

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. К. Осадчий, Г. М. Щеголев, Термодинамический анализ циклов промышленных ТЭС, включающих МГД-генератор с каналом, защищенным вдувом инертного газа, *ТВТ*, 1970, том 8, выпуск 5, 1050–1055

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.239.90.61

11 ноября 2024 г., 00:06:45



УДК 621.313.12:538.4

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИКЛОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЭС, ВКЛЮЧАЮЩИХ МГД-ГЕНЕРАТОР С КАНАЛОМ, ЗАЩИЩЕННЫМ ВДУВОМ ИНЕРТНОГО ГАЗА

В. К. Осадчий, Г. М. Щеголев

Приведены результаты термодинамического анализа кислородных циклов ТЭС с МГД-генератором с защищенными вдувом азота (побочного продукта разделения воздуха на кислородной станции) перфорированными стенками канала. Показано, что схемы с использованием вдува по энергетической эффективности близки к схемам с наружным водяным охлаждением. Применение вдува позволит улучшить ряд конструктивных характеристик схем МГДЭС.

Многие из работ, связанных с исследованиями МГД-метода преобразования тепловой энергии в электрическую, посвящены анализу энергетической эффективности блоков: МГД-генератор (МГДГ) — паросиловая установка. В большинстве публикаций, в которых рассматривается электростанция с МГДГ открытого цикла, например [1—6], термодинамические расчеты проведены для схем, основное отличие которых между собой состоит в способе достижения необходимых температур рабочего газа в канале МГДГ. В зависимости от этого схема содержит либо высокотемпературный регенеративный теплообменник, либо кислородную установку, позволяющую использовать в качестве окислителя обогащенный кислородом воздух. Общим для этих схем является применение водяного охлаждения канала МГДГ. Для этой цели обычно используется конденсат из паросиловой части блока.

Вместе с тем, такое охлаждение имеет ряд недостатков. Остановимся на некоторых из них.

а. Использование для охлаждения стенок канала конденсата с давлением ниже критического, вследствие высоких тепловых потоков в стенку канала МГДГ, связано с опасностью возникновения кризиса кипения. Особенно опасны в этом отношении начальные участки каналов.

б. Переход к закритическому давлению в системе охлаждения полностью не устраняет возможность локального повышения температуры внутренней поверхности охлаждаемой стенки выше допустимых пределов. Как показано в [7], при тепловых потоках $0,5-1 \text{ Мвт/м}^2$ в условиях эксперимента температура стенки составляла 600°C . В то же время известно, что на начальных участках канала МГДГ тепловые потоки могут быть на порядок выше [8].

в. Охлаждение канала и дальнейшая передача тепла конденсату с помощью промежуточного теплоносителя с высокой температурой кипения связано как с конструктивными осложнениями, так и дополнительными энергетическими и экономическими затратами.

г. Применение футерованных конструкций стенок канала МГДГ вызывает необходимость применения материалов, совместимых в условиях весьма высоких температур в химическом отношении с агрессивным плазменным потоком.

Указанные недостатки можно обойти путем применения массообменной защиты стенок канала МГДГ посредством продувания сквозь них химически инертного газа.

Ввиду больших технических и экономических трудностей по созданию высокотемпературных регенеративных воздухоподогревателей схемы многих МГДЭС будут содержать кислородные установки, что позволит использовать химически инертный газ — азот, побочный продукт разделения воздуха, для целей защиты канала вдувом. Такого рода защита стенок МГДГ может в значительной мере уменьшить их коррозионный и эрозионный износ, а также будет препятствовать осаждению на изоляционных стенках калия или его соединений, что улучшит электроизоляционные характеристики канала. Следует учесть, что по сравнению с наружным водяным охлаждением канала упрощается и система использования тепла в паросиловом хвосте станции.

Несмотря на указанные положительные стороны, применение схем МГДЭС с защитой канала вдувом может вызвать сомнение относительно их энергетической эффективности по следующим причинам: а) вдуваемый газ не только возвращает тепловые потери от охлаждения стенок в канал, но и снижает температуру потока продуктов сгорания; б) пропорционально относительному количеству вдуваемого газа возрастает потеря с выходной скоростью из канала МГДГ; в) вследствие увеличения количества выбрасываемых газов, растет потеря тепла с дымовыми газами, уходящими из паровой части схемы.

Применение защиты электродов посредством продувания сквозь них химически инертного газа, не содержащего ионизирующейся присадки, может вызвать также опасение, что отеснение проводящего слоя от поверхности электрода приведет к разрыву электрической цепи. Однако из анализа экспериментальных работ [9—11] можно видеть, что существует диапазон расходов, при которых наблюдается значительное снижение эрозионного износа электродов без существенного ухудшения электрических характеристик.

Очевидно, что ответ на вопрос об энергетической эффективности схемы со вдувом может быть получен только путем термодинамического анализа всего цикла. Впервые ориентировочный анализ подобного цикла был выполнен в работе [12]. Результаты, полученные в [12], позволили надеяться, что схема со вдувом по тепловой экономичности будет близка к экономичности кислородных циклов МГДЭС, рассмотренных, например, в [3, 5].

Возможность достижения сравнительно высоких энергетических характеристик схем МГДЭС с применением вдува показана также в [13], в которой исследовалось влияние инжекции различных газов через стенки МГДГ, входящего в станцию мощностью 2000 Мвт.

Для более точного суждения о перспективности электростанций, включающих МГДГ с каналом, защищенным вдувом, нами выполнены варианты расчеты кислородных циклов МГДЭС для достаточно широкого диапазона мощностей станции и различных температур стенок канала. В качестве охлаждающего газа использован химически инертный газ — азот. Температурные режимы узлов всей схемы были выбраны из условия обеспечения их длительной работы при применении известных конструктивных материалов. Расчеты производились по методике, разработанной в ИТТФ АН УССР. Особенность анализа по этой методике — выполнение расчетов в два этапа. Вначале, на основе решения магнитогидродинамических уравнений для канала $U - V - Z$ (скорость, магнитная индукция и магнитный зазор постоянные вдоль канала), определялись параметры на входе в канал МГДГ, исходя из условия получения максимума энергии с единицы массы потока. При этом, в соответствии с [12], считались заданными статические параметры потока на выходе из канала — T_2 и P_2 , а также энтальпия на входе и относительная потеря с охлаждением (по отно-

нению к срабатываемому в канале теплоперепаду). Исходя из полученных данных, определялся к.п.д. цикла.

Второй этап расчета — определение минимальной единичной мощности МГДГ. Эта мощность находилась в соответствии с заданной в первом этапе относительной потерей на охлаждение при условии обеспечения минимальной величины отношения охлаждаемой поверхности канала (при прямоугольной форме его сечения) к его объему.

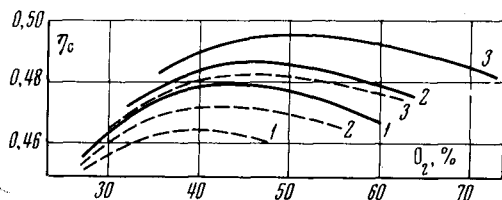


Рис. 1. Зависимость к.п.д. электростанции с МГДГ от весовой концентрации кислорода в окислителе.

Сплошные линии $T_{ст} = 2000^\circ K$; штриховые — $T_{ст} = 1100^\circ K$; $1 - N_2 = 400 \text{ Мет}$; $2 - 1000 \text{ Мет}$; $3 - 4000 \text{ Мет}$

Для учета влияния вдуваемого газа на рабочий процесс в канале МГДГ, в отличие от [13], принята следующая гипотеза, предложенная в [14]. Поток продуктов сгорания и вдуваемый газ, нагретый к моменту выхода из стенки до температуры ее поверхности $T_{ст}$, мгновенно обмениваются теплом, не смешиваясь при расширении.

Расчет теплообмена в канале проводился посредством введения в уравнения среднеинтегральных по охлаждаемой поверхности канала значений давления и температуры. Принятая методика позволила использовать малые ЭЦВМ «Проминь» и «Мир». Особенно удобна данная методика для сравнения различных вариантных расчетов, когда рассматриваются относительные значения исследуемых показателей. Подобный сравнительный анализ был одной из задач выполненной нами работы.

Для термодинамических расчетов станции, состоящей из МГДГ, парогенератора и турбины, приняты следующие исходные данные: 1) температура окислителя на выходе из рекуперативного подогревателя — $1100^\circ K$; 2) температура газов на выходе из схемы — $530^\circ K$; 3) к.п.д. машинного зала паротурбинной установки — 0,44; 4) удельная затрата энергии на получение кислорода — $0,4 \text{ кВт} \cdot \text{час}/\text{м}^3$ (предполагалось, что кислородная установка является частью схемы МГДЭС, и затраты энергии на получение O_2 относились к затратам на собственные нужды станции); 5) статические значения температуры и давления на выходе из канала МГДГ равны $2400^\circ K$ и $0,75 \text{ бар}$ соответственно; 6) магнитная индукция — 5 тл , скорость (постоянная) — 800 м/сек ; 7) температура стенок канала (постоянная) для разных вариантов: $1100, 1400, 1700$ и $2000^\circ K$; 8) горючее — метан.

Основной показатель тепловой экономичности схемы — эффективный к.п.д. станции η_c . Зависимость η_c от весовой концентрации кислорода в окислителе для схемы МГДЭС, включающей защищенный вдувом азота канал МГДГ, представлена на рис. 1. Как видно из рис. 1, для фиксированной мощности станции кривые к.п.д. имеют экстремальный характер, что является следствием увеличения потерь на охлаждение канала при росте температуры потока, при увеличении концентрации кислорода в окислителе. При увеличении мощности станции уменьшается относительная роль потерь на охлаждение. Переход от $T_{ст} = 1100^\circ K$ к $T_{ст} = 2000^\circ K$ приводит к увеличению абсолютных значений к.п.д. примерно на 1,3—1,5%. Полученные зависимости к.п.д. МГДЭС, работающих с применением вдува азота, от обогащения окислителя кислородом в качественном отношении подобны таковым для схем станций, которые включают МГДГ с наружным — водяным охлаждением канала [3].

Для определения количества азота, идущего на охлаждение, использованы данные, приведенные в [14]. Зависимость относительных вдувов азо-

та — Δ (по отношению к массе потока на входе в канал МГДГ) от концентрации кислорода в окислителе для нескольких значений мощностей станций приведена на рис. 2. Увеличение потребного вдува при снижении температуры стенок и единичной мощности определяется возрастанием потерь тепла с охлаждением. Переход к более высоким обогащениям окислителя кислородом при фиксированных значениях температуры стенки и мощности станции сопровождается увеличением тепловых потоков в стенку и ростом потребного количества вдуваемого охладителя.

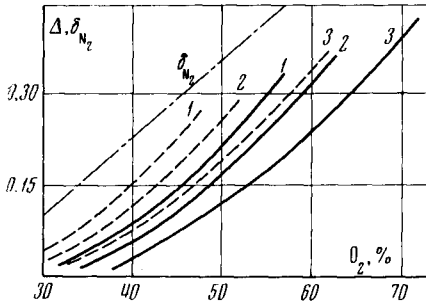


Рис. 2. Зависимость относительного вдува Δ и относительного количества азота (по отношению к количеству продуктов сгорания), полученного на воздуходелительной установке δ_{N_2} , от весовой концентрации кислорода в окислителе (обозначения см. рис. 1)

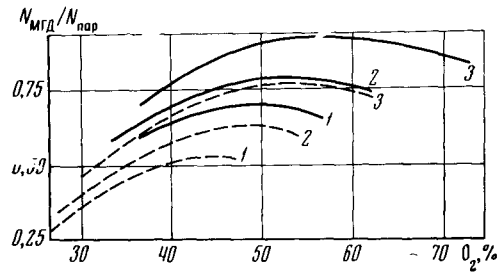


Рис. 3. Зависимость отношения мощности, вырабатываемой МГДГ, к мощности парового цикла от весовой концентрации кислорода в окислителе (обозначения см. рис. 1)

Поскольку рост Δ обусловлен увеличением потерь тепла в канале МГДГ, постольку он приводит к повышению относительной мощности паросилового цикла. Однако при увеличении концентрации кислорода в окислителе, сопровождаемом ростом Δ , вначале доля этой мощности снижается (см. рис. 3, где представлена зависимость отношения мощности МГДГ к мощности паротурбинного цикла от концентрации O_2 в окислителе). Здесь прирост располагаемого теплоперепада в канале МГДГ превышает рост тепловых потерь. Достигнув максимума, отношение $N_{MGD}/N_{пар}$ с дальнейшим обогащением окислителя O_2 снижается. Увеличение $N_{MGD}/N_{пар}$ с повышением температуры стенок канала и мощности станции объяснения не требует. Следует отметить, что при постоянной мощности станции зависимость $N_{MGD}/N_{пар}$ от концентрации кислорода в окислителе по своему характеру совпадает с зависимостью $\eta_c = f(O_2)$.

При рассмотрении зависимостей, представленных на рис. 1 и 2 можно установить, что для вдува оптимальной (соответствующей максимуму η_c) является величина $\Delta \approx 0,1-0,15$. Увеличение вдува до значений $\Delta = 0,3-0,35$, при фиксированной мощности станции, приводит лишь к незначительному снижению к.п.д. станции, примерно на 0,5 абс.%. Однако при этом для компенсации потерь тепла с охлаждением необходимо дополнительное обогащение окислителя кислородом. Отметим, что для всего диапазона полученных расчетных значений относительных вдувов используется, как показано на рис. 2, лишь незначительная часть получаемого на кислородной станции азота.

Как отмечалось выше, вдув влияет на энергетическую эффективность МГДГ двояким образом: возвращая тепло охлаждения в канал, он повышает эффективность процесса преобразования, но, с другой стороны, забирает значительную часть тепла от основного потока при смешении с ним. В связи с этим можно предположить, что температура стенки канала МГДГ будет существенно влиять на эффективность цикла. Влияние температуры стенок канала МГДГ, защищенных вдувом азота, на энергетическую

ческую эффективность МГДЭС для нескольких значений мощностей станции представлено на рис. 4 (по оси ординат отложены экстремальные значения к.п.д. станции η_c^3 , см. рис. 1). Зависимость $\eta_c^3 = f(T_{ст})$ при условии $N_c = \text{const}$ имеет характер, близкий к линейному, что совпадает с результатами, полученными авторами [3] для схем с наружным — водяным охлаждением канала МГДГ. Из рис. 4 видно, что повышение температуры стенки на 600°C увеличивает к.п.д. станции на $\sim 1\%$. С возрастанием мощности влияние температуры стенки канала на η_c^3 несколько снижается.

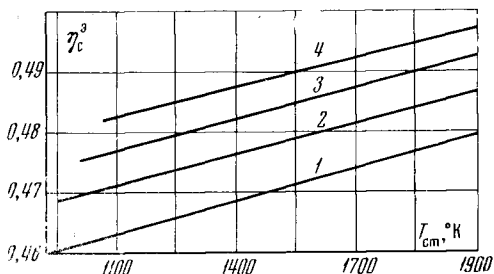


Рис. 4. Влияние температуры стенки, защищенной вдувом азота, на энергетическую эффективность цикла МГДЭС

1 — $N_{ст} = 400 \text{ Мвт}$; 2 — 1000 Мвт ; 3 — 2000 Мвт ; 4 — 4000 Мвт

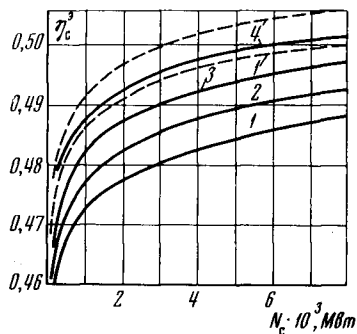


Рис. 5. Зависимость к.п.д. схемы МГДЭС с охлаждением стенок канала вдувом газа (сплошные линии) и при наружном охлаждении (штриховые линии) от мощности станции:

1 — $T_{ст} = 1100^\circ\text{K}$; 2 — 1400°K ; 3 — 1700°K ; 4 — 2000°K

По-видимому, представляет интерес сравнение энергетической эффективности схем, включающих МГДГ с внутренним охлаждением канала, со схемами, где применено внешнее охлаждение конденсатом паросиловой части блока. Расчеты схемы с внешним охлаждением проводились для $T_{ст} = 1100$ и 2000°K по методике, идентичной изложенной. Аналогичными были также исходные данные, что в итоге позволило получить надежные сравнительные характеристики. Из рис. 5 видно, что температура стенок сказывается на η_c^3 более значительно при внутреннем охлаждении, что объясняется значительным отбором тепла от основного потока на нагрев охлаждающего газа. При повышении $T_{ст}$, когда относительные вдувы снижаются (рис. 2), к.п.д. обеих схем сближаются.

На основании рис. 5 следует отметить также, что для обеих схем значительное повышение эффективного к.п.д. станции при увеличении ее мощности наблюдается лишь до значений $N_c = 1000\text{--}2000 \text{ Мвт}$.

Из сравнения схем видно, что при одинаковых значениях температуры стенки и мощности станции к.п.д. схемы с внутренним охлаждением несколько ниже, чем схемы с наружным охлаждением. Однако при таком сравнении необходимо дополнительно учитывать, по крайней мере, следующее: а) наиболее надежным каналом с наружным конденсатным охлаждением является металлическая конструкция, для которой предельная температура стенок, омываемых высокотемпературным потоком, составляет $\sim 1000^\circ\text{K}$. В то же время перфорированная и защищенная вдувом инертной среды стенка канала МГДГ, выполненная из жаростойких керамических материалов, вполне надежно может работать при $T_{ст} = 2000^\circ\text{K}$. При подобном сравнении обе схемы 1 и 2 имеют одинаковую эффективность (рис. 5); б) при одинаковой для каналов с наружным и внутренним охлаждением температуре стенок, равной 2000°K , когда по энергетической эффективности схемы 1 и 2 отличаются незначительно,

не вызывает сомнения, что более надежным будет канал, защищенный вдувом азота.

Учитывая отмеченные обстоятельства, а также те возможные преимущества каналов с перфорированными стенками, защищенными инертным газом, о которых говорилось в начале статьи, можно сделать вывод, что схема с вдувом является, по крайней мере, равноценной со схемой, где применено наружное охлаждение канала МГДГ. Об этом свидетельствуют также результаты, полученные в [13]. Эти результаты по отдельным показателям отличаются от наших. В частности, в [13] несколько выше к.п.д. Такие расхождения объясняются, очевидно, довольно существенными различиями как в методах анализа, так и в исходных данных. Тем не менее энергетическая эффективность в обоих случаях того же порядка, что и для станций с МГДГ, охлаждаемыми снаружи. Следовательно, при рассмотрении перспектив создания электростанции с МГДГ необходимо изучать, наряду с другими, варианты МГДГ-установок с каналами, стенки которых защищены вдувом.

Институт технической теплофизики
Академии наук УССР

Поступила в редакцию
16 I 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Брoган. Вопросы ракетной техники, № 9, 3, 1962.
2. Я. Андо и др. Тр. Междунар. симп. по МГД-генераторам. Докл. № 82. Париж, 1964.
3. В. А. Кириллин, Г. И. Россиевский, А. Е. Шейндлин. Теплофизика высоких температур, 6, № 4, 1968.
4. Ж. Перикар, А. Уйец. Тр. Междунар. симп. по МГД-генераторам. Докл. № 97. Париж, 1964.
5. Г. И. Россиевский, Г. М. Корягина, А. Р. Монастырская, Л. В. Иглова. Сб. МГД-метод получения электроэнергии. «Энергия», 1968, стр. 143.
6. Д. Г. Жимерин, В. П. Мотулевич, Е. И. Янтовский. Докл. на VII конгрессе Мировой энергетической конференции. С₄—27, Москва, 1968.
7. В. И. Толубинский, А. К. Литошенко, В. Л. Шевцов, Е. Д. Домашев. Вопросы технической теплофизики. «Наукова думка», Киев, 1968, стр. 10.
8. Дж. Льюис, Т. Брoган. Тр. Международ. симп. по МГД-генераторам. Докл. № 94, Париж, 1964.
9. В. О. Герман, Ю. П. Кукота, Г. А. Любимов. Вопросы технической теплофизики. «Наукова думка», Киев, 1968, стр. 148.
10. В. О. Герман, Ю. П. Кукота, Г. А. Любимов, Г. М. Щеголев. Теплофизика высоких температур, 7, № 1, 1969.
11. В. О. Герман, Ю. П. Кукота, Г. А. Любимов. ПМТФ, № 1, 1970.
12. Г. М. Щеголев. Electricity from MHD, SM—74/235. IAEA, Vienna, 1966.
13. S. Gauffier, C. Karr, M. La Porte. Electricity from MHD, 4, 2613. IAEA, Vienna, 1968.
14. Г. М. Щеголев. Теплоэнергетика, № 2, 88, 1967.