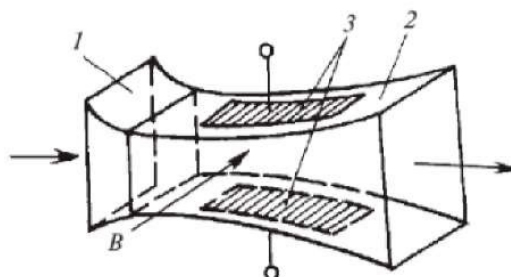


### План лекции:

1. Новые способы преобразования энергии. Цикл Магнитогидродинамического генератора
2. Вопросы для дистанционного освоения лекции

### 1. НОВЫЕ СПОСОБЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ. ЦИКЛ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

В связи с прогрессом в разработках методов получения низкотемпературной плазмы и высокотемпературных конструкционных материалов в последнее время возник интерес к тепловым установкам с магнитогидродинамическими (МГД) генераторами.



На рисунке представлена схема МГД - генератора, принцип действия которого состоит в следующем.

Газ, служащий рабочим телом, совместно с небольшим количеством легко ионизирующейся добавки (щелочными металлами, например калием или цезием), **нагревается** за счет подвода теплоты от горячего источника до **столь высоких температур, что частично ионизируется, т.е. переходит в плазменное состояние**. В этом состоянии он представляет собой смесь свободных электронов с электрически нейтральными атомами и ионами, т.е. является электропроводящей средой.

Затем этот газ расширяется в сопле 1, где приобретает весьма высокую скорость (порядка 1000 м/с), и поступает в канал 2 МГД - генератора. Канал МГД-генератора находится в магнитном поле интенсивностью  $B$  (это магнитное поле создается с помощью специальной магнитной системы), силовые линии которого перпендикулярны направлению скорости потока.

Как известно из электродинамики, при пересечении проводником силовых линий магнитного поля в этом проводнике возникает ЭДС (в частности, в обычном электрогенераторе ЭДС в обмотке ротора возникает при пересечении проводниками обмотки ротора силовых линий магнитного поля, образуемого электромагнитом статора).

**Поскольку частично ионизированный газ является электропроводящей средой, при движении этого газа в магнитном поле также возникают ЭДС и электрический ток; этот ток течет в направлении, перпендикулярном плоскости, проходящей через векторы скорости газа и индукции магнитного поля.** Таким образом, в рабочем объеме МГД - генератора генерируется электроэнергия, отводимая с электродов 3, подключаемых к потребителю электроэнергии.

В МГД - генераторах теплота, выделяющаяся при сгорании топлива, расходуется на нагрев рабочего тела, рабочее тело расширяется в сопле, приобретая значительную кинетическую энергию, и только затем эта кинетическая энергия, а также энтальпия рабочего тела преобразуются в канале МГД - генератора в электроэнергию. В этой связи **МГД - генераторы правильнее называть устройствами безмашинного**

**преобразования теплоты в электроэнергию**, подчеркивая этим то обстоятельство, что в отличие от обычных турбогенераторов в **МГД - генераторах отсутствуют движущиеся части**. Это отличие является принципиальным преимуществом МГД - генератора, обеспечивающим его большую эффективность.

Удельная мощность, вырабатываемая МГД - генератором, пропорциональна величине  $\sigma w^2$ , где  $\sigma$  - электропроводность рабочего тела [ $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ];  $w$  - скорость рабочего тела в канале МГД - генератора [ $\text{м} / \text{с}$ ].

В МГД - генераторе в электроэнергию преобразуется энергия потока плазмы, движущейся в канале генератора (подобно тому как в турбогенераторе в электроэнергию преобразуется кинетическая энергия вращения ротора). Так, в МГД - генераторе простейшего типа рабочее тело, адиабатно расширяясь от состояния 1 до состояния 2, производит электроэнергию, отводимую с электродов генератора, количество которой равно, как обычно, разности энтальпий рабочего тела:

$$l^{\text{МГД}} = h_5 - h_4, \quad (1)$$

где  $l^{\text{МГД}}$  - работа, произведенная в МГД - генераторе.

Основное преимущество МГД - генератора состоит в том, что он позволяет более эффективно по сравнению с газотурбинными и паротурбинными установками использовать теплоту высокого температурного потенциала, выделяющуюся при сгорании топлива (химического или ядерного).

**Отсутствие в МГД - генераторе движущихся частей, подобных лопаткам турбины, испытывающим помимо термических огромные механические напряжения, позволяет резко повысить температуру используемого рабочего тела.** Температура газа на входе в МГД - генератор, работающий на продуктах сгорания органических топлив, может достигать  $2500 - 2600 \text{ }^\circ\text{C}$  по сравнению с максимальной температурой  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  в паровых и до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$  в газовых турбинах. Таким образом, верхняя температура рабочего тела в МГД - генераторе соответствует температуре горячего источника теплоты, в связи с этим значительно возрастает термический КПД теплосиловой установки. Если учесть при этом, что МГД - генератор имеет мало ограничений по сосредоточению больших мощностей в одном агрегате (причем КПД генератора растет с увеличением мощности), то становится очевидной перспективность теплосиловых установок с МГД - генераторами для большой энергетики.

Теплосиловые энергетические установки с МГД - генератором могут выполняться по двум схемам - **по схеме открытого цикла и по схеме замкнутого цикла**.

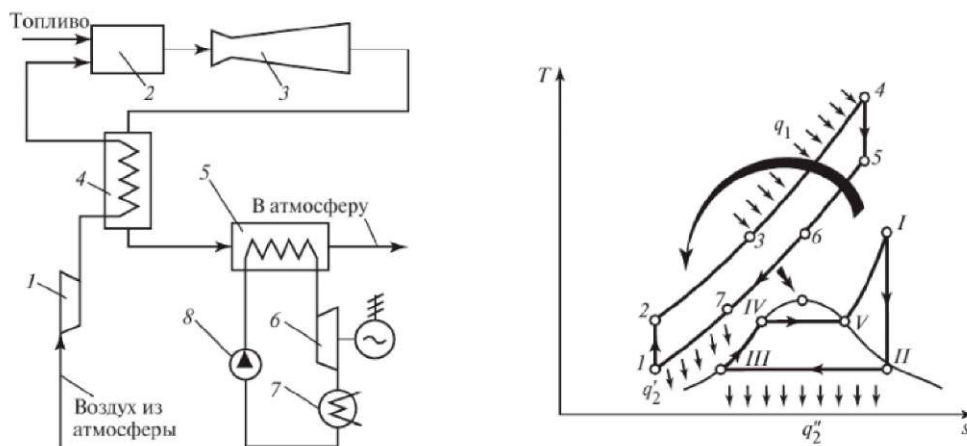


Схема МГД - установки, **работающей по открытому циклу**, представлена на рисунке.

Атмосферный воздух сжимается компрессором 1 до давления  $p_1$  и подается в камеру сгорания 2. В эту же камеру сгорания подается топливо. Сгорание в камере происходит при постоянном давлении  $p_1 = \text{const}$ . Из камеры сгорания горячие продукты сгорания поступают в МГД - генератор 3. Перед МГД - генератором в поток рабочего тела вводится упоминавшаяся выше ионизирующая добавка. В МГД - генераторе рабочее тело - ионизированные продукты сгорания - адиабатно расширяется от состояния с давлением  $p_1$ , и температурой  $T_1$  на входе до состояния с давлением  $p_2$  и температурой  $T_2$ , на выходе, **совершая при этом техническую работу (производя электроэнергию).**

Продукты сгорания, выходящие из МГД - генератора и имеющие весьма высокую температуру, превышающую  $2000^\circ\text{C}$ , поступают в регенеративный теплообменник - воздухоподогреватель 4, где они охлаждаются, подогревая воздух, подаваемый в камеру сгорания. **Продукты сгорания, выходящие из воздухоподогревателя, имеют еще высокую температуру.** Естественно, необходимо эффективно использовать теплоту высокого температурного потенциала. **Одним из решений является использование второго, нижнего теплосилового цикла - пароводяного.** После воздухоподогревателя продукты сгорания поступают в парогенератор 5, где они отдают теплоту воде, циркулирующей в пароводяном контуре установки. Пар, полученный в этом парогенераторе, поступает в паровую турбину 5, где, расширяясь, производит работу. Затем пар конденсируется в конденсаторе 7, и далее насосом 8 вода направляется снова в парогенератор 5.

**Продукты сгорания охлаждаются в парогенераторе 5 примерно до  $150^\circ\text{C}$ . После парогенератора они выбрасываются в атмосферу.**

Установка, выполненная по рассмотренной схеме, представляет собой по существу еще одну **разновидность бинарных теплосиловых установок**, рассмотренных нами на предыдущих лекциях.

Цикл МГД - установки, работающей по открытой схеме, изображен на  $T,s$  - диаграмме. Здесь 1-2-3-4-5-6-7-1 – МГД - ступень цикла, а I-II-III-IV-V-I - пароводяная ступень цикла. В этой диаграмме 1-2 - процесс адиабатного сжатия в компрессоре 1 от давления  $p_2$  до давления  $p_1$ ; 2-3-4 - изобара подвода теплоты в цикле  $p_1 = \text{const}$  (2-3 - подвод теплоты в регенеративном воздухоподогревателе, а 3-4 - подвод теплоты в камере сгорания); **4-5 адиабатный процесс расширения с производством работы в МГД - генераторе**; 5-6-7-1 - изобарный ( $p_2 = \text{const}$ ) процесс отвода теплоты в цикле; 5-6 - отдача теплоты воздуху в регенеративном теплообменнике 4; 6-7 - отдача теплоты воде в парогенераторе 5; 7-1 - отвод теплоты к холодному источнику (с продуктами сгорания, выбрасываемыми в атмосферу).

В нижней ступени I-II - адиабатное расширение пара с отдачей внешней работы в турбине; II-III - изобарный ( $p_{II} = \text{const}$ ) процесс отвода теплоты в конденсаторе; III-IV-V-I - изобарный ( $p_I = \text{const}$ ) процесс подвода теплоты в парогенераторе.

Как и раньше в случаях бинарных циклов, циклы 1-2-3-4-5-6-7-1 и I-II-III-IV-V-I построены для различных количеств рабочего тела - пароводяной цикл для 1 кг воды, а собственно МГД - цикл - для  $m$  кг рабочего тела. Кратность расхода рабочего тела МГД - контура по отношению к расходу воды определяется следующим образом:

$$m = \frac{h_I - h_{III}}{h_6 - h_7}, \text{ или точнее } m = \frac{h_I - h_{III}}{h_6 - h_7} \frac{1}{\eta_{ТО}}, \quad (2)$$

где:  $\eta_{ТО}$  - КПД теплообменника.

Термический КПД этого цикла определяется соотношением, аналогичным для  $\eta_T$  бинарного цикла:

$$\eta_T^{МГД} = \frac{m \cdot l^{МГД} + l^B}{m \cdot q_1}, \quad (3)$$

где:  $l^{МГД}, l^B$  - работа, производимая соответственно в МГД – цикле и в паротурбинном цикле;  $q_1$  - теплота, подводимая к 1 кг рабочего тела МГД – цикла.

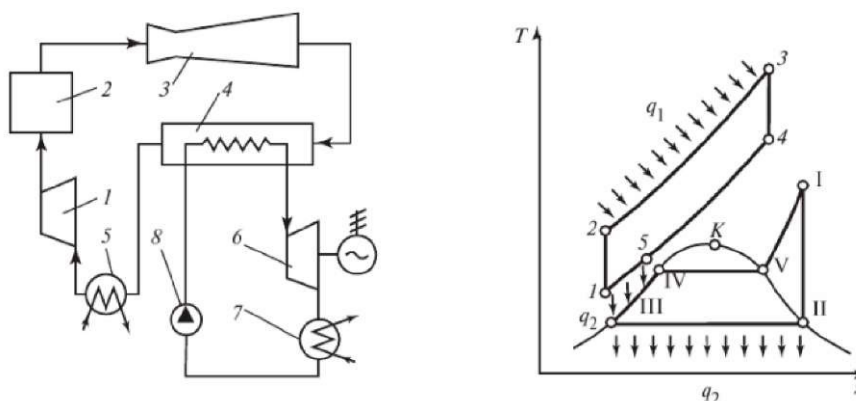
Применительно к открытому циклу, изображенному на  $T, s$  - диаграмме уравнение записывается следующим образом:

$$\eta_T^{МГД,откр} = \frac{m \cdot (h_4 - h_5 - h_2 + h_1) + (h_I - h_{II})}{m \cdot (h_4 - h_3)} \quad (4)$$

Для МГД - установок, которые должны работать по открытому циклу, принимаются обычно такие параметры рабочего тела: верхнее давление цикла примерно такое же, как в газотурбинных циклах  $p_1 = 0,5...1$  МПа; давление за соплом, в канале МГД - генератора, определяется в процессе оптимизации, а давление на выходе из МГД - генератора обычно близко к атмосферному, что удобно с чисто технической точки зрения,  $p_2 = 98$  кПа; в компрессоре сжимается воздух, отбираемый из окружающей среды,  $T_1 = 20$  °С; температура подогрева воздуха  $T_3 = 1500...2000$  °С; температура в камере сгорания МГД - установки значительно выше температуры в топке парового котла,  $T_4 = 2500...2600$  °С.

Как показывает анализ, при этих параметрах верхней ступени цикла параметры нижней (пароводяной) ступени цикла целесообразно выбрать следующими:  $p_I = 24500$  кПа,  $T_I = 570$  °С,  $p_{II} = 4$  кПа. Эти параметры являются стандартными для крупных паросиловых установок.

**Термический КПД цикла МГД - установки при этих параметрах рабочего тела, подсчитанный по уравнению (4), составляет примерно 0,7. Эта величина выше соответствующего КПД лучших существующих паротурбинных и газотурбинных установок.**



**МГД - установки, работающие по замкнутому циклу** имеют ряд преимуществ по сравнению с рассмотренными выше. Схема такой установки изображена на рисунке.

**В этой установке рабочее тело сохраняется в контуре неизменным. Это позволяет использовать в качестве рабочего тела любой газ, наиболее подходящий по своим физическим свойствам, а не только воздух и продукты сгорания -**

**единственно возможное рабочее тело в установках открытого цикла. В качестве горячего источника теплоты в замкнутом цикле может быть использован ядерный реактор.**

Рабочее тело, сжимаемое компрессором 1 от давления  $p_2$  до давления  $p_1$ , подается в ядерный реактор 2, где нагревается от температуры  $T_2$ , до температуры  $T_3$ . Рабочее тело поступает в МГД - генератор 3, в котором, совершая работу, адиабатно расширяется от давления  $p_1$  до давления  $p_2$ . Затем, как и в открытом цикле, рабочее тело поступает в парогенератор 4, где передает теплоту воде - рабочему телу пароводяного контура. Ввиду того что температура газа на выходе из парогенератора 4 обычно все-таки несколько высока для газа, подаваемого в компрессор, этот газ дополнительно охлаждают в водяном теплообменнике 5. Элементы пароводяного контура, те же, что и раньше.

Для верхней ступени цикла: 1-2 - адиабатное сжатие в компрессоре; 2-3 – изобарный процесс подвода теплоты; 3-4 - адиабатное расширение с отдачей работы в МГД - генераторе; 4-5-1 - изобарный процесс отвода теплоты (4-5 - отвод теплоты к пароводяной ступени, 5-1 - отвод теплоты в водяном теплообменнике).

Отношение расхода рабочего тела в собственно МГД - цикле к расходу воды в нижней ступени цикла  $m$  определяется соотношением, аналогичным (2):

$$m = \frac{h_I - h_{III}}{h_4 - h_5} \frac{1}{\eta_{ТО}}, \quad (5)$$

а термический КПД МГД - установки замкнутого цикла в соответствии с уравнением (3) равен:

$$\eta_{Т}^{МГД, замк} = \frac{m \cdot (h_3 - h_4 - h_2 + h_1) + (h_I - h_{II})}{m \cdot (h_3 - h_2)} \quad (6)$$

разумеется, это соотношение аналогично уравнению (4) для открытого цикла; индексы соответствуют обозначениям состояний на  $T, s$  - диаграмме рассматриваемого цикла.

Следует заметить, что в качестве рабочего тела МГД - установки, работающей по замкнутому циклу, удобнее всего использовать аргон или гелий. Эти газы обладают замечательным качеством - при более низких, чем в случае использования продуктов сгорания, температурах они с соответствующими добавками цезия или калия дают возможность иметь большую электропроводность по сравнению с электропроводностью продуктов сгорания. Так, при использовании гелия с добавкой паров цезия в качестве верхней температуры можно выбрать температуру  $2000^{\circ}\text{C}$ ; при этом электропроводность будет такой же, как и для продуктов сгорания при  $2500^{\circ}\text{C}$ . Это обстоятельство упрощает задачу создания МГД - генератора с применением современных высокотемпературных конструкционных материалов.

Термический КПД МГД - установки, работающей по замкнутому циклу, может составлять около 0,65. Таким образом, замкнутая схема МГД - установки, так же как и открытая, обеспечивает высокое значение термического КПД.

За последние десятилетия был создан ряд МГД - установок, способных работать в импульсном режиме (с длительностью импульса несколько десятков секунд).

**Что же касается МГД - установок для тепловых электростанций, то сроки их создания будут определяться прогрессом в развитии методов повышения электрофизических характеристик низкотемпературной плазмы, а также прогрессом в разработке высокотемпературных конструкционных материалов с длительным**

**ресурсом работы и в создании магнитных систем (со сверхпроводящей обмоткой) для МГД - генератора.**

Наряду с МГД - генераторами, в которых в качестве электропроводящей среды используется частично ионизированный газ, **рассматриваются схемы МГД - установок, рабочим телом которых являются жидкие металлы** (обычно это щелочные металлы, такие как натрий и некоторые другие). Значительно более высокая электропроводность жидкого металла (на 4-5 порядков выше, чем частично ионизированного газа) позволяет получить большие мощности при относительно невысоких скоростях движения жидкого металла в МГД - генераторе. Температура жидкого металла на входе в такой генератор с точки зрения эффективности работы самого генератора может быть и низкой, лишь немного превышающей температуру плавления металла. Для ускорения рабочего тела на входе в МГД - генератор часто предлагают использовать инжектор, работающий на паре того или другого жидкого металла.

Коэффициент полезного действия жидкометаллических МГД - установок заметно ниже, чем плазменных, в первую очередь вследствие малой экономичности способа ускорения жидких металлов, например с помощью инжектора, однако **компактность** установки за счет значительно больших удельных мощностей и **применение для обеспечения циркуляции рабочего тела устройства, не имеющего движущихся частей** (электромагнитного насоса вместо громоздкого компрессора), делают жидкометаллические МГД - установки привлекательными в ряде случаев (например, в качестве транспортных энергетических установок).

## 2. ВОПРОСЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОСВОЕНИЯ ЛЕКЦИИ

1. Что является рабочим телом в МГД генераторе ?
Ответ:
2. Укажите основные преимущества МГД генераторов по отношению к обычным ГТУ установкам?
Ответ:
3. Можно ли отнести циклы МГД генераторов к бинарным циклам?
Ответ:
4. Какие преимущества имеет замкнутый цикл МГД генератора?
Ответ:
5. Что препятствует разработке высокоэффективных МГД генераторов?
Ответ:
Фамилия Имя Отчество:
Группа:
Подпись:
Дата: