥ 1000 ат соответственно).

МГД-ускорители уже нашли практическое применение в составе аэродинамических труб для моделирования аэрокосмических полётов и высокоскоростных обтеканий тел (конструкций).

На рисунке 10 показана типичная структурная схема гиперзвуковой аэродинамической трубы с МГД-ускорителем (Россия, США). К настоящему времени на такой трубе достигнуты скорости потока воздуха и азота до 12 км/с. Переход на более лёгкие газы (водород, гелий) позволит увеличить скорость в 2-3 раза.

Оглавление

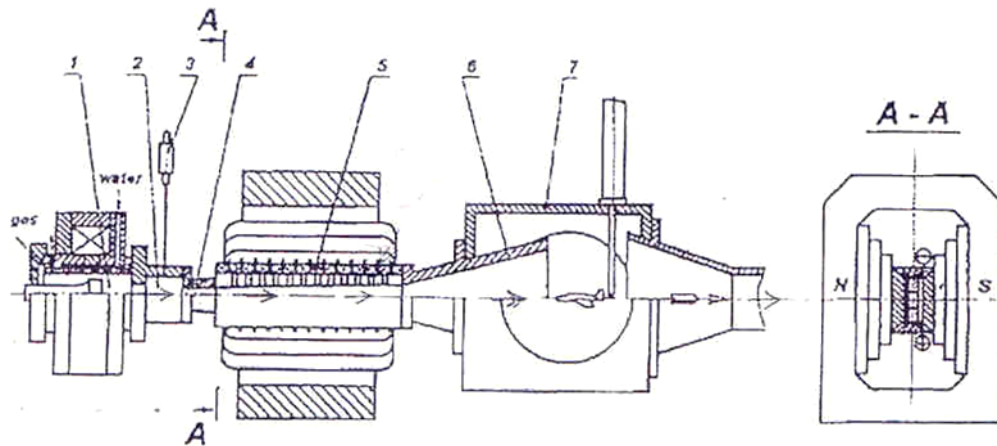


Рисунок 10 - Структурная схема гиперзвуковой аэродинамической трубы с МГД-ускорителем

Основными проблемами эффективного использования МГД-ускорителей в составе аэродинамических труб является создание электропроводности газообразных сред и режима МГД-взаимодействия, обеспечивающего значительное (на порядок) превышение работы пондеромоторной силы $A = [j \times B] \cdot v$ над джоулевым тепловыделением j^2/σ . В противном случае характеристики МГД-ускорителя будут приближаться к параметрам электротермического нагревателя (трубы).

Электрическое питание комбинированной МГД-аэродинамической трубы требует больших электрических мощностей (энергий) – на уровне ≥ 10 МДж на 1 кг рабочего тела. Оказалось, что в ряде случаев для этого целесообразно использовать в качестве источника электрической энергии автономный МГД-генератор импульсного или кратковременного действия.

Другим перспективным направлением применения МГДУ является их использование в составе или как дополнение к двигательным (силовым) установкам воздушно-космических систем (ВКС).

Идея их применения состоит в том, что необходимое для эффективного сжигания топлива в камере сгорания торможение гипер- или сверхзвукового потока воздуха, поступающего в воздухозаборник двигателя (прямоточного или турбореактивного), происходит не в ударных волнах, а во «внешнем» МГД-генераторе, расположенном до воздухозаборника, и (или) «внутреннем» МГД-генераторе, расположенном за диффузором (рисунки 11а,б). Получаемая в этих МГД-генераторах электрическая энергия перебрасывается (байпасируется), обходя камеру сгорания, к МГД-ускорителю, расположенному за камерой сгорания (рисунок 11а,б,в). Такая система называется комбинированным (байпасным) реактивным двигателем (КРМД) (рисунок 11г). При этом часть электрической энергии, вырабатываемой МГД-

Оглавление

генераторами, может использоваться для электропитания энергоёмкого бортового оборудования.

Одной из расширенной разновидностей КРМД является магнитоплазмохимический двигатель (МПХД), в котором предлагается осуществлять термохимическое разложение керосина за счёт тепла, выделяющегося при торможении гиперзвукового потока, с целью получения водорода и его последующего использования в качестве высокоэнтальпийного горючего.

Основной проблемой, сдерживающей техническую реализацию КРМД, является создание электропроводности воздушного потока до камеры сгорания, необходимой для эффективного МГД-преобразования энергии. Для этого теоретически и экспериментально исследуются ионизация потока воздуха с помощью электронных пучков, СВЧ-излучения и впрыска щелочных металлов.

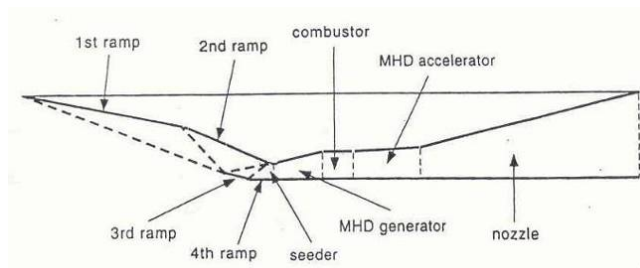


Рисунок 11а - Принципиальная схема гиперзвукового ВКС с КРМД

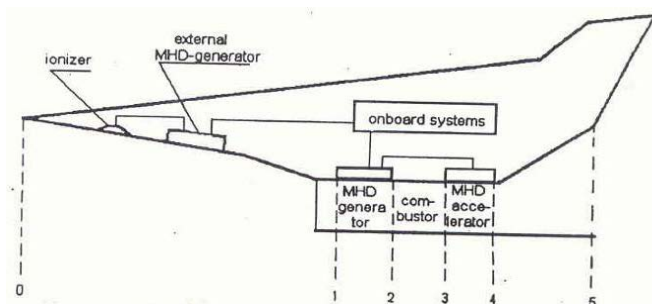


Рисунок 11б - Структурная схема гиперзвукового ВКС с КРМД

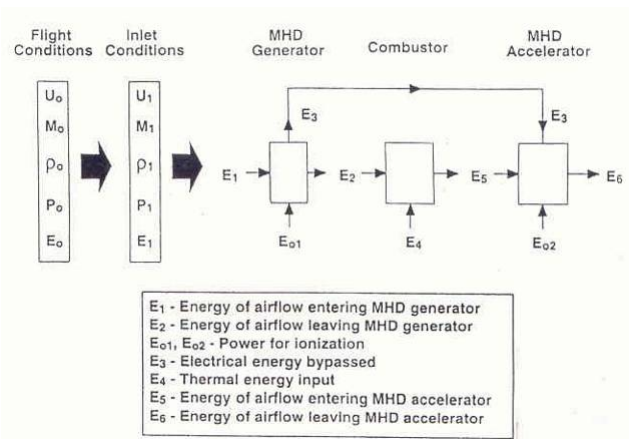


Рисунок 11в - Схема энергетических потоков в гиперзвуковом ВКС с КРМД

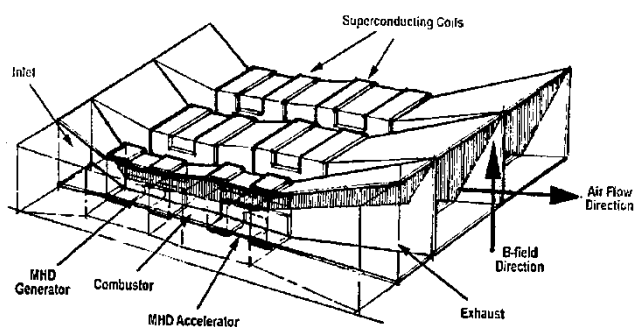


Рисунок 11г - Структурная схема КРМД

Рисунок 11 - Схемы гиперзвукового ВКС с КРМД

[Оглавление](#)

В настоящее время интенсивно развиваются расчётно-теоретические и экспериментальные исследования МГД-ускорителей плотных плазменных сред для космических двигательных установок, которые иногда называют магнитоплазменными двигателями (рисунок 12). В таких ускорителях удельный импульс может составить 1000-5000 с в зависимости от плотности плазмы.

Другие разрабатываемые направления плазменной магнитной газо- и аэродинамики приводятся в разделе 10.

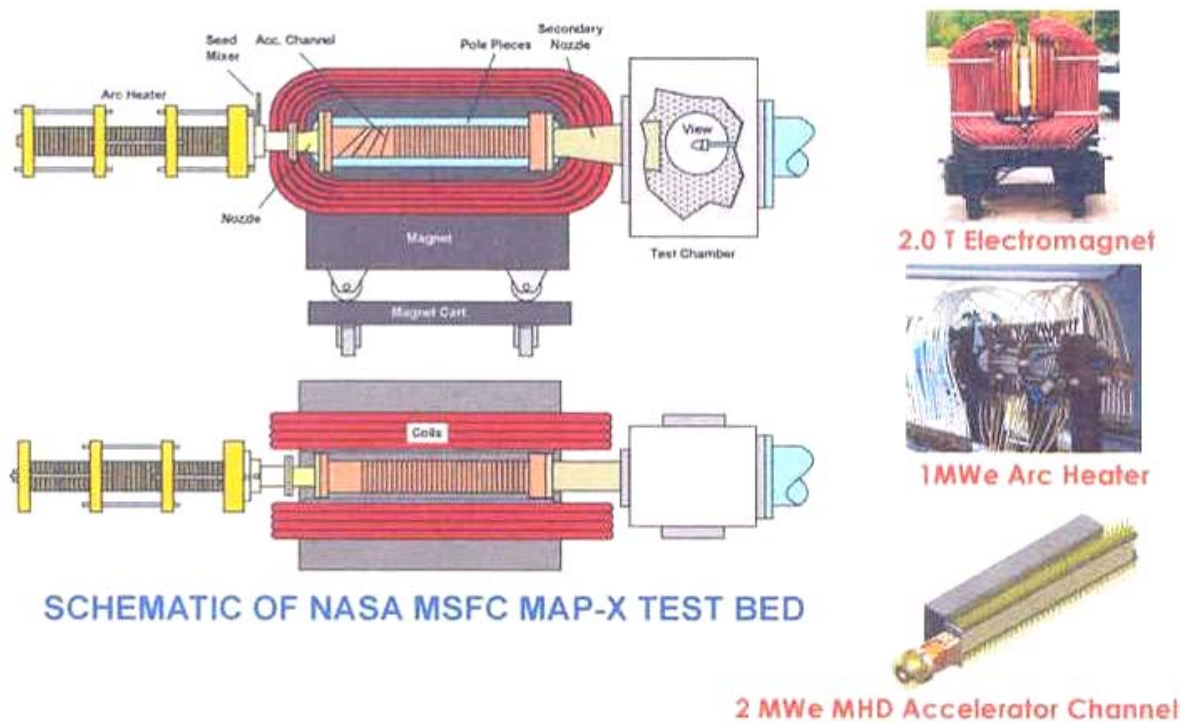


Рисунок 12 - Структурная схема экспериментального МГД-ускорителя NASA (США, 2010 г.)

3. Основные элементы (узлы), критерии и масштабы процессов в МГД-преобразователях

Принцип действия, схема и структура МГДГ определяют основные процессы в них: плазмохимические, газо(гидро)динамические, теплофизические, электрофизические, механические (силовые), приэлектродные. Каждый процесс характеризуется набором определяющих параметров, критериев и масштабов. Так как МГДГ является многопараметрическим техническим устройством, то пространственные масштабы процессов изменяются от 10^{-7} м до ~ 100 м, а временные – от 10^{-11} с до 1 года. За линейный масштаб принимается длина канала L , а за характерное время – время движения (пролёта) рабочего тела через МГД-канал $t_{пр} = L/v$. Процессы в МГДГ характеризуются, наряду с известными критериями, такими как числа M , Re , Pr , St , Sh , Fo и другие, рядом новых критериев или чисел, показывающих

[Оглавление](#)

соотношение между различными видами сил и энергий. К их числу относятся прежде всего такие, как η_N - коэффициент преобразования энергии или энтальпии (к.п.э.) $\eta_N = N_3 / N_{T1}$ ($N_{T1} = m \cdot h_{01}$ - тепловая мощность потока на входе, h_{01} - удельная энтальпия торможения (полная) на входе, m [кг/с] – массовый расход рабочего тела), $\eta_e = N_3 / A$ - электрический к.п.д. ($A = N_3 + Q_{дж}$ – работа пондеромоторной силы в единицу времени, $k = E / (v \cdot B)$ – коэффициент электрической нагрузки, $\beta = \omega_e \cdot \tau_e$ - параметр Холла для электронов. Основными критериями являются: магнитное число Рейнольдса $R_m = \mu_0 \cdot \sigma \cdot v \cdot L$, $L_T = \rho \cdot v / (\sigma \cdot B^2)$ - длина МГД- взаимодействия (торможения), $S_u = \sigma \cdot B^2 \cdot L / (\rho \cdot v) = L / L_T$, $S_p = \sigma \cdot v \cdot B^2 \cdot L / \rho$ - критерии Стюарта по кинетической и потенциальной энергии соответственно, $Ha = B \cdot a \cdot \sqrt{(\sigma / \eta)}$ - критерий Гартмана (η - динамическая вязкость), $A = v_A / v$ - число Альфвена [$v_A = B / \sqrt{(\mu_0 \cdot \rho)}$]-и ряд других.

4. Основные характеристики МГД- преобразователей

Характеристики МГДГ подразделяют на интегральные, локальные и удельные. Эти величины характеризуют разнородные параметры (энергетические, электрические, массо-габаритные и др.) конкретного МГДГ как в целом (интегральные), так и параметры процессов в нём, относящиеся к определённому месту (локальные), и его универсальные показатели (удельные), не связанные с масштабом и типом МГДГ.

Типичными *интегральными* характеристиками МГДГ являются время и режим работы, масса и расход рабочего тела, входная (N_{T1}) и выходная (N_{T2}) тепловая мощности, напряжение, ток, электрическая мощность канала (брутто) N_3 , выходная электрическая мощность (нетто), сопротивление (импеданс) нагрузки, токи утечки, массы и размеры узлов и МГДГ в целом, количество выработанной энергии (Q_3), быстродействие, ресурс, стоимость и т.д.

К основным *локальным* (в точке или сечении МГД-канала) характеристикам относятся значения термогазодинамических, электромагнитных и энергетических переменных, плотность пондеромоторной силы $\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$ [Н/м³], плотности электрической мощности $N_{уд} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$ [Вт/м³] и джоулева тепловыделения $q_{дж} = \mathbf{j}^2 / \sigma$ [Вт/м³], плотность работы силы f , совершаемой в единицу времени, $A = \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} = N_{уд} + q_{дж}$, приэлектродное падение напряжения ΔV_3 , коэффициент электрической нагрузки $k = E / (v \cdot B)$ и т.д. В МГДГ значения $N_{уд}$ и A являются отрицательными, т.е. энергия и импульс потока плазмы уменьшаются. Большое значение имеют локальные электрический к.п.д. $\eta = N_{уд} / A = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} / (\mathbf{j} \times \mathbf{B} \cdot \mathbf{v})$, значение которого совпадает с коэффициентом электрической нагрузки $\eta = k$ для фарадеевского МГД-канала, и политропический к.п.д. процесса $\eta_p = dh_0 / dh_{0из}$, который является мерой необратимости бесконечно малого процесса в

области текущих параметров h_0 , p_0 (h_0 -удельная энтальпия торможения, индекс «из» означает изэнтропический процесс). Для каждого типа МГДГ джоулева диссипация должна быть оптимизирована (минимизирована) для получения максимально возможного значения электрического к.п.д., т.к. при $\eta \rightarrow 1$ полезная мощность $N_{уд} \rightarrow 0$. Без учёта тепловых потерь и потерь на трение η и η_n связаны простым соотношением, показывающим возрастающее влияние джоулевой диссипации при росте числа M , $\eta_n = \eta / [1 + 0.5 \cdot (\gamma - 1) \cdot M^2 \cdot (1 - \eta)]$, т.е. $\eta_n < \eta$. Локальную эффективность процесса преобразования энергии характеризует локальный внутренний (турбинный) относительный к.п.д. $\eta_{oi} = dN_3 / d[m \cdot h_{0из}]$.

Удельными характеристиками МГДГ являются все типы интегральных к.п.д., прежде всего коэффициент преобразования энергии (к.п.э.) $\eta_N = N_3 / N_{T1}$, средняя объёмная $\langle N_{уд} \rangle$ и линейная $\langle N_L \rangle = N_3 / L$ (L -длина МГД-канала) плотности электрической мощности, удельный энергосъём $q_{уд} = N_3 / m$ [Дж/кг], удельные мощностная [Вт/кг] и энергетическая [Дж/кг] массы, плотность оборудования [кг/м³], удельная стоимость (капитальные затраты) [Долл.(руб.)/кВт] и ряд других.

Для энергетических установок большое значение имеет полный внутренний (относительный или турбинный) к.п.д., который определяется, как и для газовой турбины, соотношением $\eta_{oi} = N_3 / (h_{01} - h_{02})_{из}$, где индексом «из» обозначен изэнтропический процесс расширения от давления p_{01} до p_{02} . Он показывает степень отклонения реального процесса, связанного с джоулевыми, тепловыми и гидравлическими потерями, от идеального (изэнтропического) при одинаковом изменении полного давления $\pi_{21} = p_{02} / p_{01} = idem$.

Эффект возврата тепла, характерный для любого термодинамического устройства, приводит к тому, что полный внутренний к.п.д. всегда больше локального политропического к.п.д.: $\eta_{oi} > \eta_n$. Это видно из соотношения, полученного для идеального газа с учётом связи между термодинамическими величинами в изэнтропическом процессе $(h_{02} / h_{01})_{из} = (T_{02} / T_{01})_{из} = [(p_{02} / p_{01})_{из}]^{(\gamma-1)/\gamma}$: $\eta_{oi} = [1 - (\pi_{21})^{\eta_n \cdot (\gamma-1)/\gamma}] / [1 - (\pi_{21})^{(\gamma-1)/\gamma}]$ и $\lim(\eta_{oi}) \rightarrow 1$ при $\pi_{21} \rightarrow 0$.

Если пренебречь тепловыми и гидравлическими потерями, то с учётом $(h_{01} - h_{02}) = N_3 / m$ связь между η_{oi} и η_N примет вид: $\eta_{oi} = \eta_N / [1 - (\pi_{21})^{(\gamma-1)/\gamma}]$ или $\eta_{oi} = \eta_N / [1 - (T_{02} / T_{01})_{из}]$.

5. Рабочие тела плазменных МГД-генераторов

По типу используемых рабочих тел МГД-преобразователи делятся на плазменные, жидкостные и многофазные. Состав и свойства электропроводных рабочих тел оказывают определяющее влияние на тип, характеристики и технический облик МГДП.

Основными типами плазмообразующих сред, которые используются в МГДГ, являются следующие.

Продукты сгорания ископаемых горючих (уголь, мазут, природный газ, сланцы) в обогащённом (до 50%) кислородом воздухе. Уровень достигаемых температур в камере сгорания $T_0=2700 - 3200$ К при давлениях p_0 до 10 атм, электропроводностей высокоскоростных потоков – до 20 См/м.

Углеводородные горючие и их производные (керосин, толуол, бензин, спирт, отработанные технические масла и т.п.), сжигаемые в обогащённом (до 50%) кислородом воздухе, кислороде и других окислителях. Уровень достигаемых температур в камере сгорания - до 3500 К при давлениях p_0 до 5 МПа, электропроводностей – до 50 См/м.

Специальные химические горючие, в том числе с добавками лёгких металлов (Al, Mg, В, Ве и др.) и **взрывчатые вещества**: газообразные, жидкие, в том числе криогенные (H_2+O_2), гибридные, комбинированные, пастообразные, твёрдые унитарные (пороховые). В качестве окислителей используются кислород, перекись водорода, закись азота, азотная кислота и другие. Уровень достигаемых температур в камере сгорания – до 5000 К при давлениях до 10 МПа, электропроводностей высокоскоростных потоков – до 200 См/м.

Одно- и двухатомные газы и пары (H_2 , N_2 , He, Ar, Ne и др.), нагреваемые в высокотемпературных устройствах (высокотемпературные ядерные реакторы (ВТЯР), стационарные и инерциальные термоядерные реакторы (ТЯР), высокотемпературные теплообменники, концентраторы излучения и др.). Уровень достигаемых температур– до 3000 К при давлениях до 100 ат, электропроводностей высокоскоростных потоков равновесной плазмы – до 50 См/м.

Жидкие металлы, их сплавы (эвтектики), растворы, двухфазные электропроводные среды (гели) (температура – до 1100 К), такие как чистые металлы K, Na, Li, Hg, Bi и другие, Na-K, Pb-Bi, Cs-Li, Rb-Li, R-Li, Na-Li, In-Ga-Sn и др.

Неравновесная плазма инертных газов и, возможно, водорода. Уровень температур торможения газа – 1800-2500 К при давлениях до 3 МПа, электропроводностей высокоскоростных потоков с присадкой Cs – до 300 См/м, параметр Холла – до 20.

Наибольшее развитие получили плазменные МГДГ, рабочими телами которых являются продукты сгорания химических топлив или одно- и (или) двухкомпонентные смеси газов с присадкой (инертные газы, водород и др.).

Продукты сгорания химических топлив имеют сложный химический состав, который рассчитывается с помощью компьютерных программ (кодов), разработанных на основе определённых методов расчёта и баз данных по химическим реакциям и транспортным сечени-

ям рассеяния электронов на атомах и молекулах смеси. В качестве типичного примера на рисунке 13 приведен состав продуктов сгорания керосина в кислороде с присадкой 1% (по массе) калия и его зависимость от температуры.

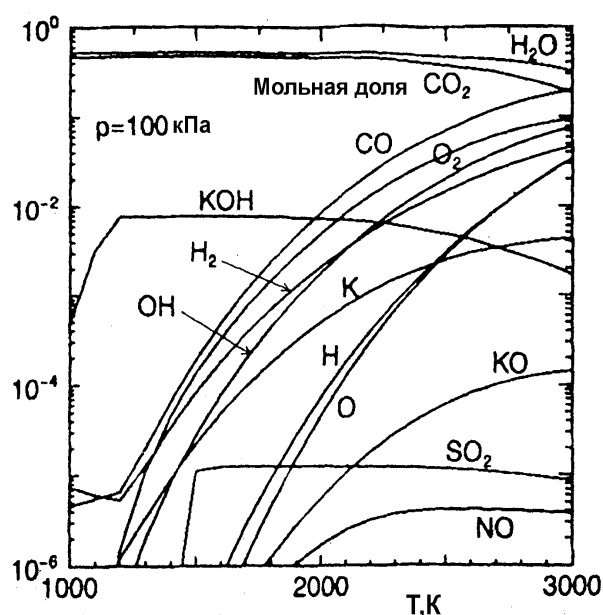


Рисунок 13 - Зависимость состава продуктов сгорания (мольные доли) керосина в кислороде с присадкой 1% (по массе) калия от температуры

Идея использования небольшой (~1% мольных) добавки, называемой присадкой, атомов с низким ($I_s=4\div6$ эВ, 1 эВ=11610 К) потенциалом ионизации, которыми являются атомы щелочных металлов (калий, цезий, натрий, литий, рубидий), к основной компоненте рабочего тела позволило качественно увеличить электропроводность рабочих тел и довести её величину до необходимой для эффективного МГД-преобразования энергии значения ≥ 10 См/м при приемлемых температурах (≤ 2500 К).

Такие рабочие тела представляют низкотемпературную плотную плазму с типичными статическими (в потоке) температурами 1500 К - 3000 К и давлениями 0.1 – 10 ат, концентрацией электронов 10^{13} - 10^{17} см⁻³. Течение химически реагирующей смеси газов в МГД-канале можно считать, кроме особых случаев, квазиравновесным, т.к. время пролёта на два порядка больше времён установления химического и ионизационного равновесий.

Если все частицы в плазме находятся в термодинамическом равновесии при одинаковой температуре, а нейтральные частицы ионизируются «быстрыми» электронами, то ионизация называется термической, а плазма – равновесной или изотермической. Её свойства определяются исходным составом (концентрацией компонент), давлением (плотностью) и температурой, для расчёта которых используются вычислительные программы (коды).

[Оглавление](#)

Ниже приводятся соотношения, позволяющие рассчитать транспортные свойства плазмы, причём в ряде случаев с достаточной для технических приложений точностью.

Плотность электронов в термодинамически равновесной плазме определяется химическим законом действующих масс с константой ионизационного равновесия в форме уравнения Саха. В однокомпонентной плазме количественная связь между концентрациями частиц n_e , n_i и n_a [1/м³] описывается уравнением Саха, названного в честь индийского астрофизика, установившего это соотношение: $n_e n_i / n_a = f(T) = C_s \cdot (g_e g_i / g_a) \cdot T^{3/2} \cdot \exp[-I_s / (kT)]$. Здесь константа $C_s = (2\pi m_e k / h^2)^{3/2} = 2.42 \cdot 10^{21}$ [м⁻³К^{-3/2}], I_s - энергия (потенциал) ионизации атома, которая может выражаться в Дж, эВ или К (1 эВ=11610 К); $h=6.63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка; $g_a = \sum g_{aj} \cdot \exp[-E_j / (kT)] \approx g_{a0} + g_{a1} \cdot \exp[-E_1 / (kT)]$, $g_e=2$, g_{i0} , g_{a0} , g_{a1} - кратность вырождения (статистический вес) электрона, основного состояния иона, основного и первого возбужденного (энергия E_1) состояния атома, которые определяются внутренними степенями свободы. Так как $E_1 > 1$ эВ, то при $T < 4000$ К $g_a = g_{a0} + 0(0.1) \approx g_{a0}$.

Степенью ионизации компоненты плазмы называется отношение $\alpha_j = n_{ij} / n_{oj}$, где $n_{oj} = n_{aj} + n_{ij} = \text{const.}$ - начальная концентрация атомов j-го сорта. Для однокомпонентной плазмы $\alpha = n_e / n_0 = n_e / (n_a + n_e)$ и концентрация электронов определяется из решения квадратного уравнения $n_e^2 + f \cdot n_e - f \cdot n_0 = 0$, которое получается из уравнения Саха при $n_a = (n_0 - n_e)$:

$$n_e = +\sqrt{[(f/2)^2 + f \cdot n_0] - f/2}.$$

При $\alpha \ll 1$ плазма называется слабоионизованной. В плазме с легкоионизирующейся присадкой (добавкой) учитывают как степень ионизации присадки $\alpha_s = n_{es} / n_{s0}$, так и плазмы в целом $\alpha = n_e / (n_{s0} + n_{g0})$. Для плазмы с присадкой (индекс "s") удобно использовать мольную (объёмную) долю присадки в основном газе: $\kappa_s = n_{s0} / (n_{g0} + n_{s0})$, которую с учётом $n_{s0} \ll n_{g0}$ обычно записывают приближённо в виде $\kappa_s \approx n_{s0} / n_{g0}$. Если основной газ не ионизируется, то $n_e = n_{es}$, $\alpha = \alpha_s [\kappa_s / (1 + \kappa_s)] \approx \alpha_s \kappa_s$.

В случае слабой ионизации $n_e \ll n_a$ получаем простое выражение для концентрации электронов:

$$n_e = \sqrt{(n \cdot f)} \approx \sqrt{(n_0 \cdot f)} \approx \sqrt{n_0 \cdot \exp[-I_s / (2kT)]}.$$

При малой степени ионизации n_e и, следовательно, σ являются экспоненциальными («сильными») функциями температуры: $\sigma \sim n_e \sim \exp[-I_s / (2k \cdot T)]$ или в дифференциальной форме $dn_e / n_e = 1/2 [3/2 + I_s / (kT)] dT / T \approx [I_s / (2kT)] dT / T$. Это ограничивает снизу допустимую температуру равновесной плазмы на выходе из канала уровнем ≈ 2000 К.

Оглавление

На рисунке 14 показана расчётная зависимость электропроводности водорода с 0.1%(мольный) присадкой Cs от температуры для различных давлений. Отметим, что для плазмы с присадкой при температуре электронов $\approx 0.1 \cdot I_s \approx 5000$ К присадка почти полностью ионизируется ($n_e \rightarrow n_{so}$), n_e и σ уже слабо зависят от температуры. При дальнейшем повышении температуры начинается ионизация основного газа (на рисунке 14 – при температуре ≥ 6000 К).

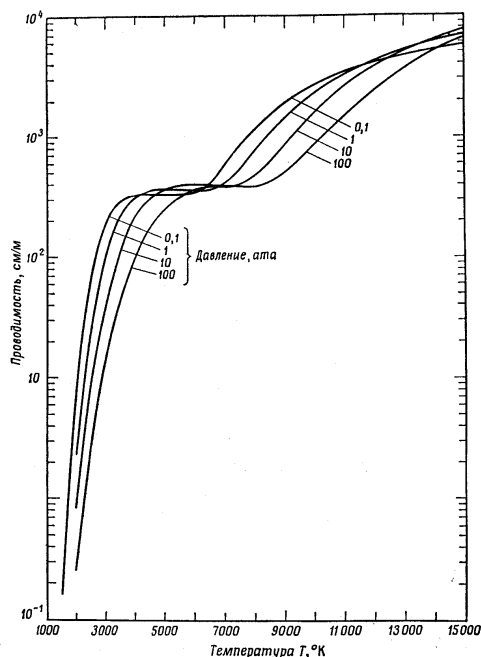


Рисунок 14 - Зависимость электропроводности водорода с 0.1%(мольный) присадкой Cs от температуры для различных давлений

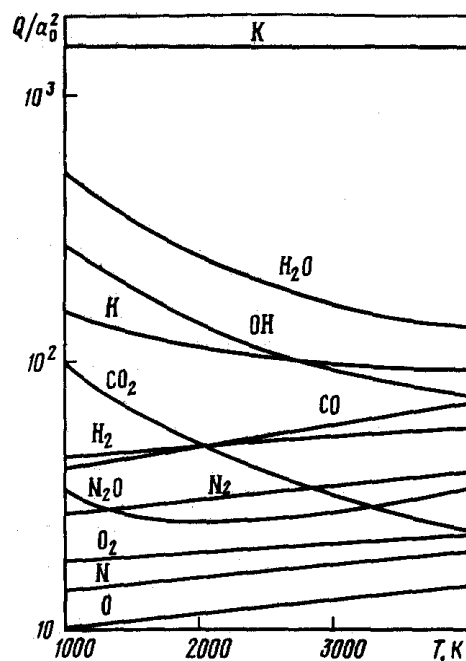


Рисунок 15 - Зависимость транспортных сечений рассеяния электронов для газов от температуры ($a_0^2 = 2.80 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$)

Электропроводность (σ) и подвижность электронов (μ_e) определяются концентрацией электронов n_e , образующихся в основном за счёт ионизации атомов присадки в смеси, и их подвижностью: $\sigma = e^2 \cdot n_e \cdot \tau_e / m_e = e \cdot n_e \cdot \mu_e = 2.81 \cdot 10^8 n_e \tau_e$ [См/м], $\mu_e = (e/m_e) \tau_e$ [1/Тл], где $\tau_e = l_e / v_e$, v_e - среднее время передачи импульса от электрона к тяжелым частицам (время между столкновениями или пробега электрона) и частота столкновений электронов с потерей импульса с частицами смеси $v_e = 1/\tau_e$, $l_e = 1/(n_i Q_{ei} + n_a Q_{ea})$ – расстояние (длина) пробега электрона с передачей импульса; Q_{ej} [м²]-среднее сечение столкновения электрона с j-ой частицей с передачей импульса (транспортное сечение).

Усреднённое транспортное сечение $\langle Q_{ej} \rangle(T)$ (его также называют средним диффузионным сечением или сечением проводимости) зависит только от температуры и его значение для различных атомов приводится в соответствующей литературе. На рисунке 15 и в таблице 102 и приведены усреднённые транспортные сечения рассеяния электронов для основных

компонентов продуктов сгорания химических топлив, а также для атомов He, Ar, K, Cs. Наибольшими сечениями обладают атомы калия ($\approx 5.5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$) и цезия ($4 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$), а также других щелочных металлов. Наименьшие сечения имеют атомы инертных газов Ar, Ne ($\sim 5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$).

Таблица 102. Усреднённые транспортные сечения, произведения $Q_{ea} \cdot m_a$, $Q_{ea} \cdot \sqrt{m_a}$ и характерные подвижности электронов

Газ	Атомная масса	Транспортное сечение, $Q_{ea} \times 10^{16}$, см^2 при $T_e = (2-3) \text{ кК}$	$Q_{ea} \cdot m_a$	$Q_{ea} \cdot \sqrt{m_a}$	μ_e , Тл^{-1} при $p=1 \text{ ат}$ и $T_e=2 \text{ кК}$
He	4	5.7 - (6.3)	23	11.4	2.8
Ne	20.2	1.1 - (1.4)	22	5	14.5
Ar	40	0.4 - (0.7)	16 - (28)	2.5 - (4.4)	21
H ₂	2	11 - (14)	23	16	1.3
N ₂	28	6 - (9)	168	32	2.6
Воздух	29	8	232	43	-
Li	7	150 - (230)	1050	397	-

Сечение электрон-ионных столкновений (кулоновское) является универсальным и вычисляется по формуле Спитцера $Q_{ei}(v_e) = \frac{z^2 e^4 \ln \Lambda}{4\pi \varepsilon_0 m_e^2 v_e^4} \sim v_e^{-4} \sim T^{-2}$, что позволяет точно вычислить среднюю частоту и электропроводность:

$$\langle v_{ei} \rangle = \frac{4\sqrt{2\pi}}{3} n_e \left(\frac{m_e}{kT_e} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi \varepsilon_0 m_e} \right)^2 \ln \Lambda = 3.64 \cdot 10^{-6} \cdot n_e \cdot \ln \Lambda^{3/2},$$

$$\sigma_K = 1.98 e^2 n_e / (m_e \langle v_{ei} \rangle) = 5.58 \cdot 10^{-8} \cdot n_e / v_{ei} \sim T^{3/2}, \quad (k_\sigma = 1.98).$$

Усреднённое по скорости (энергии) электронов кулоновское, т.е. между электроном и ионом, сечение с передачей импульса составляет достаточно большую ($\sim 10^{-12} \text{ см}^2$) величину $\langle Q_{ei} \rangle = 6\pi \langle b_0^2 \rangle \ln \Lambda = 5.85 \cdot 10^{-10} \ln \Lambda / T^2 [\text{м}^2]$, а

$$\langle b_0^2 \rangle = \left[\frac{ze^2}{12\pi \varepsilon_0 kT} \right]^2 = \frac{5.56 \cdot 10^{-6}}{T} [\text{м}], \quad \text{где } \Lambda = 3 / (2e^3) (4\pi \varepsilon_0 kT)^{3/2} / (\pi n_e)^{1/2} = 1.24 \cdot 10^7 (T^3 / n_e)^{1/2},$$

$\ln \Lambda$ - кулоновский логарифм и его величина для низкотемпературной плазмы изменяется в интервале $5 \div 10$.

Если в смеси имеется несколько сортов атомов и (или) молекул, то частота определяется как сумма парциальных частот $\langle v_e \rangle = \sum \langle v_{ej} \rangle$, откуда следует правило аддитивности (правило Фроста) для удельного электрического сопротивления смеси газов: $\sigma^{-1} = \sum \sigma_j^{-1}$.

Оглавление

Для технических расчётов электропроводности соотношение $\langle 1/v_e \rangle$ заменяется на $1/\langle v_e \rangle$, а среднее значение $\langle v_e \rangle$ – на произведение средних величин – $\langle v_{ej} \rangle(T) = n_j \langle Q_{ej}(T) \cdot v_e \rangle \approx n_j \langle Q_{ej}(T) \rangle \langle v_e \rangle$. Погрешность такого приближения учитывается путём введения поправочного (кинетического) коэффициента K_σ в формулу для проводимости:

$$\sigma = k_\sigma \cdot \frac{e^2 \cdot n_e}{m_e \cdot \langle v_e \rangle} = 2.82 \cdot 10^{-8} \cdot k_\sigma \cdot n_e / \langle v_e \rangle \text{ [См/м]}.$$

Подвижность электронов определяется по среднему значению $\langle v_e \rangle$
 $\mu_e = 1.76 \cdot 10^{11} / \langle v_e \rangle [\text{Тл}^{-1}]$, а коэффициент диффузии электронов D_e [м²/с] – по соотношению Эйнштейна $D_e / \mu_e = kT/e$.

В качестве среднего значения скорости электронов $\langle v_e \rangle$ обычно используются средняя арифметическая скорость их теплового движения $\langle v_e \rangle = [8kT_e / (\pi m_e)]^{0.5} = 6.21 \cdot 10^3 \sqrt{T_e}$ [м/с].

Подвижность электронов определяет параметр Холла для электронов $\beta = \mu_e \cdot B = \omega_e \cdot \tau_e$ ($\omega_e = (e/m_e) \cdot B = 1.76 \cdot 10^{11} \cdot B$ [1/с]) – циклотронная частота вращения электронов, обычно $\beta < \beta_i$ для ионов), который показывает степень их замагниченности в плазме.

На практике для расчета электрической проводимости в ограниченном диапазоне изменения параметров плазмы часто используется понятие “опорных” (или реперных) значений подвижности электронов μ_e^* и электрической проводимости σ^* плазмы при некоторых характерных (расчётных или экспериментальных) параметрах, обычно p^* и T^* .

Пренебрегая изменением K_σ и $\langle Q_{ej} \rangle$, а также считая, что относительная концентрация частиц разного сорта мало изменяется в рассматриваемом интервале температур, можно получить следующие соотношения:

$$\mu_e = \mu_e^* (p^*/p) \sqrt{(T/T^*)}, \quad \sigma = \sigma^* (p^*/p)^{0.5} (T/T^*)^{0.75} \exp[I_s / (2kT^*) (1 - T^*/T)].$$

Удобство такой записи, помимо всего прочего, заключается в том, что в качестве μ_e^* , σ^* , p^* , T^* можно использовать их экспериментальные значения.

Если ионизация атомов не определяется температурой частиц газа, т.е. не является термической, то она называется неравновесной ионизацией, а образующаяся *плазма – неравновесной*. Стационарная неравновесная ионизация возникает при таком подводе энергии (нагреве) к электронному газу (или быстром охлаждении тяжёлых частиц), при котором температура электронов T_e становится существенно выше температуры тяжёлых частиц T (отрыв T_e). Такой селективный нагрев электронного газа может быть осуществлён различными способами.

Оглавление

В стационарной неравновесной плазме концентрация электронов также определяется уравнением Саха, но при подстановке в него вместо температуры газа температуры электронов. В канале МГДГ нагрев электронов происходит за счёт джоулева тепловыделения при протекании рабочего тока с объёмной плотностью $q_{дж} = j^2/\sigma$. Температура T_e определяется с помощью уравнения энергии для электронного газа. Используя уравнение баланса энергии электронов можно показать, что относительный «отрыв» электронной температуры от температуры тяжелых частиц составляет $\delta T_e = (T_e - T)/T = [(1-\eta)\gamma M^2 \beta^2]/(3\delta) \approx 0.1 M^2 \beta^2$ и для типичных условий МГДГ на инертных газах при $\gamma=5/3$, $\delta=1$, $M \geq 1$, $\beta \geq 3$ достигает $\delta T_e \geq 1$, т.е. $T_e \approx 4000$ К (здесь δ - коэффициент неупругих потерь).

Оптимальными рабочими телами для МГДГ на неравновесной плазме являются одноатомные инертные газы (He, Ar, Ne). В этих газах электроны испытывают упругие столкновения ($\delta=1$), значения произведений $m \cdot Q_{ea}$ и $Q_{ea} \cdot (m)^{1/2}$ малы, что обеспечивает, особенно с присадкой цезия, высокие значения отрыва температуры δT_e , σ , β и энергетического комплекса σv^2 (таблица 102). Для предварительной ионизации потока равновесной плазмы, поступающего из сопла, повышения температуры электронов и получения устойчивого потока неравновесной плазмы с $T_e \gg T$ перед входом в МГД-канал устанавливается специальное устройство, которое получило название предиионизатор. В этом устройстве происходит ионизация поступающего из сопла равновесного течения газа с присадкой с низкой температурой $T_e \approx T$, например, с $T=1500$ К и нагрев электронов до высокой температуры на входе в МГД-канал ($T_e \geq 3000$ К).

В качестве эффективного рабочего тела может использоваться неоднородная плазма, состоящая из чередующихся слоёв относительно холодного газа (основного энергоносителя) и токонесящего слоя плазмы с высокой электропроводностью. Для создания высокопроводящих слоёв используется специальное устройство – генератор слоёв плазмы. Возможны два способа инициирования слоёв плазмы на входе в канал – газоразрядный и тепловой. В первом случае слой создаётся в потоке газа без присадки, затем развивается и стабилизируется в результате перегревной неустойчивости в МГД-канале в так называемый Т-слой с температурой ~ 10 кК (МГДГ с Т-слоем). При тепловом способе создания высокопроводящих слоёв используются импульсное сжигание высокоэнтальпийных топлив с присадкой, продукты сгорания которых обеспечивают температуры в интервале 3300–3500 К и, следовательно, высокую электропроводность.

6. Электрические схемы каналов МГД-генераторов

Электрические поля и токи в плазменном объёме кондукционного МГД-генератора описываются обобщённым законом Ома и стационарным уравнением Максвелла $\text{rot } \mathbf{E}=0$. Эти уравнения обычно сводят к одному трёхмерному дифференциальному уравнению в частных производных 2-го порядка относительно потенциала φ , используя потенциальность электрического поля $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$. Для его решения задаются конфигурация расчётной области, граничные условия на электродных и изоляционных стенках газодинамического тракта, схемы электрического соединения узлов и электродов с внешней нагрузкой, условия нагружения. Наиболее полно исследована электродинамика линейных и дисковых каналов. При исследовании линейных каналов с целью упрощения полной задачи рассматривают поперечную (в плоскости «у-з») и продольную (в плоскости «х-у») электродинамические задачи.

В связи с частичной замагниченностью электронов в плазменном объёме кондукционного МГД-генератора возникает дрейфовый (холловский) ток в направлении $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ (эффект Холла). Наличие и влияние эффекта Холла обуславливает разнообразие электрических типов (схем) и определяет название каналов МГДГ.

Основными электрическими типами каналов кондукционных МГДГ, которые определяются направлением съёма генерируемого тока, схемой соединения электродов и подключением нагрузки, являются следующие четыре (рисунок 16): фарадеевский со сплошными (рисунок 16а) и идеально секционированными (рисунок 16б) электродами, холловский (рисунок 16в) и диагональный (или серийный, рамочный) (рисунок 16г,д). Последние три типа МГД-канала имеют секционированные электроды, т.е. разделённые в продольном направлении и изолированные друг от друга отдельные элементы. Фарадеевский канал называется так потому, что ток в нагрузку течёт по направлению индуцированной по закону Фарадея э.д.с. (по оси «у»). Схема соединения электродов определяет один из электрических параметров или устанавливает жёсткую связь между ними.

Так фарадеевский канал со сплошными электродами (рис.16а) имеет одну нагрузку, в локальном («нуль-мерном») приближении характеризуется отсутствием продольного электрического поля ($E_x=0$), что приводит к простым соотношениям между электрическими величинами j_x , j_y , E_y . Короткозамкнутый холловский ток j_x течёт по плазме вдоль потока, а обратно – по сплошным электродам.

Так как эффективная (поперечная) проводимость $\sigma_{\perp} = \sigma / (1 + \beta^2)$, определяющая плотность рабочего тока j_y , падает с ростом параметра Холла как $1 / (1 + \beta^2)$, то это приводит к уменьшению j_y , плотности электрической мощности, к.п.д. и росту продольного («паразитного») короткозамкнутого тока j_x . Следовательно, область оптимального применения этого типа МГД-канала по параметру Холла является $\beta < 1$, обычно до ≈ 0.7 .

Аналогичный анализ показывает, что для фарадеевского МГД-канала с секционированными электродами (рис.21б), каждая изолированная секция которого представляет элементарный канал со сплошными электродами длиной L/m_3 (m_3 - число пар электродов), в идеальных условиях невозможно замыкание продольного тока, т.е. $j_x = 0$, что обеспечивает равенство поперечной проводимости её скалярному значению и максимальную плотность мощности. Основными недостатками такого МГД-канала являются наличие большого числа нагрузок и электродов конечных размеров, продольного межэлектродного напряжения, которое может привести к межэлектродному пробоем при превышении критического значения $E_{кр}$ (20-50 В/м), концентрации тока на краях электродов. Ввиду конечной степени секционирования ($m_3 \sim 100$) и продольного размера реальных электродов областью оптимального применения рассматриваемого типа МГД-канала является диапазон $1 < \beta < 3$.

В холловском МГД-канале (рисунок 16в,д) ток в нагрузку $I = j_x \cdot A$ (A - площадь поперечного сечения канала) определяется продольным (холловским) током j_x . Он имеет одну нагрузку, подсоединённую к одной или нескольким парам крайних электродов, и характеризуется высоким напряжением $V \sim k\beta vBL$ (до ~ 20 кВ), что в $\beta L/h$ больше напряжения фарадеевского МГД-канала. Однако это приводит к высокому значению продольного электрического поля E_x в межэлектродном промежутке, которое должно быть ограничено условием пробоя. Электрический к.п.д. холловского МГД-канала зависит как от коэффициента нагрузки, так и от параметра Холла (рисунок 17) и имеет максимум $\eta_M = \{[(1 + \beta^2)^{1/2} - 1] / \beta\}^2$, зависящий только от параметра Холла. Этот тип МГД-канала эффективен при высоких значениях параметра Холла $\beta \geq 5$.

Диагональный (сериесный или рамочный) МГД-канал (рисунок 16г) характеризуется фиксированным направлением вектора электрического поля в канале $t = \operatorname{tg} \alpha = -E_y / E_x$, которое в общем случае может изменяться по его длине. Это достигается путём коммутации (заключивания) двух электродов, расположенных на анодной и катодной стенках под одним потенциалом. При этом образуется эквипотенциаль, наклонённая к нормали оси канала (к оси «у») под углом α . Ток по внешней (или по боковой проводящей рамке) коммутационной цепи «перетекает» от электрода катодной стенки к электроду анодной стенки. При $t = 0$ диаго-

Оглавление

нальный канал совпадает с холловским, а при $t \rightarrow \infty$ - с фарадеевским со сплошными электродами. Этот канал характеризуется одной нагрузкой, подсоединённой к крайним – входному и выходному - электродам, и достаточно высоким напряжением. Ток в нагрузку равен $I = (j_x - t \cdot j_y) \cdot A$. Электрический к.п.д. η зависит от трёх параметров - β , k_d и t . При заданном η существует такое значение угла коммутации α (параметра t_0), при котором достигается максимальное значение снимаемой плотности мощности $N_{уд} = j_x E_x + j_y E_y$. В этом случае выполняется условие $j_x = 0$ и диагональный канал совпадает с фарадеевским с секционированными электродами (рисунок 16б).

Большое влияние на характеристики и ресурс, особенно маломасштабных, каналов МГДГ оказывают приэлектродные процессы и режим протекания тока на электроды (неконтрагированный (диффузный), микродуговой и развитый дуговой).

7. Течения электропроводных сред в каналах МГД-генераторов. Характерные неустойчивости низкотемпературной плазмы

Отличие течения электропроводного газа в каналах кондукционных МГДГ от его классического непроводящего аналога заключается в существовании в каждой его точке объёмных сил и энергообмена (съёма или подвода энергии), а также возникновении специфических пристеночных и концевых эффектов, обусловленных изменением электромагнитных граничных условий.

Структура плазменного, особенно двух- и трёхфазного, потока, который формируется как газодинамический в разгонном устройстве (сопле), характер его изменения и устойчивость в канале определяют количественные характеристики МГДГ и процессы в нём (трение, теплоотдачу, приэлектродное падение напряжения, ресурс огневых стенок и др.), а в случае сверхзвукового течения могут оказывать на них и качественное влияние, например, при отрыве пограничного слоя и появлении ударных волн (рисунок 18-20).

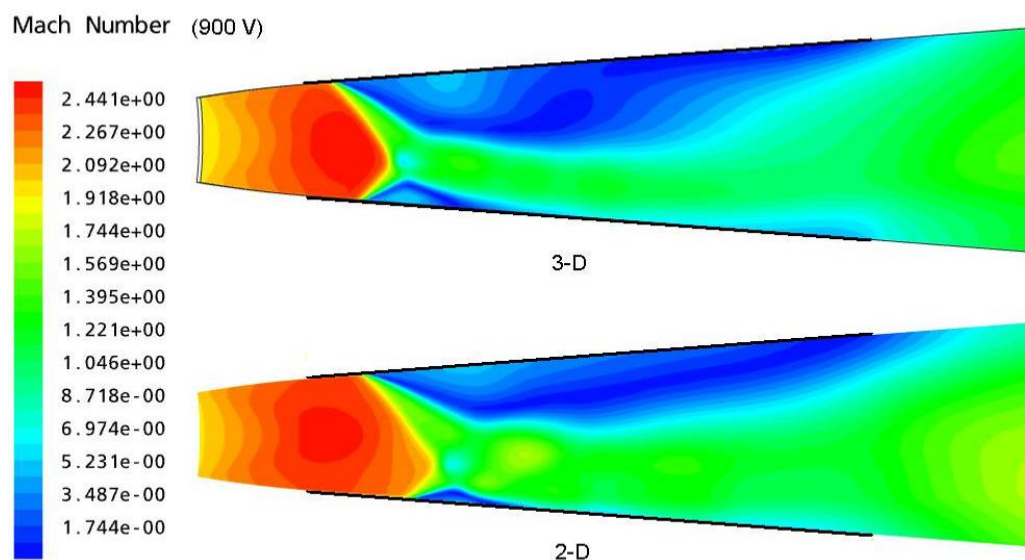
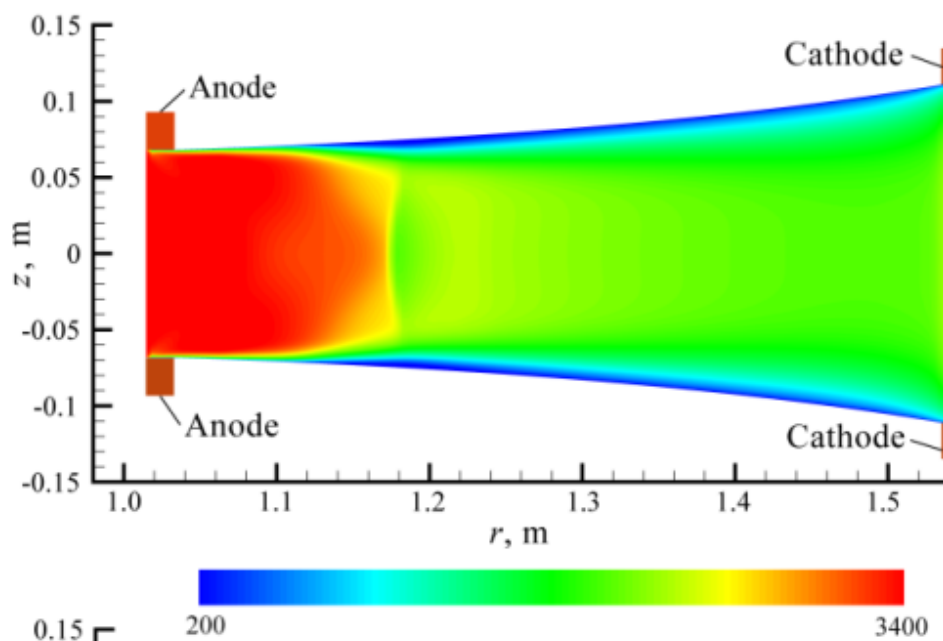
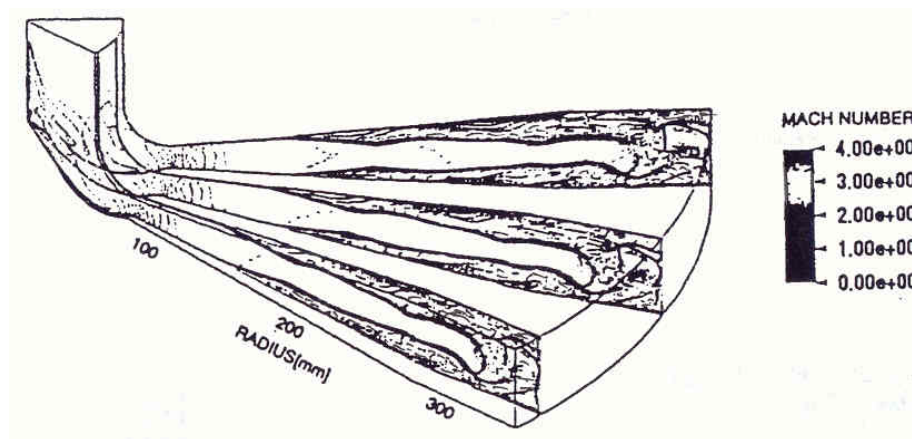


Рисунок 18 - Расчётное поле чисел Маха в отрывном течении в канале МГДГ «Сахалин» (длина канала – 4.5 м) при «сильном» нагружении (напряжение 900 В): сверху – пространственная (3DT) модель; внизу – квазидвумерная (Q2DT) модель.



(a)



(б)

Рисунок 19 - Поля радиальной скорости (а) и числа Маха (б) сверхзвуковых вязких течениях в дисковых каналах МГД-генераторов на неравновесной плазме (Япония): а - Q2D приближение, крупномасштабный канал (He+Cs), мощность 300 МВт; б - 3D модель, канал FUJI-1 (см. п.10).

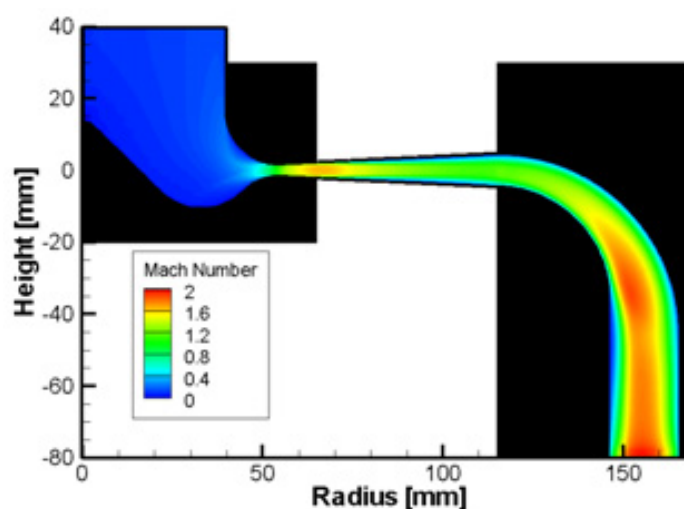


Рисунок 20 - Поле числа Маха в пространственном течении в газодинамическом тракте экспериментального МГД-генератора FUJI-1 с дисковым каналом

Благодаря влиянию пространственных распределений полей, токов, пондеромоторных сил и эффекта Холла в потоке плазмы могут возникать уникальные формы пространственных и плоских вязких ламинарных и турбулентных течений, например, отрывные (рисунок 18,19), вторичные в плоскости «y-z» (рисунок 21), гартмановские пограничные слои на изоляционных стенках каналов, «быстрая» передача и (или) перераспределение энергии и импульса между различными и пространственно удалёнными областями течения благодаря электромагнитным связям («эффект дальнего действия»). В плазменном объёме могут возникать и самоподдерживаться токовые и высокотемпературные неоднородные структуры, вихревые короткозамкнутые токи, утечки тока на элементы конструкции и соседние узлы, различные режимы протекания тока на электродах.

[Оглавление](#)

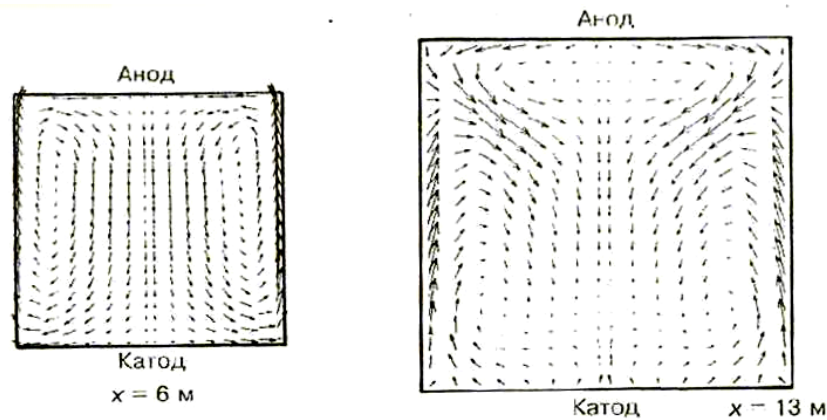


Рисунок 21 - Схема развития вторичного течения в линейном канале крупномасштабного МГД-генератора для МГД-электростанции на продуктах сгорания природного газа

Эти эффекты могут приводить к развитию неустойчивостей, которые изменяют однородное состояние плазмы, уменьшают эффективность МГД-взаимодействия и характеристики МГДГ.

Течение неравновесной плазмы в каналах имеет свои особенности, связанные с появлением дополнительных переменных, связей и граничных условий. Эти параметры зависят не только от термогазодинамических величин, но и «сильно» от связанных с ними электрических величин. Такая сложная нелинейная взаимозависимость большого числа параметров требует тщательной оптимизации состава рабочего тела, выбора параметра Холла, степени ионизации присадки, режимов течения и электрического нагружения для обеспечения эффективного преобразования энергии. В противном случае могут развиваться плазменные неустойчивости, которые приведут к новому и устойчивому состоянию - турбулентной плазме, крупномасштабным неоднородностям в МГД-канале, уменьшению к.п.д. и энергетических характеристик (рисунок 22).

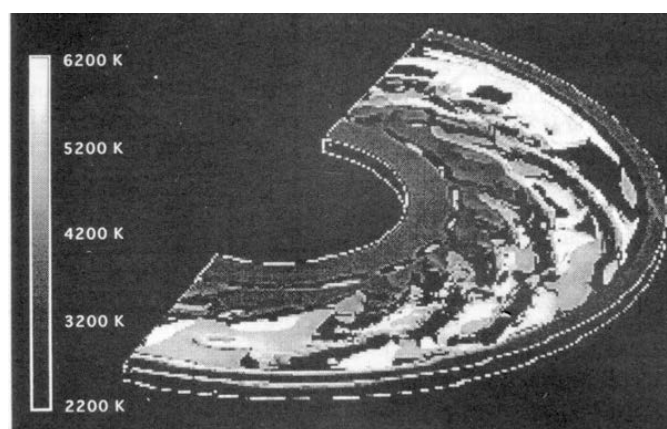


Рисунок 22 - Типичное распределение температуры электронов в плоскости « $r-\varphi$ » дискового канала МГД-генератора FUJI-1 на неравновесной He-Cs плазме

Для потоков низкотемпературной плазмы в каналах МГДГ характерны два типа неустойчивостей: *магнитоакустическая* (Е.Велихов, 1961) для равновесной и неравновесной плазмы и *ионизационная* (электротермическая, перегревная) для неравновесной плазмы (Дж.Керреброк, Е.Велихов, 1961-1962).

Акустическая неустойчивость возникает при определённых условиях в МГД-течениях частично замагниченной как равновесной, так и неравновесной плазмы ($\beta > 1$, $\beta_i \ll 1$) в скрещенных электрических и магнитных полях и проявляется в виде усиления акустических возмущений (колебаний) p' , T' , ρ' , распространяющихся в противоположном плотности тока $\mathbf{j}_0$ направлении. Для возникновения акустической неустойчивости необходимо, чтобы дрейфовая (токовая) скорость электронов превосходила скорость звука в плазме. В линейном приближении рост амплитуды волны во времени происходит $\sim \exp(\gamma_a \cdot t)$ с инкрементом $\gamma_a \sim \beta \sigma V^2 / \rho$ [с⁻¹] при выполнении в МГД-канале условия $(1-k) \cdot \beta \cdot M > 1$, где M – число Маха, k – коэффициент электрической нагрузки.

Ионизационная неустойчивость характерна для неравновесной плазмы при $\beta \gg 1$ и заключается в росте возмущений концентрации электронов n'_e , когда параметр Холла для электронов превышает локальное критическое значение $\beta_{кр}$. Она обусловлена положительной обратной связью между флуктуациями n'_e и локального джоулева тепловыделения $(j^2/\sigma)'$, что приводит к образованию пространственно неоднородной структуры плазмы (турбулентная плазма) и тем самым к снижению средних (эффективных) значений σ и β в МГД-канале (рис.22). Для существования ионизационной неустойчивости необходимы два условия: плазма должна быть неравновесной, а параметр Холла должен быть отличным от нуля. При превышении критического значения параметра Холла $\beta_{кр}$ начальные возмущения возрастают в линейном приближении по закону $n'_e \sim \exp(\gamma_i \cdot t)$ с инкрементом $\gamma_i = -2(\mathbf{k} \cdot \mathbf{j}_0)(\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}_0) / (I_s \cdot n_e \cdot k^2)$, где $\mathbf{k}$ – волновое число.

Для условий МГД-генераторов на неравновесной плазме с малой степенью ионизации присадки эксперимент даёт величину $\beta_{кр} \sim 1-2$, а характерное время развития неустойчивости составляет $\tau_i \approx n_e I_i / (j^2/\sigma) \sim 10^{-6}$ с. Фазовая скорость волны с максимальным инкрементом в неподвижном газе при $\beta \gg 1$ равна $u_{ф} \approx (kT_e / I_i) [j / (e \cdot n_e)] \approx 50$ м/с при $j = 2 \cdot 10^4$ А/м², $n_e = 10^{20}$ м⁻³, $I_i / kT_e \approx 20$. Ионизационная неустойчивость может быть подавлена путём уменьшения неизотермичности плазмы или (и) увеличением степени ионизации присадки до почти полной ($\beta_{кр} \gg 1$). Последний способ является предпочтительным и используется в настоящее время в МГДГ на неравновесной плазме.

Оглавление

В общем случае корректное описание течений равновесной плазмы в МГД-канале требует использования полной нестационарной пространственной системы дифференциальных уравнений МГД в частных производных для реального газа, а для неравновесной плазмы – ещё и соответствующих уравнений для электронов и ионов (3DT модель). В кондукционном приближении (число $R_m \ll 1$) система уравнений расщепляется на газодинамическую и электродинамическую взаимосвязанные части, которые решаются независимо и обычно методом итераций. Для замыкания системы уравнений задаются начальные и граничные условия, уравнение состояния и транспортные свойства плазмы.

В виду сложности численного решения такой системы уравнений и анализа результатов её упрощают (редуцируют) как по учитываемым физическим процессам, так и по пространственным переменным. Так, после усреднения вдоль силовых линий магнитного поля (по оси «z») получается нестационарные и стационарные квазидвумерные приближения (Q2DT и Q2D), после усреднения в плоскости поперечного сечения – квазиодномерные (Q1DT и Q1D), а после усреднения по объёму – локальное («нульмерное») приближение. Инженерные методы расчёта, в которых могут использоваться и экспериментальные данные, базируются на Q1D приближении и обеспечивают точность расчёта основных характеристик МГДГ до 20%.

При расчётах и анализе течений в МГД-каналах выделяют *прямые* и *обратные* задачи. В первом случае рассматривается течение в канале с известными геометрическими размерами и электрическим типом. В обратных задачах задаётся изменение одного (или более) параметра течения по длине канала (например, $T = \text{const.}$, $M = \text{const.}$).

Определение оптимальных параметров течения и закона их изменения вдоль оси МГД-канала зависит от целевой функции МГДГ и представляет самостоятельную и трудоёмкую задачу.

В локальном приближении максимальная локальная плотность мощности достигается в режиме согласованной электрической нагрузки, при котором внутреннее сопротивление МГД-канала равно сопротивлению нагрузки ($k=0.5$, $R_i=R_{\text{нагр}}$) при максимальном значении энергетического комплекса $\sigma \cdot v^2$. Для равновесной плазмы с температурой торможения T_0 это максимальное значение достигается при оптимальном числе Маха M_0 , которое определяется из условия экстремума $\partial(\sigma v^2)/\partial M = 0$ и зависит от показателя адиабаты γ и отношения $I_s/(2T_0)$. Этот эффект обусловлен немонотонной зависимостью комплекса σv^2 от скорости потока при фиксированных значениях давления и температуры торможения. Для продуктов сгорания обычно показатель адиабаты $\gamma < 1.3$ и оптимальным течением является сверхзвуковое $M_0 > 1$, а для плазмы, состоящей из одно- или (и) двухатомных газов ($\gamma \geq 1.4$), дозвуковое. Однако для

[Оглавление](#)

МГДГ в целом, а тем более для всей ЭУ с МГДГ, оптимальное число Маха на входе в канал определяется по другим критериям и может заметно отличаться от M_0 .

8. Магнитные системы МГД-генераторов

Магнитная система (МС) является одним из основных узлов МГДГ и предназначена для создания заданного значения индукции B и её распределения в рабочем объеме канала. Она определяет энергетические, массовые (на 50%-80%) и габаритные характеристики МГДГ. Так как плотность электрической мощности и параметр МГД-взаимодействия в канале пропорциональны B^2 , то МС для МГДГ должна обеспечивать высокие значения индукции. Однако даже при индукции $B=10$ Тл плотность мощности в МГД-канале на несколько порядков ниже, чем в проводниках традиционных электрогенераторов, что обусловлено на ~5 порядков большей электропроводностью твердых проводников. В связи с этим для получения электрической мощности порядка той, что имеют электрогенераторы, объем МГД-канала и, следовательно, объем рабочего магнитного поля должны быть большими. Поэтому запасенная в МС магнитная энергия составляет десятки и сотни мегаджоулей. Значения магнитной индукции стационарных МС ограничены механической прочностью материалов силовых элементов (бандажа), т.к. их предельное напряжение на разрыв (≤ 400 МПа) должно быть меньше давления магнитного поля $p_M = B^2 / (2\mu_0) \approx 4 \cdot 10^5 \cdot B^2$ [Па], что даёт допустимое значение ~30 Тл. Также существуют ограничения, связанные с техническими возможностями и допустимыми затратами на её создание.

В силу своего назначения конфигурация и размеры МС определяются каналом МС. Технически оптимальной конфигурацией катушек МС для линейных каналов является седлообразная с прямоугольной или цилиндрической формами поперечного сечения обмотки, а для дисковых каналов – круглые катушки.

Основными элементами МС являются: токонесущая обмотка, магнитопровод, системы электропитания, охлаждения, силовые элементы (бандаж), опорная рама. Системы охлаждения обмоток могут быть жидкостными (объемными (ванны) или канальными (проточными) или безжидкостными (газовое конвективно-кондукционное охлаждение).

В качестве МС для МГДГ применяются следующие типы МС.

Электромагниты с ферромагнитным («железным») магнитопроводом используются для создания полей с индукцией до 2 Тл в стационарном режиме работы (см. п.10). Материалом проводника является медь, алюминий, плотность тока в обмотке – до 10 А/мм², хладагентом – вода, антифриз, масла, керосин, воздух. Для таких МС характерны небольшая потребляемая мощность (<15% от генерируемой в канале), большие объёмы магнитного поля

[Оглавление](#)

($>1 \text{ м}^3$), очень большие массы (десятки тонн), малые стоимости, промышленное изготовление.

Безжелезные резистивные МС предназначены для работы в импульсном, кратковременном или стационарном режимах, охлаждаемые или неохлаждаемые (рисунок 23, четыре неохлаждаемые медные катушки для двух каналов импульсного МГДГ «Памир», время работы – до 12 с). Материал проводника обмотки – медь, алюминий, серебро, молибден, бериллий и др. Индукция магнитного поля – до 5 Тл, температура проводника обмотки - 350-2000 К, плотность тока в обмотке - $1 - 10 \text{ А/мм}^2$, большая потребляемая мощность (мегаватты), большие объёмы магнитного поля (до десятков м^3), относительно лёгкие (тонны), малые стоимости, промышленное изготовление.

Безжелезные криорезистивные МС предназначены для работы в стационарном режиме, охлаждаемые (хладоагент – гелий, жидкие азот, водород и др.), рабочая температура проводника – 20-80 К, материал проводника обмотки – сверхчистые алюминий, медь, плотность тока в обмотке - $10 - 100 \text{ А/мм}^2$. Находятся в стадии экспериментальных исследований.



Рисунок 23 - Двухканальная импульсная МГД-установка с четырьмя неохлаждаемыми медными катушками

Для стационарных МГДГ оптимальным типом МС являются сверхпроводящие МС с обмотками дипольного (или квадрупольного) типа, требующие энергетических затрат только на создание и поддержание обмоток в сверхпроводящем состоянии и питание вспомогательных устройств.

[Оглавление](#)

Сверхпроводящие МС для МГДГ обеспечивают в стационарном режиме индукцию до $B \approx 10$ Тл, охлаждаемые (хладоагент – жидкий (рисунок 24) или газообразный (рисунок 25) гелий при температурах 4-10 К), материал сверхпроводника в медной матрице шинки – низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) II рода (NbTi, NbZr, Nb₃Sn, GeAl), рабочая температура проводника – 4-10 К, плотность тока в обмотке – до 1000 А/мм², большие объёмы магнитного поля (до десятков м³), небольшие удельные массы, большие стоимости, промышленное изготовление МС (рисунок 24).

В настоящее время проводятся экспериментальные исследования стационарных МС на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП из керамики, керметов на основе Bi, Y и др.), создающих в небольших объёмах магнитные поля простых конфигураций индукцией 1÷3 Тл при температурах обмотки 20-50 К и плотностях тока до 200 А/мм² (рисунок 26).



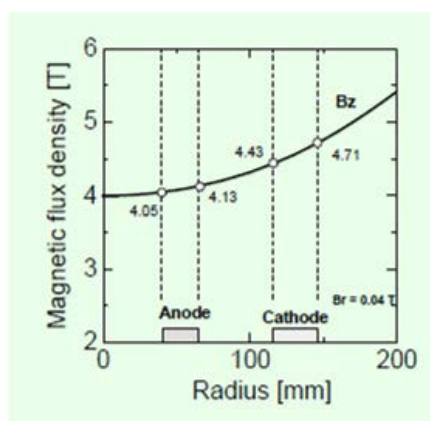
Рисунок 24а - Седлообразная обмотка сверхпроводящего (НТСП) магнита на жидком гелии



Рисунок 24б - Общий вид сверхпроводящего магнита для стационарного МГД-генератора (фирма ANSALDO, Италия).



Bore diameter : 400 mm



**Profile of Magnetic flux density
4.0 T (center) - 5.4 T (edge)**

Рисунок 25 - Общий вид безжидкостного сверхпроводящего (НТСП) магнита с криокулером для дискового МГД-канала (Япония)

[Оглавление](#)

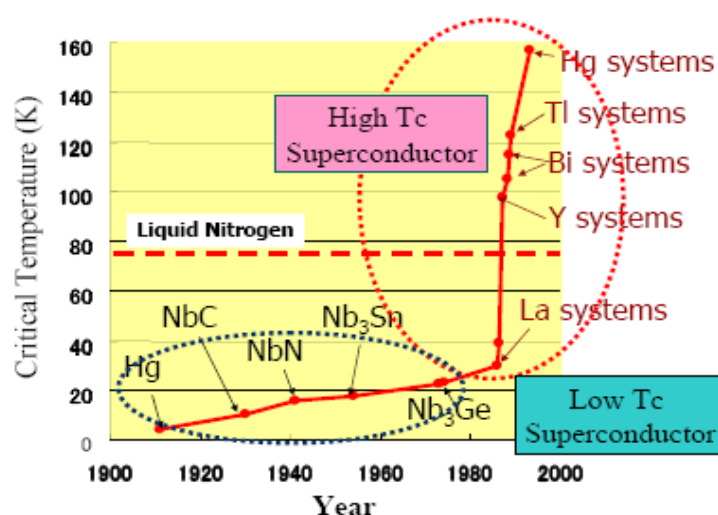


Рисунок 26 - Критические температуры для НТСП и пяти поколений ВТСП

При исследовании маломасштабных МГД-устройств применяются современные постоянные магниты на основе соединений «неодим-железо-бор», «самарий-кобальт», имеющие остаточную индукцию ≈ 1 Тл в небольших объёмах ($\approx 1000 \text{ см}^3$) (рисунок 27).



Рисунок 27 - Общий вид постоянного магнита для жидкометаллического МГДГ (Китай)

9. Особенности конструкций и материалы огневых стенок каналов МГД-генераторов

9.1. Основные типы и особенности конструкций каналов МГД-генераторов

МГДГ является относительно новым устройством современной техники. В конструкциях каналов МГДГ удаётся разделить области воздействия высоких температур и механических нагрузок, но в отличие от ракетной техники существуют токи и электромагнитные поля в плазме и стенках, которые должны обладать различными электрическими свойствами.

Конструкция канала должна обеспечивать многие требования, прежде всего максимальный ресурс и минимальные тепловые, гидравлические, электрические потери. К материалам огневых стенок предъявляются противоположные по электрическим свойствам требования, причём электропроводные и электроизоляционные материалы находятся при высоких температурах. Материалы огневых стенок подвергаются воздействиям, характерным для ракетной техники и которые ранее не встречались в энергомашиностроении.

Конструкции МГД-каналов качественно отличаются и зависят от типа, назначения и режима работы МГДГ. Конструкции каналов классифицируют по следующим признакам: электродные и безэлектродные (индукционные); по времени работы; охлаждаемые и не охлаждаемые; по типу рабочего тела, по электрическому типу канала и ряду других.

В связи с большим разнообразием уникальных конструкций каналов, разработанных в разных странах по собственным технологиям, число которых составляет несколько сотен, невозможно провести их систематизацию.

Конструкции охлаждаемых линейных каналов условно можно разделить на следующие типы: корпусная, секционная и рамочная (для холловских и диагональных каналов). Основным типом конструкции охлаждаемых линейных каналов является корпусная, которая представляет пространственный короб прямоугольного (или другой формы) сечения, внутренняя часть которых состоит из двух электродных и двух изоляционных стенок (рисунок 28 - 30).

Электродные и изоляционные стенки каналов состоят из нескольких слоёв различного функционального назначения (огневые, теплоизоляционные, токосъёмные шины, силовые) и имеют модульную (секционную) конструкцию (рисунок 28 - 31). Для их охлаждения используются различные типы и схемы: проточное конвективное, пастообразное, регенеративное, завесное различного типа, кондукционное, внешнее конвективное, комбинированное (рисунок 30) и т.п.

На рисунке 38 показан конвективно охлаждаемый водой фарадеевский канал с секционированными электродами 1Д для стационарного МГДГ У-25 на продуктах сгорания природного газа, а на рисунке 29 – часть его конвективно охлаждаемой многослойной электродной стенки.

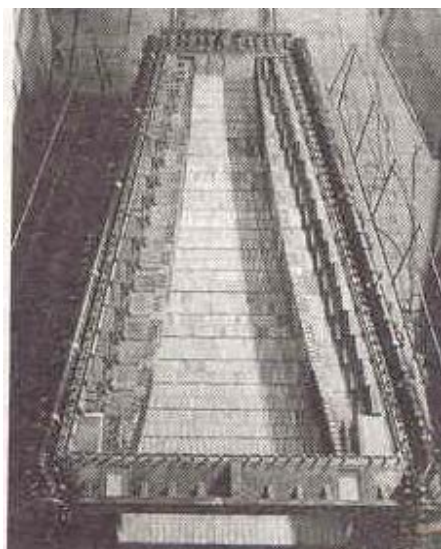


Рисунок 28 - Фарадеевский канал 1Д стационарной МГД-установки У-25

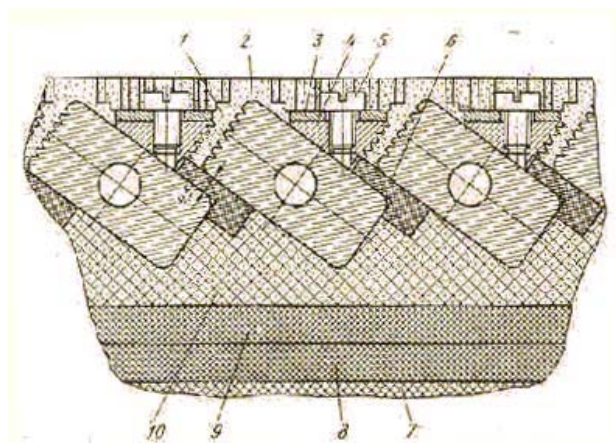
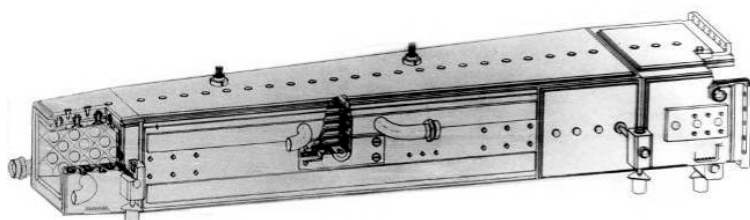
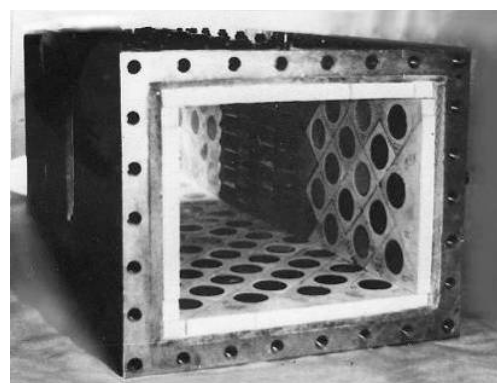


Рисунок 29 - Фрагмент многослойной стенки охлаждаемого канала МГД-установки У-25

В качестве примера комбинированного охлаждения на рисунке 30 показан блок корпусной конструкции электродных и изоляционных стенок с завесно-конвективным охлаждением стенок канала МГДГ кратковременного действия на продуктах сгорания водорода в кислороде «Памир-2».



(а)



(б)

Рисунок 30 - Корпусная конструкция (а) охлаждаемого фарадеевского канала МГД-генератора «Памир-2» на водород-кислородном топливе, изоляционных и электродных стенок канала с конвективно-завесным охлаждением (б).

Наибольшей конструктивной простотой характеризуются каналы импульсных (рисунок 8, 23) и взрывных МГДГ (рисунок 9), в которых, благодаря непродолжительному тепловому воздействию, используется принцип аккумуляции тепла в материалах многослойных стенок (рисунок 31, см. п.10).

[Оглавление](#)

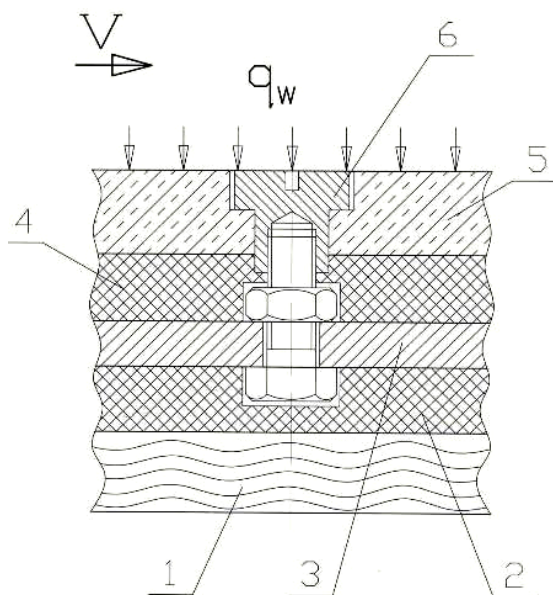


Рисунок 31 - Схема многослойной неохлаждаемой электродной стенки фардеевского канала импульсного МГДГ:

1 – силовой корпус (сталь, СТЭФ);
2, 4 – теплоэлектроизоляционный слой (МСП); 3 – медная шина; 5 – электрод (графит); 6 – крепёжный болт (молибден)

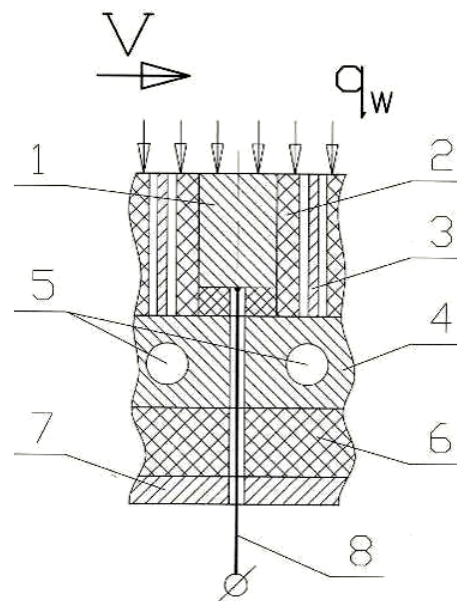


Рисунок 32 - Схема составного электрода для охлаждаемого МГД-канала: 1 – токоёмный узел ($ZrO_2 + LaCrO_3$); 2 – теплоэлектроизоляционный слой (MgO); 3 – межэлектродный электроизолятор (Al_2O_3); 4 – медная пластина; 5 – каналы охлаждения; 6 – теплоэлектроизоляционный слой (МСП); 7 – силовой корпус; 8 – токовывод

9.2. Материалы огневых стенок каналов МГД-генераторов

Конструкция и материалы внутренних (огневых) слоёв стенок каналов определяются комплексом газодинамических, тепловых, электрических, химических, механических и приэлектродных процессов. Эти материалы удовлетворяют многочисленным требованиям: высокая электропроводность для электродов и низкая – для изоляторов, высокая рабочая температура, малая скорость термохимической эрозии, большой ресурс, стабильность свойств, стойкость к тепловому удару, технологичность изготовления и обработки, низкая стоимость и др.

В качестве *электродных материалов* применяются следующие высокотемпературных соединения и композиции:

- для стационарных МГДГ «горячие» (1500 К – 2200 К) электроды на основе стабилизированного оксида ZrO_2 (рисунок 32); углеграфитовые композиты; керметы; композиты на основе хромитов;
- «холодные» ($T \leq 1000$ К) электроды на основе коррозионно стойких сталей; сплавов хрома и вольфрама; меди и её сплавов;
- при наличии шлаковой плёнки на поверхностях электродов - «холодные» ($T \approx 1000$ К) металлические электроды с керамическим покрытием.

[Оглавление](#)

Для каналов МГДГ взрывного, импульсного и кратковременного действия используются следующие электродные материалы:

- различные модификации графита (В-1, ПГВ и др.) и углеграфитовые композиционные материалы (до 3000 К) (рисунок 31); тугоплавкие металлы и их сплавы (Мо, Nb, Та, ВНДС и др. - до 3000 К) (рисунок 30); соединения типа С-Re, Re-Th (до 1200 К).

Наиболее сложную проблему для создания высокоресурсных МГД-каналов представляют высокотемпературные электроизоляционные материалы, которые обычно ограничивают его ресурс. В качестве таковых применяются:

- высокотемпературные керамики на основе окислов металлов Al_2O_3 , MgO , CaO , ThO_2 , BeO_2 и др. (до 2300 К);
- высокотемпературные (огнеупорные) бетоны (до 2200 К);
- кварцевая керамика SiO_2 , керсил;
- нитриды, карбиды, карбонитриды и композиционные керамики на их основе: BN, AlN , Si_3N_4 , SiC , ABN и др. (до 2200 К) (рисунок 33);
- стеклопластики на основе кварцевой керамики SiO_2 с минеральной связкой (до 1800 К);

В качестве межмодульной и межэлектродной электроизоляции для секционированных электродов используются следующие высокотемпературные керамики: ZrO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , BN, ABN, (Si_3N_4 + ABN).

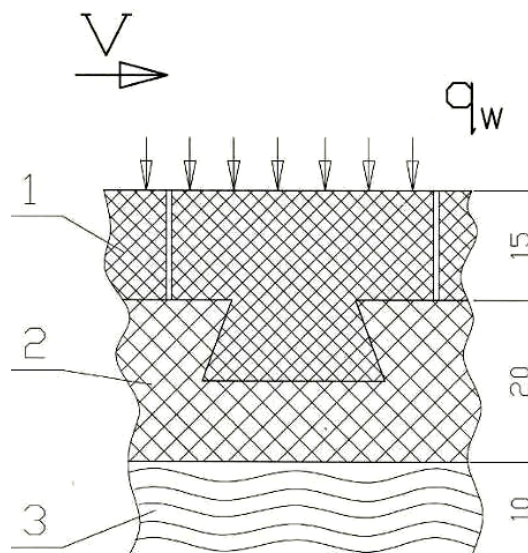


Рисунок 33 - Модуль электроизоляционной стенки канала импульсного МГД-генератора: 1 – высокотемпературный электроизоляционный слой (композиционная керамика (Si_3N_4 + ABN)); 2 – тепло-электроизоляционный слой (МСП); 3 – силовой корпус (сталь или СТЭФ).

В области пониженных температур для электроизоляции применяются стандартные материалы, такие как керамика, фторопласт, слюденит, асбест, стеклопластики, текстолит и др.

Силовые элементы изготавливаются, в зависимости от целевого назначения МГДГ, из легированных сталей, титановых и алюминиевых сплавов, стеклопластиков, композитов и др.

10. Энергетические установки с МГД-преобразователями и области их применения

Первые эксперименты по получению электроэнергии с помощью МГД-генераторов были проведены в США ещё до Второй мировой войны. Но только в 1959 г. фирма AVCO (США) создала МГДГ Mark I на неравновесной аргон-калиевой плазме мощностью в несколько киловатт, на котором была продемонстрирована техническая возможность МГД-генерирования электроэнергии. В 1960 г. там же был изготовлен и успешно испытан сверхзвуковой МГД-генератор Mark II на продуктах сгорания толуола в кислороде с присадкой калия электрической мощностью до ~100 кВт. С этого времени во многих странах развернулись широким фронтом работы по созданию МГД-генераторов открытого цикла на продуктах сгорания ископаемых топлив для МГД-электростанций, а также МГДГ на неравновесной плазме сначала в СССР и в США, а затем в Японии, Китае, Италии, Индии, Австралии, Польше, Румынии.

Разработка и изучение возможностей применения МГДГ различных типов проводится для областей электроэнергетики, в которых они оказываются наиболее конкурентоспособными или не имеют аналогов среди существующих источников тока. К настоящему времени разработаны, спроектированы, экспериментально исследованы и доведены до опытно-промышленного изготовления следующие типы МГДГ.

Стационарные МГДГ для промышленных МГД-электростанций (МГДЭС) рассматриваются в качестве надстройки в бинарных и тройных открытых и замкнутых циклах Ренкина и Брайтона, что повышает верхнюю температуру циклов и тем самым их к.п.д. до 52-54 %, а при использовании химической регенерации – до 58-60%. В СССР в период с 1961 г. по 1990 г. осуществлялись исследования по созданию МГДЭС на продуктах сгорания природного газа. К 1965 г. была создана модельная МГД-установка У-02 с линейным фарадеевским каналом мощностью ≈ 0.2 МВт, непрерывная работа которой достигла 1 месяца. В 1971 г. начато создание опытно-промышленной установки У-25 с МГД-каналами и магнитами различного типа и паровым контуром (рисунок 34). К 1975 г. электрическая мощность этой установки достигла 20.4 МВт, время непрерывной работы - 250 часов.

[Оглавление](#)

В США национальная программа была направлена на создание МГДЭС на угле. Были разработаны и экспериментально исследованы основные узлы МГД-установки на продуктах сгорания угля в обогащённом кислородом воздухе. Созданы и исследованы модельная установка CFFF (1972 г., шт. Теннесси) и демонстрационная CDIF (1980 г., шт. Монтана).

К 1990 г. электрическая мощность опытных энергетических МГДГ на продуктах сгорания достигла 21 МВт, время непрерывной работы – ~1000 часов, к.п.э. – до 16 %. Разработаны проекты опытно-промышленных МГДЭС: в СССР на природном газе мощностью 500 МВт (доля МГДГ - 200 МВт), в США на угле (300 МВт, Баттл, Монтана). В настоящее время работы по созданию МГДГ для МГДЭС открытого цикла приостановлены в связи с необходимостью больших и дорогостоящих капиталовложений и началом внедрения в энергетику бинарных парогазовых ТЭС, к.п.д. которых уже достиг 58%.

Рассматривается использование МГДГ в составе пиковых энергетических установок простого открытого цикла при электрических мощностях $N_e=50-200$ МВт, времени работы $t_{\text{раб}}=1-3$ часа в сутки. В качестве топлива целесообразно использовать природный газ или жидкие углеводороды, а в будущем – водород, генерируемый на атомных (АЭС) или термо-ядерных электростанциях (ТЯЭС).

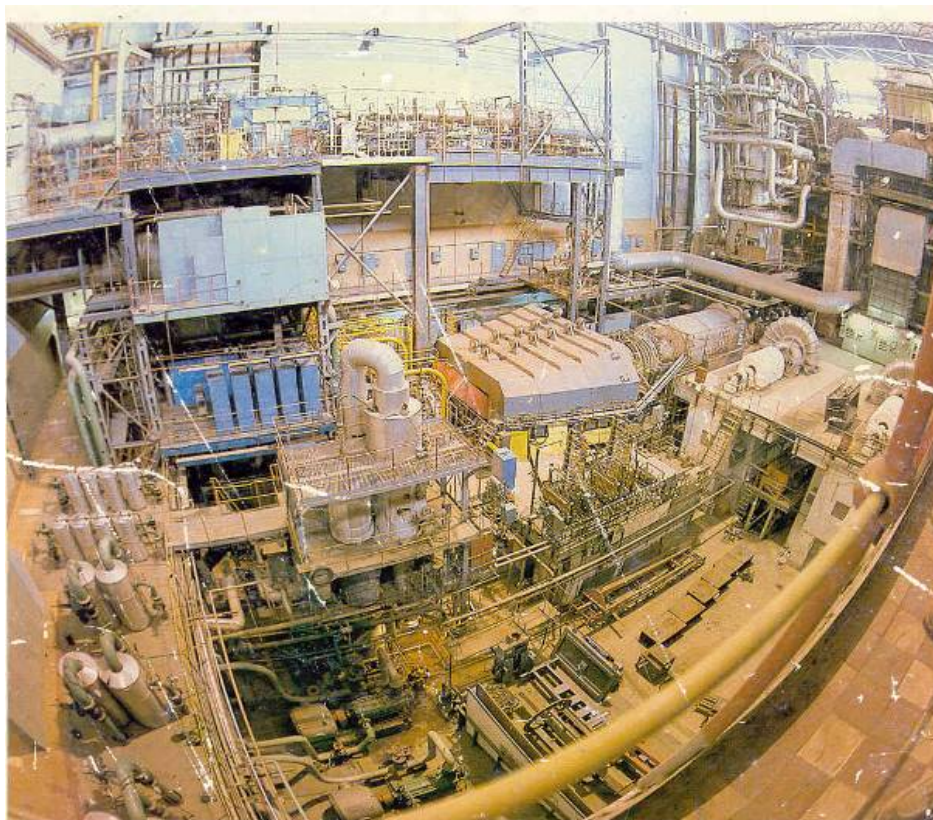


Рисунок 34 - Общий вид МГД-генератора опытной энергетической установки У-25 бинарного цикла (справа – паровой котёл-утилизатор)

Исследования показали, что использование *МГДГ на неравновесной плазме инертных газов* в составе бинарных и тройных замкнутых циклов МГДЭС может обеспечить к.п.д. 50% - 70 % в зависимости от начальной (верхней) температуры цикла в диапазоне 2300 К-2800 К. С 1961 г. в США, СССР, европейских странах, а затем в Японии начали проводиться исследования по созданию МГД-генераторов на неравновесной плазме с целью их использования в замкнутых циклах Брайтона и Ренкина с высокотемпературными ядерными реакторами для ЭУ космического и транспортного применения.

В связи с этим проведено большое количество расчётно-теоретических работ, экспериментальных и проектных работ по созданию МГД-генераторов на неравновесной плазме.

Наибольшие успехи в разработке МГДГ на неравновесной плазме получены в Японии (МГД-установка FUJI-I электрической мощностью до 0.7 МВт (рисунок 35) и др.). К настоящему времени на японских МГД-установках достигнуты значения к.п.э. до 21% в МГДГ с дисковыми каналами в стационарном режиме работы (температура газа 2000-2300 К) и до 37% - в импульсном (на ударных трубах).

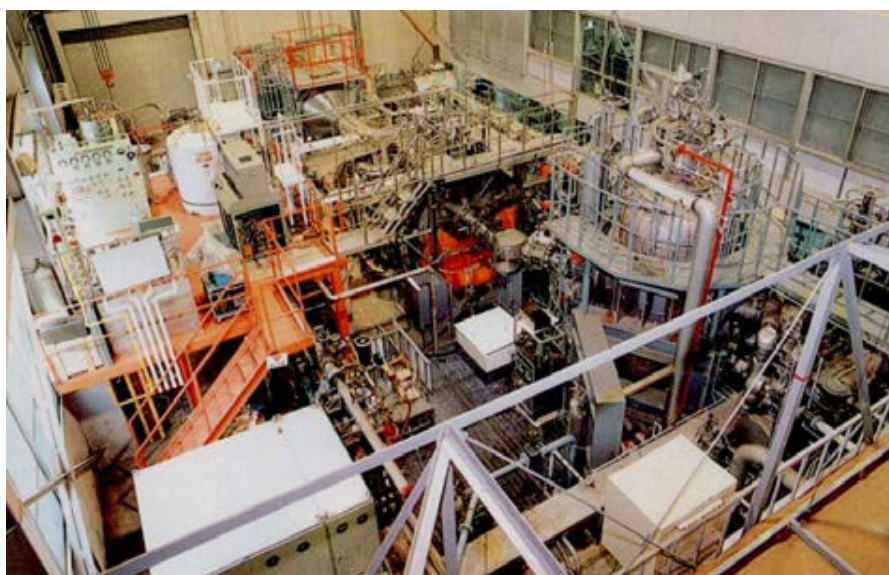
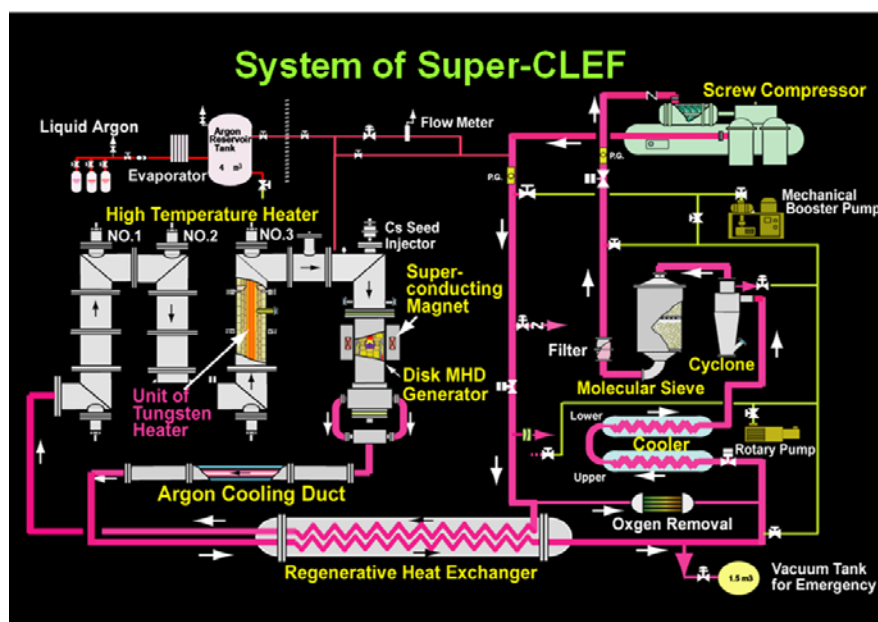


Рисунок 35 - Общий вид стационарной МГД-установки FUJI-1 на неравновесной He(Ar)/Cs плазме с дисковым каналом (мощность – до 0.7 МВт, к.п.э. – до 21%)

Проводятся экспериментальные исследования замкнутых циклов с маломасштабными дисковыми МГД-генераторами на неравновесной плазме (рис.36а,б).



(a)



(б)

Рисунок 36 - Общий вид (a) и структурная схема (б) экспериментальной МГД-установки замкнутого цикла на основе электронагревателей (Япония)

Полученные результаты позволяют рассматривать такие МГДГ как в составе МГД-электростанций, работающих по бинарным или тройным циклам (рисунок 37), так и в замкнутых и, возможно, открытых циклах энергетических установок для космической и транспортной энергетики (рисунок 38, 39).

На рисунке 37 показан общий вид мощной компактной газотурбинной МГД-электростанции мощностью 16 ГВт бинарного цикла, расположенной на газодобывающей

[Оглавление](#)

платформе и предназначенной для преобразования химической энергии природного газа в электрическую в труднодоступных местах его добычи (проект, Россия). Четыре дисковых МГД-генератора мощностью по 2.1 ГВт каждый обеспечивают 55% мощности (остальная мощность генерируется газотурбинными установками), полный к.п.д. составляет 57%, а масса и размеры МГД-электростанции обеспечивают её размещение на стандартной газодобывающей платформе водоизмещением ~100 тысяч тонн, что недостижимо для паро-газовой электростанции такой же мощности.

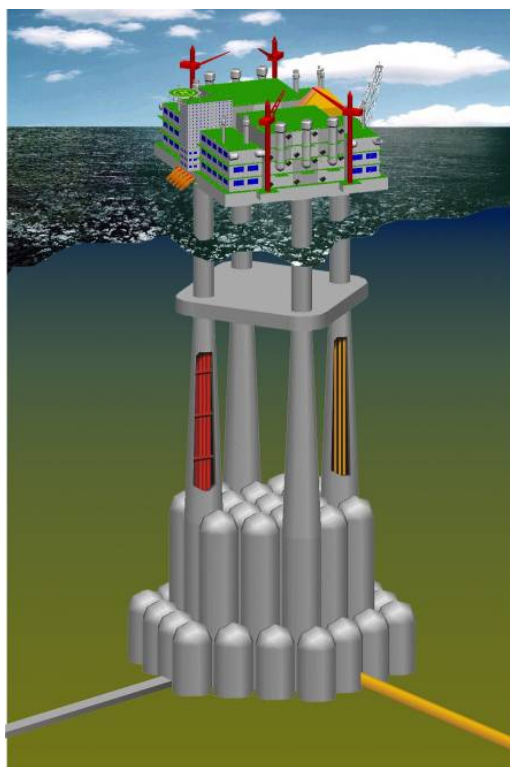


Рисунок 37 - Общий вид компактной газотурбинной МГД-электростанции на газодобывающей платформе (проект, Россия)

На рисунке 38 показана структурная схема космической ЭУ замкнутого цикла с МГДГ на неравновесной плазме, преобразующей энергию солнечного излучения (рисунок 38, Россия), а на рисунке 39 – схема аналогичной установки с ядерным реактором деления (гетерогенными и газофазными) (США). Работы по созданию МГДГ на неравновесной плазме инертных газов успешно продолжаются.

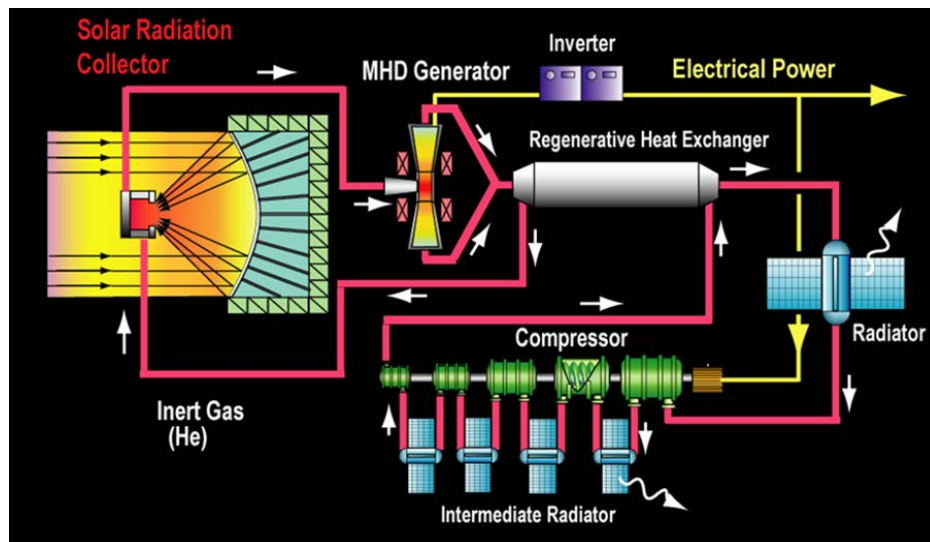


Рисунок 38 - Структурная схема космической солнечной ЭУ с МГД-генератором на неравновесной плазме замкнутого цикла

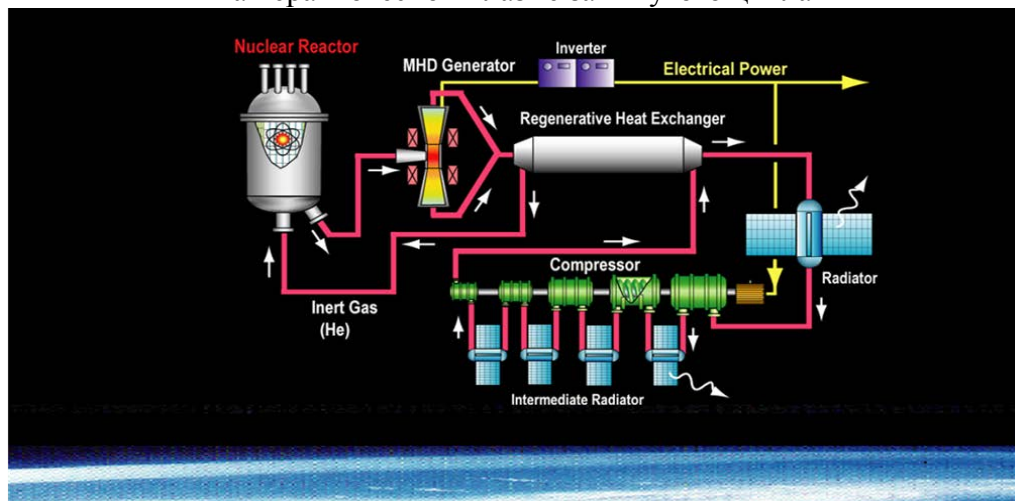


Рисунок 39 - Структурная схема космической ядерной ЭУ с МГД-генератором на неравновесной плазме замкнутого цикла

МГД-генераторы кратковременного действия, импульсные и взрывные МГДГ рассматриваются в качестве мощных (до нескольких ГВт) автономных источников электропитания, в том числе транспортабельных и мобильных, работающих в импульсном, импульсно-периодическом и пакетно-импульсном режимах, различного базирования для систем оборонного назначения, аварийного и резервного электропитания стратегически важных объектов, для геофизических и геологических электроразведочных комплексов, крупных экспериментальных установок, электромагнитного мониторинга, специальных технологий.

В США в 1965 г. и 1966 г. были созданы мощные МГДГ кратковременного действия: фарадеевский МГДГ Mark V (32 МВт, рисунок 40) и холловский МГДГ Lorho (18 МВт) на продуктах сгорания толуола в кислороде кратковременного действия (минуты).

[Оглавление](#)

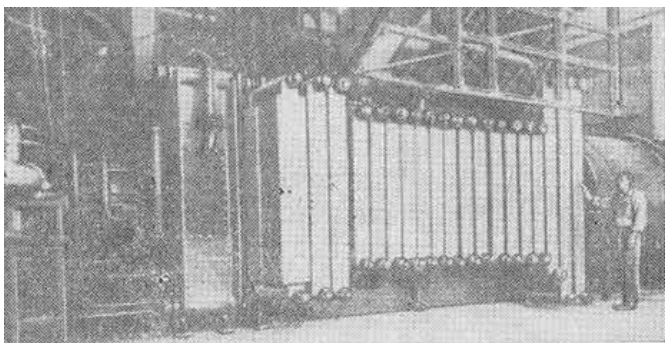


Рисунок 40 - МГДГ кратковременного действия Марк V на керосин-кислородном топливе ($N_3=32$ МВт)

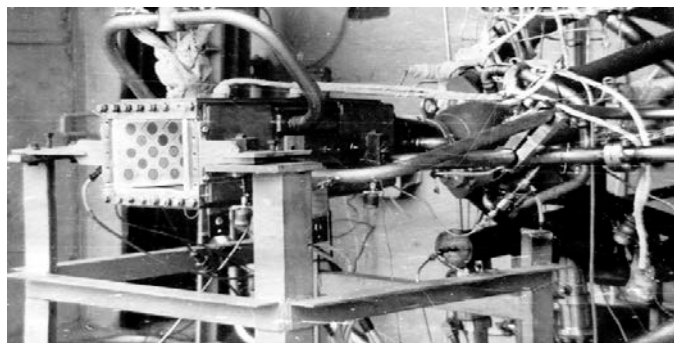


Рисунок 41 - МГД-генератор «Памир-2» на водород-кислородном топливе (N_3 - до 10 МВт, расход – до 25 кг/с, время работы – минуты)

Аналогичные исследования проводились в СССР и в ряде других странах. В СССР были разработаны, созданы и подробно исследованы МГД-генераторы на продуктах сгорания керосина в кислороде кратковременного действия (минуты) и на продуктах сгорания водорода в кислороде мощностью до 10 МВт (рисунок 41).

С 1965 г. в СССР проводятся работы по созданию мощных импульсных (3-12 с) МГДГ на различных рабочих телах. Уже к 1970 г. был создан опытный образец импульсного самовозбуждающегося МГДГ на твёрдом плазмообразующем (пороховом) топливе электрической мощностью до 10 МВт «Памир-1», а также импульсный МГДГ на гибридном топливе (мощность - до 15 МВт).

В дальнейшем было налажено промышленное производство и изготовлена, в том числе на основе блочного принципа, используя блочный принцип, серия импульсных МГДГ мощностью от 10 до 600 МВт на твёрдых (пороховых) топливах (рис.42, 43).

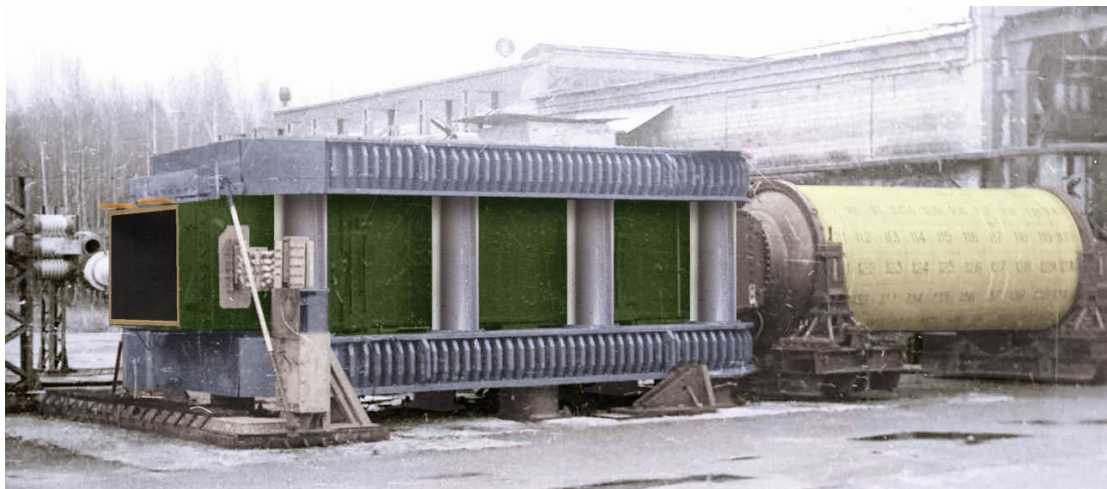


Рисунок 42 - Крупнейший в мире импульсный МГДГ «Сахалин» на пороховом топливе (Россия, N_3 – до 600 МВт, время импульса – до 8 с, длина канала – 4.5 м, к.п.э. – 11 %)

[Оглавление](#)

МГД-генераторы импульсного и кратковременного действия, а также взрывные, нашли применение в крупномасштабных экспериментальных и опытных работах в качестве автономных мощных импульсных источников электроэнергии для питания энергоёмких специальных нагрузок (ЭДУМ, лазеров, излучателей ультракоротких волн, МГД-ускорителей в составе аэродинамических труб), магнитных и электрических диполей (антенн) при проведении опытно-методических геофизических и электроразведочных работ в различных регионах СССР (рисунок 42-46).



Рисунок 43 - Мобильный импульсный МГД-генератор «Прикаспий» электрической мощностью до 10 МВт

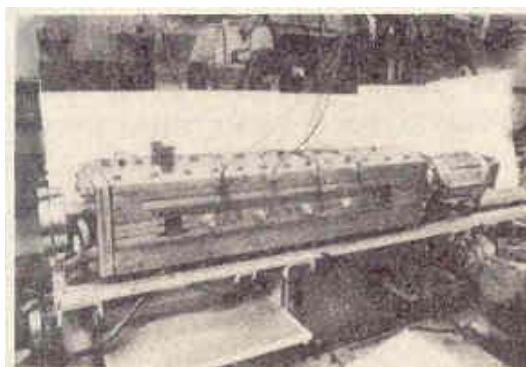


Рисунок 44 - Общий вид взрывного МГД-генератора ВГ-10 (Россия, N_3 —до 50 МВт, время импульса – 0.2 мс, длина канала – 1.0 м, к.п.э. – 4.8 %)

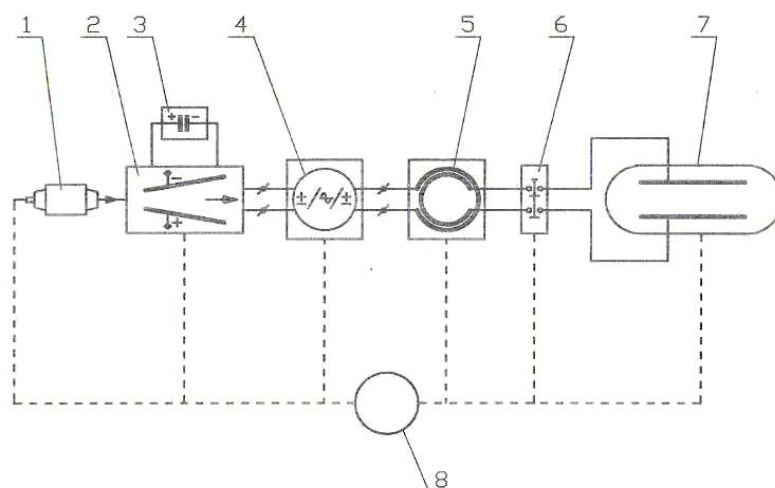


Рисунок 45 - Структурная схема автономной системы мультимегаваттного электропитания нагрузки на основе импульсного МГД-генератора: 1 – топливо (заряд); 2 – МГДГ; 3 – система начального возбуждения; 4 – преобразователь электроэнергии; 5 – индуктивный накопитель; 6 – силовоточный коммутатор; 7 – нагрузка (потребитель Э.Э.); 8 – система автоматического управления.

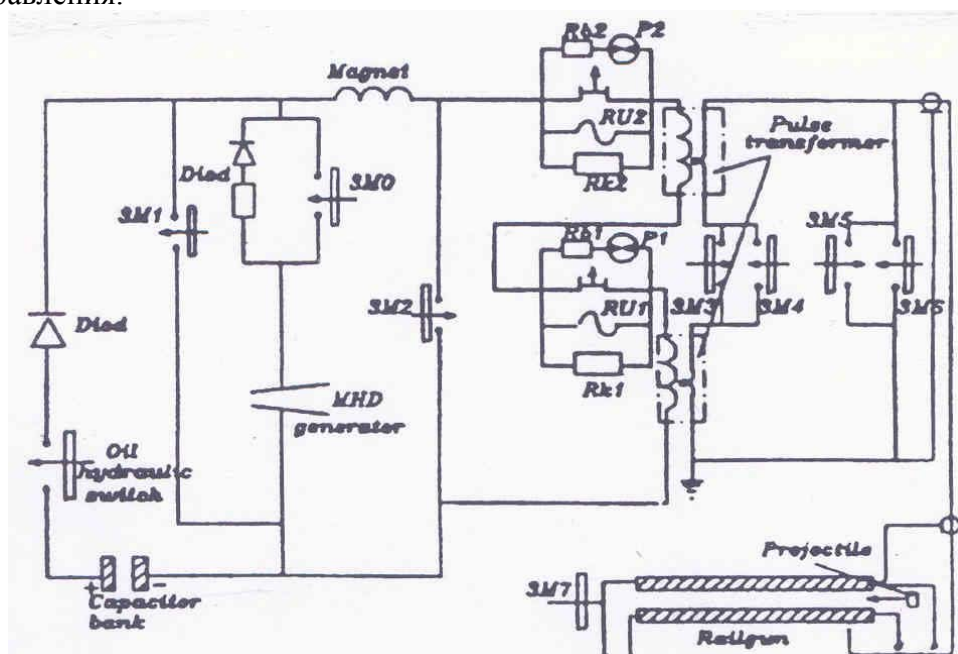


Рисунок 46 - Электрическая схема электропитания электродинамического ускорителя масс (рельсотрона) от импульсного самовозбуждающегося МГД-генератора

В США аналогичные работы, но в меньшем масштабе, проводились с 1968 г. Были созданы и исследованы импульсные МГДГ на пороховом топливе с различными типами каналов мощностью в несколько мегаватт. Фирма STD (1984 г., США) построила и испытала импульсный (до 30 с) мобильный (на трайлере) МГДГ на гибридном топливе с пиковой мощностью до 5 МВт, расположенный на трайлере.

Начиная с 1963 г. в США и СССР были созданы и детально исследованы различные типы неразрушаемых взрывных МГДГ с каналами различных форм и масштабов, в том числе со сверхпроводящими магнитами рисунок 9, 44). К настоящему времени получены следующие

[Оглавление](#)

щие результаты: время генерации 01-1 мс, мощность в импульсе – до 300 МВт, ток – сотни килоампер, электрическая энергия – десятки мегаджоулей, индукция магнитного поля – до 6.5 Тл, к.п.э. – до 6%, частота генерации импульсов – до 1 Гц.

К настоящему времени численно и экспериментально исследовано большое количество жидкометаллических МГД-преобразователей различного типа. Начиная с 70-х годов прошлого века были разработаны и изготовлены экспериментальные ЖМ-МГДГ и МГД-установки с замкнутыми жидкометаллическими контурами электрической мощностью до 10 кВт, в основном в США и СССР, которые подтвердили техническую возможность их создания и показали достаточно надёжную работу.

В настоящее время экспериментальные исследования ЖМ-МГДГ направлены в основном на изучение процессов разгона и сепарации двухфазной смеси и оптимизацию МГД-преобразования энергии в каналах. На экспериментальных установках с ЖМ-МГДГ (эвтектика К-Na, ртуть) получены электрические мощности до нескольких кВт при к.п.э. в несколько процентов (рисунок 47, 48).

В последнее время возобновился интерес к ЖМ-МГДГ в составе стационарных космических ядерных ЭУ замкнутого цикла без движущихся частей мощностью от 1 кВт до 30 МВт, к.п.д. – до 5% (в перспективе - до 15%), что обусловлено их преимуществами и особенностями.



Рисунок 47 - Общий вид экспериментального индукционного ЖМ-МГДГ с кольцевой обмоткой

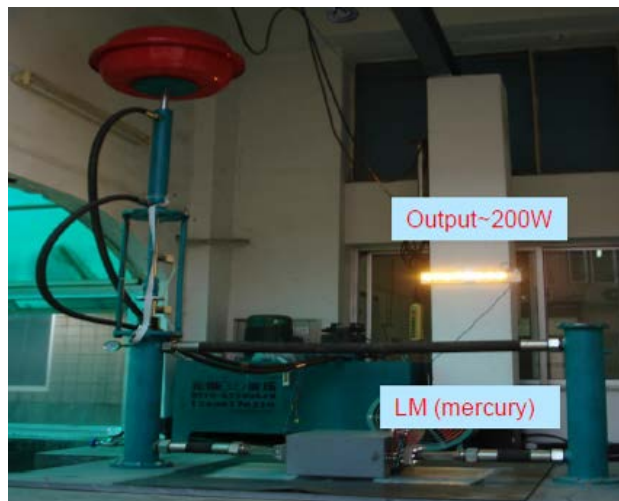


Рисунок 48 - Общий вид экспериментального кондукционного ЖМ-МГДГ (ртуть) с постоянным магнитом (КНР)

[Оглавление](#)

Также изучается возможность их использования в маломощных автономных стационарных ЭУ с постоянными магнитами для преобразования различных возобновляемых видов энергии (энергии морских волн (рисунок 49) и др.).

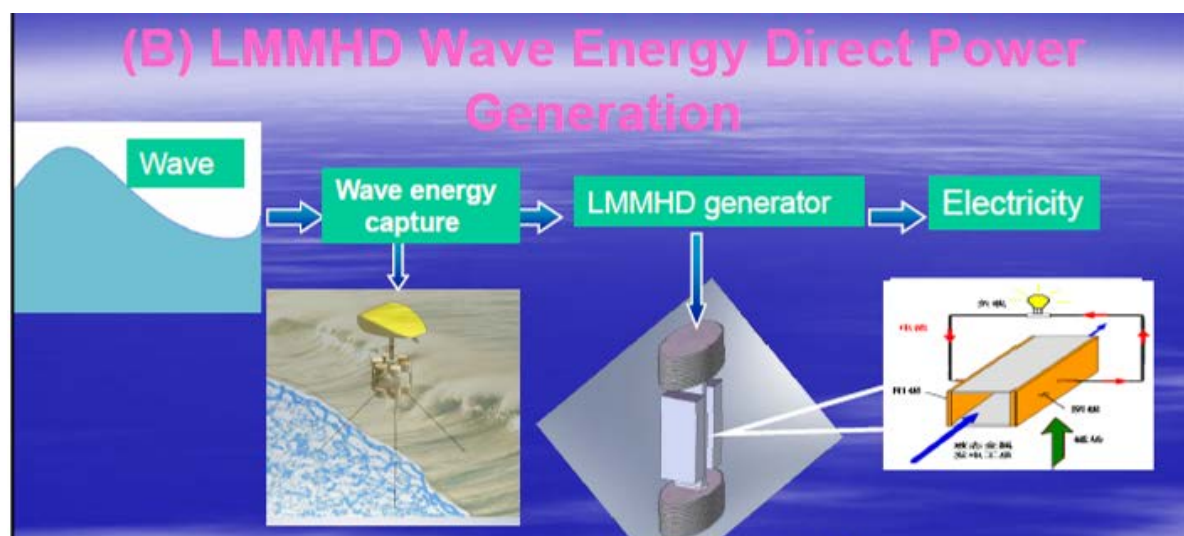


Рисунок 49 - Схема преобразования энергии волн в электрическую с помощью ЖМ-МГДГ

Освоен промышленный выпуск кондукционных и индукционных ЖМ-МГД-насосов и МГД-дресселей различного масштаба и назначения, прежде всего для жидкометаллических контуров теплоносителей ядерных реакторов (рисунок 50, 51).

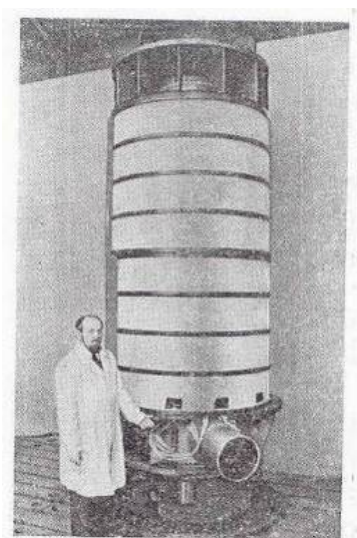


Рисунок 50 - Общий вид МГД-насоса ЦЛИН-6/900

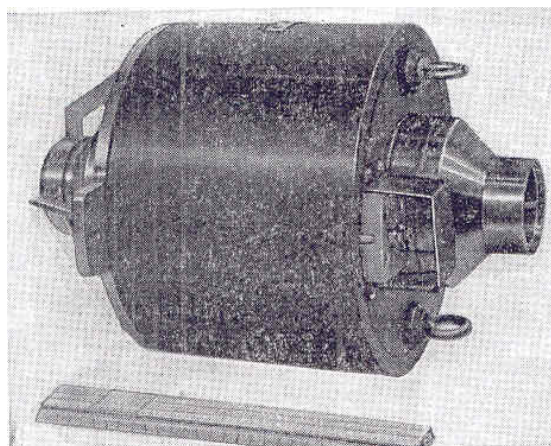


Рисунок 51 - Общий вид МГД-дресселя

В настоящее время интенсивно исследуются возможности и перспективы применения мультимегаваттных МГДГ в составе аэрокосмических и транспортных (судовых) ЭУ и энергосиловых комплексов, в том числе в составе комбинированных прямоточных двигателей (рисунок 11). В качестве таких МГДГ, в зависимости от целевого назначения, рассматрива-

[Оглавление](#)

ются импульсные МГДГ на пороховых и гибридных топливах (время работы 1-100 с, мощность 1-1000 МВт, к.п.э. – до 15%), МГДГ кратковременного действия на углеводородных, криогенных и специальных химических топливах (рисунок 52, 53, время работы - минуты-час, мощность – до 50 МВт, к.п.э. – до 20%), МГДГ в комбинации с гетерогенными и газо-фазными высокотемпературными ядерными реакторами открытого цикла (время работы - часы, мощность 10-100 МВт, к.п.э. – 10% - 30%) (рисунок 54-56).

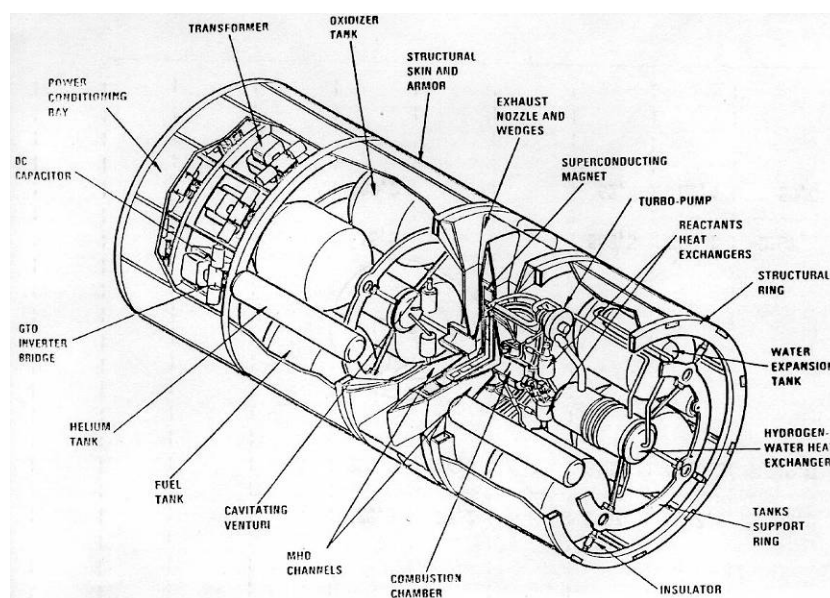


Рисунок 52 - Космическая энергетическая установка с дисковым МГД-генератором на жидком (или гибридном) топливе мощностью 10 МВт (США)

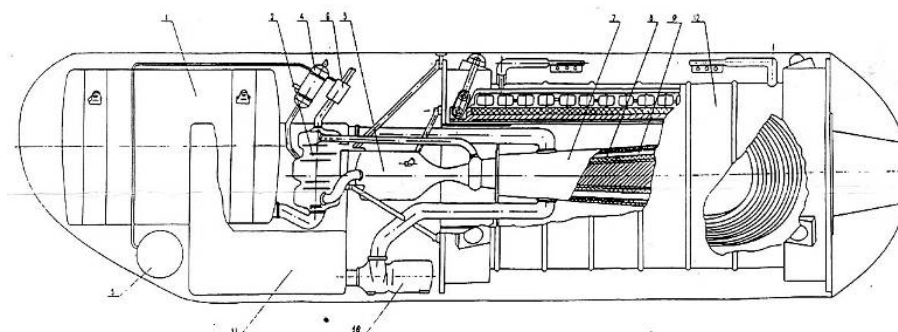


Рисунок 53 - Космическая МГД-установка на керосин-кислородном топливе мощностью 25 МВт (Россия)

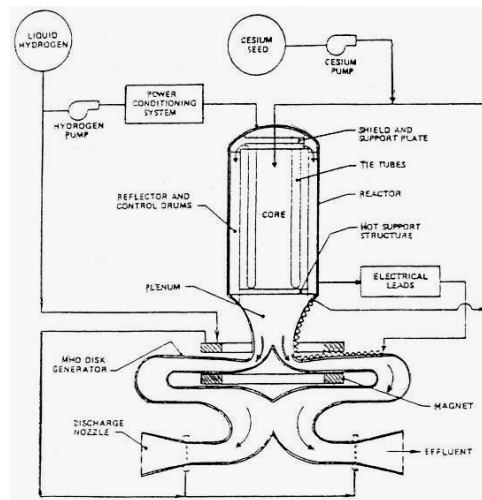


Рисунок 54 – Структурная схема космической ядерной энергоустановки открытого цикла на основе дискового МГДГ мощностью 100 МВт и реактора для ЯРД NERVA (США)

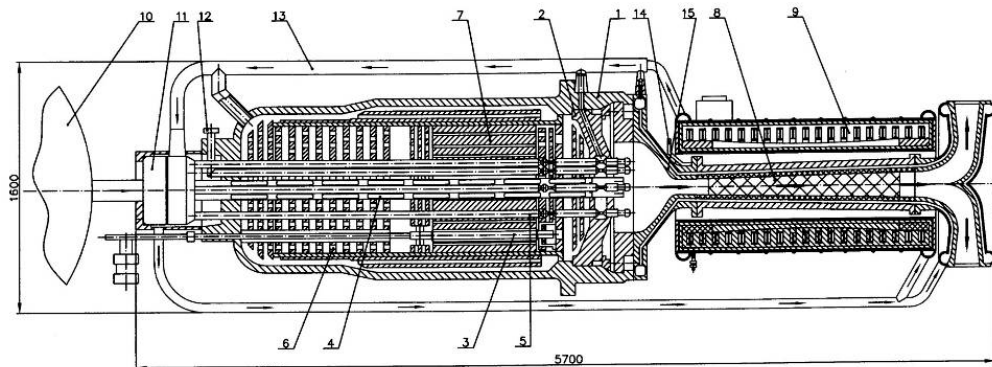


Рисунок 55 - Конструктивная схема космической ядерной МГД-установки открытого цикла мощностью 20 МВт на основе реактора ИВГ-1 для ЯРД (Россия):

- 1- резервуар с жидким водородом; 2 – турбонасосный агрегат; 3 – корпус реактора;
- 4 – активная зона реактора; 5 – трубопровод газообразного водорода;
- 6 – трубопровод подачи цезия; 7 – дополнительная теньевая защита; 8 – сопло;
- 9 – МГД-канал; 10 – магнит; 11 – поворотно-выхлопное безмоментное устройство



Рисунок 56 - Технический облик космической ядерной МГД-установки открытого цикла электрической мощностью 20 МВт

[Оглавление](#)

В последние годы интенсивно развиваются исследования в области плазменной магнитоаэродинамики, основными направлениями которых являются:

- комбинированные (байпасные) гиперзвуковые прямоточные МГД-двигатели (рисунок 11);
- бортовые энергетические МГД-установки (рисунок 52-56);
- МГД-ускорители для космических двигательных установок (рисунок 12);
- управление возвращением космического аппарата на Землю («МГД-парашют») (рисунок 57);
- управление структурой гиперзвукового течения;
- уменьшение лобового сопротивления аэрокосмического аппарата (рисунок 57);
- управление структурой и устойчивостью динамического и теплового пограничных слоёв (рисунок 57);
- управление положением и интенсивностью ударных волн (рисунок 57, 58);
- управление виртуальной поверхностью летательного аппарата (рисунок 57);
- улучшение горения топлива в сверх- и гиперзвуковых прямоточных двигателях и ряд других.

Эти исследования могут изменить в дальнейшем количественно, а, возможно, и качественно характеристики аэрокосмической техники.

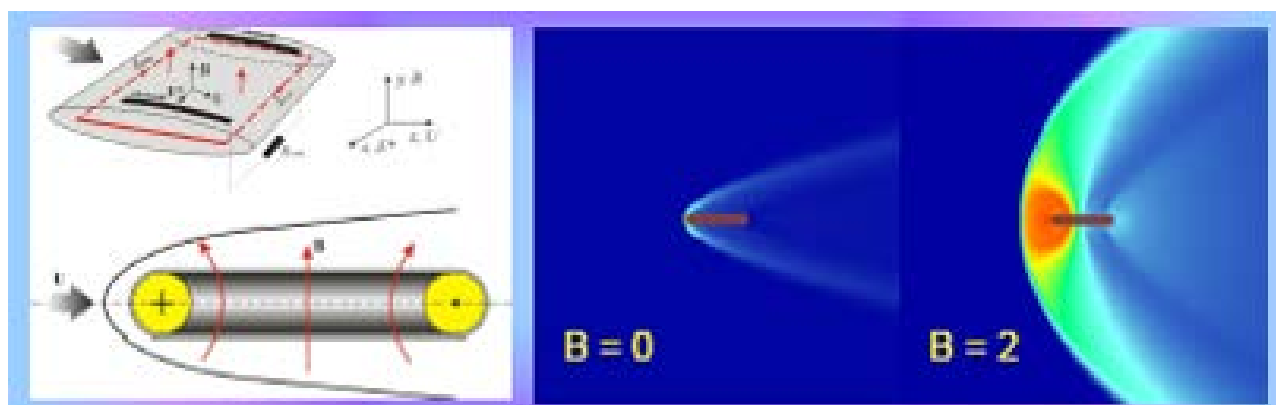
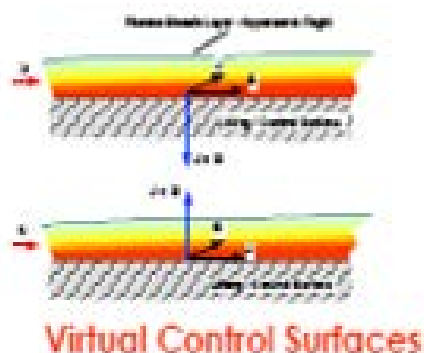
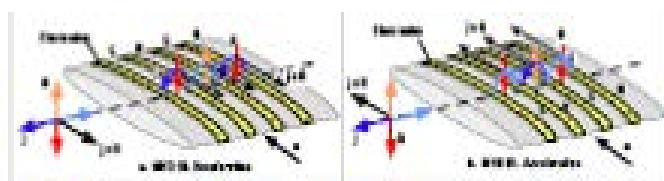


Рисунок 57 - Принципиальные схемы МГД-управления обтеканием потоком поверхности и МГД-торможения («МГД-парашют»)



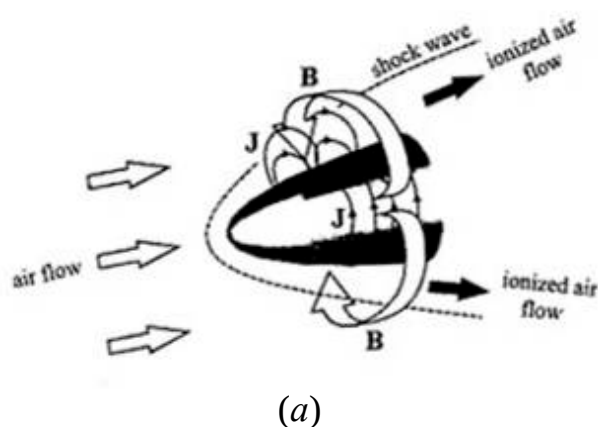
Virtual Control Surfaces



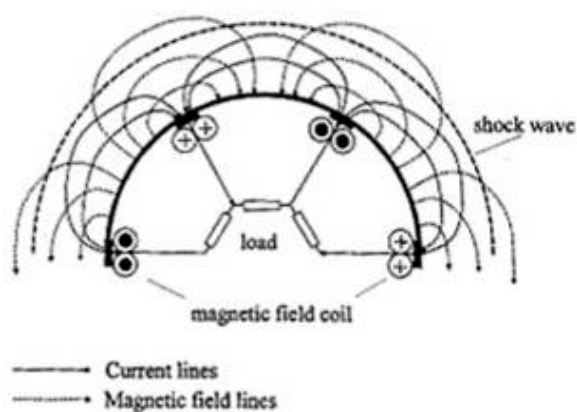
Boundary Layer Control

Рисунок 58 - Схема МГД-управлением виртуальной поверхностью летательного аппарата

Рисунок 59 - Схема МГД-управлением пограничным слоем



(a)



(б)

Рисунок 60 - Схема обтекания головной части воздушно-космического аппарата в условиях МГД-взаимодействия (a) и конфигурация силовых линий магнитного поля и тока (б)

Дальнейшее развитие МГД-преобразователей и перспективы их применения будут зависеть от их конкурентоспособности, характеристик и функциональных возможностей, которые будут улучшаться и расширяться по мере развития плазменных, электромагнитных и высокотемпературных технологий, а характеристики традиционных энергетических и двигательных установок будут приближаться к своим предельным значениям.

Литература

1. *Роза Р.* Магнитогидродинамическое преобразование энергии. М.: Мир, 1970, 286 с.
2. *Саттон Дж., Шерман А.* Основы технической магнитной гидродинамики. М.: Мир, 1968, 485 с.
3. Магнитогидродинамическое преобразование энергии. Физико-технические аспекты. Под ред. В.А.Кириллина и А.Е.Шейндлина. М.: “Наука”. 1983, 368 с.
4. *В.В.Бреев, А.В.Губарев, В.П.Панченко.* Сверхзвуковые МГД-генераторы. М.: Энергоатомиздат, 1988, 240 с.
5. Импульсные МГД-преобразователи химической энергии в электрическую. Под ред. А.Е.Шейндлина и В.Е.Фортова. М.: Энергоатомиздат, 1997, 267 с.
6. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Под ред. В.Е.Фортова. М.: “Наука”, 2000, т.IV, 507 с.
7. *Малюта Д.Д., Панченко В.П.* Создание импульсных МГД-генераторов. В книге “Пути учёного. Е.П.Велихов”. М.: РНЦ “Курчатовский институт”, 2007. С. 141-146.
8. *Панченко В.П.* О некоторых отечественных разработках МГД-установок кратковременного действия. Там же, С. 156-166.
9. *Панченко В.П.* Низкотемпературная плазма как рабочее тело МГД-преобразователей энергии. Учебное пособие. Часть 1. Равновесная плазма. М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2002 г. – 58 с.; Часть 2. Неравновесная плазма. М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2002 г. – 68 с.
10. *Том Р.Дж., Тарр Дж.М.* Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. М.: Энергоатомиздат, 1985, 272с.
11. *Ватажин А.Б., Любимов Г.А., Регирер С.А.* Магнитогидродинамические течения в каналах. М.: Наука, 1970, 572 с.
12. *Мичнер М., Кругер Ч.* Частично ионизованные газы. М.: МИР, 1976, 496 с.

Оглавление