



УДК 629.7.036

Академик НАН Украины А. А. Халатов, С. Д. Северин,
П. И. Бродецкий, В. С. Майсоценко

Субатмосферный обратный цикл Брайтона с регенерацией выходной теплоты по циклу Майсоценко

Рассмотрен новый термодинамический цикл с высокой степенью регенерации, использующий солнечную энергию и энергию окружающей среды в форме психрометрической разности температур. Особенностью цикла является высокий коэффициент полезного действия, значительно превышающий КПД газотурбинных установок, работающих по циклу Брайтона. Показано, что при малой мощности (до 10 кВт) установка может использовать для производства электричества только психрометрическую и солнечную энергию.

Прямой и обратный циклы Брайтона. Практически все современные газотурбинные двигатели и промышленные газотурбинные установки работают по прямому термодинамическому циклу Брайтона, который включает последовательное сжатие воздуха в компрессоре, подвод теплоты (q_1) к рабочему телу в камере сгорания при постоянном давлении ($p = \text{const}$), расширение продуктов сгорания в газовой турбине и изобарный отвод теплоты в окружающую среду (q_2). Главным недостатком установок такого цикла является значительное количество теплоты, выбрасываемой в атмосферу с выходящими газами, поэтому термический КПД лучших газотурбинных установок не превышает 40%.

Поиск возможных путей повышения термодинамической эффективности цикла привел к идее обратного цикла Брайтона (Inverted/Inverse Brayton Cycle) [1], в котором термодинамические процессы протекают в обратном направлении — сначала происходит расширение в газовой турбине нагретого при атмосферном давлении рабочего тела до некоторого давления *ниже атмосферного (субатмосферный цикл)*, затем — охлаждение рабочего тела (например, в теплообменнике) для поддержания необходимого перепада давления на турбине и далее — сжатие рабочего тела в компрессоре до давления, близкого к атмосферному.

Однако в такой конфигурации обратный цикл Брайтона не получил практического использования из-за резкого увеличения объема и массы компрессора и больших затрат энергии на его привод. Многоступенчатое охлаждение и сжатие рабочего тела (Mirror Cycle) и форсирование газовой турбины простого цикла Брайтона за счет установки на выходе из

© А. А. Халатов, С. Д. Северин, П. И. Бродецкий, В. С. Майсоценко, 2015

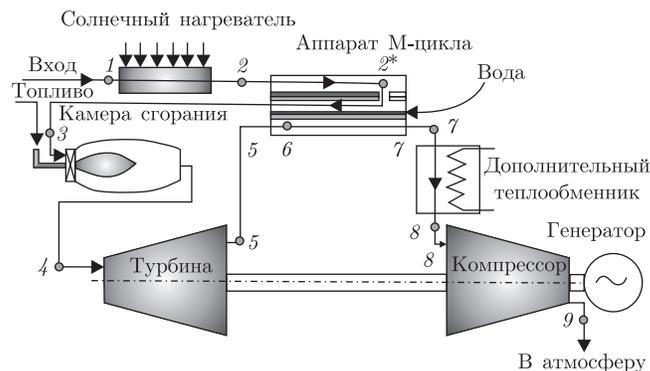


Рис. 1. Принципиальная схема субатмосферной газотурбинной установки обратного цикла Брайтона с регенерацией выходной теплоты по М-циклу

нее турбины обратного цикла Брайтона позволяют заметно поднять термодинамическую эффективность благодаря более полному использованию химической энергии топлива [2, 3].

В работах [4, 5] рассмотрен прямой термодинамический цикл газотурбинной установки, в котором высокое значение термического КПД достигается за счет установки на выходе из газовой турбины регенеративного теплообменного аппарата, работающего по циклу Майсоценко (М-циклу) при охлаждении рабочего тела за турбиной до температуры, близкой к температуре точки росы продуктов сгорания. В такой схеме более высокая термодинамическая эффективность цикла Брайтона достигается за счет снижения минимальной температуры цикла при охлаждении продуктов сгорания в аппарате М-цикла с высокой степенью регенерации.

Обратный цикл Брайтона может быть существенно улучшен за счет комбинации с М-циклом [6, 7]. В этом случае открывается принципиальная возможность быстрого технологического “прорыва” в создании газотурбинных установок с очень высокими значениями термического и электрического КПД, которые значительно превышают параметры прямого цикла Брайтона. Важным преимуществом такого цикла является возможность использования энергии окружающей среды в форме психрометрической разности температур, солнечной энергии, низкопотенциальных и вторичных источников энергии, а также более простой камеры сгорания атмосферного типа и более дешевых материалов в конструкции турбины.

В настоящей работе представлены основные результаты концептуального анализа субатмосферного обратного цикла Брайтона с регенерацией выходной теплоты по циклу Майсоценко. Принципиальная схема субатмосферной газотурбинной установки показана на рис. 1, а на рис. 2, а рассмотрена его $h-s$ -диаграмма. Цикл включает следующие термодинамические процессы: 1–2 — подогрев атмосферного воздуха в солнечном нагревателе; 2–2* — охлаждение воздуха до насыщенного состояния (температуры точки росы) в сухих каналах аппарата М-цикла; 2*–3 — увеличение энтальпии насыщенного воздуха во влажных каналах аппарата М-цикла с использованием энергии окружающей среды в форме психрометрической разности температур; 3–4 — дополнительный подогрев высокоэнтальпийного насыщенного воздуха в камере сгорания атмосферного типа при сжигании топлива; 4–5 — расширение рабочего тела (паровоздушной смеси) в турбине; 5–6 — охлаждение рабочего тела до насыщенного состояния в каналах конденсации аппарата М-цикла; 6–7 — дальнейшее охлаждение рабочего тела и полная конденсация влаги в каналах конденса-

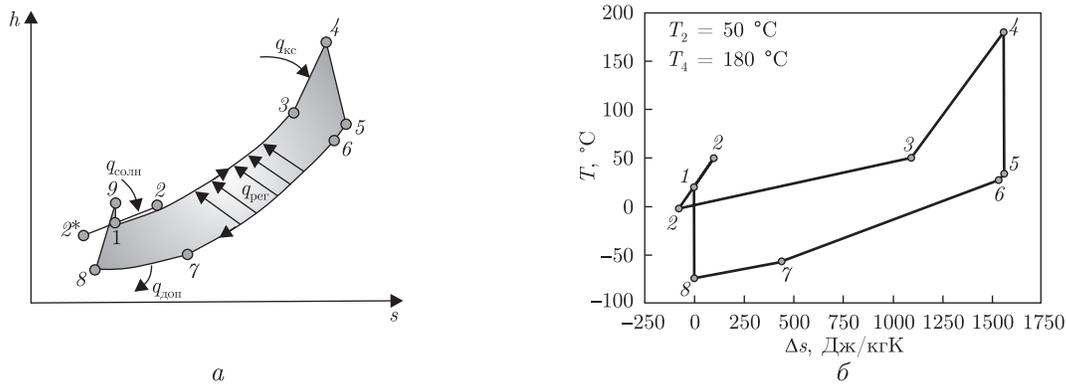


Рис. 2. h - s -Диаграмма субатмосферной газотурбинной установки (а) и T - s -диаграмма субатмосферного (б) обратного цикла Брайтона с регенерацией теплоты по М-циклу

ции аппарата М-цикла; 7-8 — отвод теплоты в дополнительном (низкотемпературном) теплообменнике; 8-9 — сжатие сухого воздуха в компрессоре; 9-1 — условный процесс выравнивания энтальпий в атмосфере. Вместо одного низкотемпературного теплообменника возможно использование трех-четырех пар менее мощных компрессоров и изобарных теплообменников, что улучшает характеристики установки.

Основные особенности рассматриваемого цикла состоят в следующем. 1. Цикл использует два рабочих тела — насыщенный высокоэнтальпийный воздух в турбине и сухой холодный воздух в компрессоре. Так как поток перед компрессором сухой, то это резко снижает затраты энергии на работу компрессора. 2. За счет высокой степени увлажнения насыщенного воздуха в аппарате М-цикла (до 0,5 кг пара на 1 кг сухого воздуха) его энтальпия при температуре 300...400 °С эквивалентна энтальпии продуктов сгорания керосина в воздухе при температуре сгорания 1300...1400 °С. Значительный рост энтальпии потока происходит, главным образом, за счет использования энергии окружающей среды — психрометрической разности температур. 4. За счет полной конденсации влаги в каналах аппарата М-цикла давление в потоке снижается ниже атмосферного, что формирует субатмосферный цикл. 5. Выделившаяся при конденсации теплота практически полностью передается во влажные каналы аппарата М-цикла, где используется для испарения воды. 6. Вследствие использования психрометрической энергии и высокой степени регенерации цикла его термический КПД достигает 75% и более.

Технико-экономические параметры цикла. Основные параметры термодинамического цикла следующие:

удельная теплота регенерации цикла (изменение энтальпии рабочего тела в аппарате М-цикла): $q_{\text{рег}} = q_{2-3} = h_3 - h_2$;

удельная работа цикла: $l_{\text{ц}} = q_1 - q_2$;

термический КПД цикла: $\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1 - q_{\text{рег}}}$;

термический КПД полезной работы цикла: $\eta_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{т}} - l_{\text{к}}}{l_{\text{т}}}$;

электрический КПД цикла: $\eta_{\text{эл}} = \frac{l_{\text{т}} - l_{\text{к}}}{q_1 - q_{\text{рег}}}$.

Рассматриваемый термодинамический цикл является нестандартным в классическом понимании газотурбинных циклов, поскольку наряду с изменением массы рабочего тела

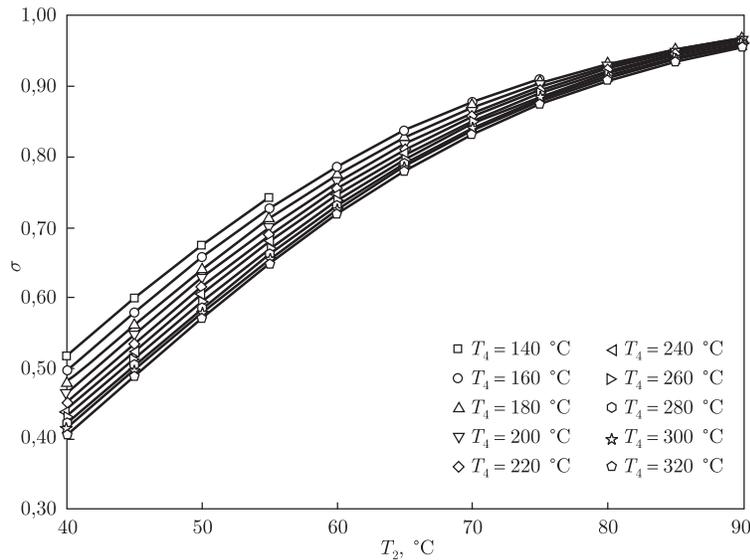


Рис. 3. Зависимость термического к. п. д. адиабатного цикла от температуры воздуха T_2 на выходе из солнечного нагревателя и температуры рабочего тела T_4 перед турбиной

в цикле изменяется и его теплосодержание из-за различного фазового состояния рабочего тела в отдельных точках цикла. Поэтому для определения реальной мощности турбины, которая соответствует балансу мощностей, необходимо использовать выражение $N_T^{\text{реал}} = N_{\text{эл}} + l_k G$, где $N_{\text{эл}}$ — потребляемая электрическая мощность установки, l_k ; G — удельная работа компрессора и расход воздуха с влагосодержанием d_1 на входе в установку.

Термодинамические параметры цикла. На рис. 2 представлена $T-s$ -диаграмма рассматриваемого цикла для одного из частных случаев. Все обозначения характерных точек соответствуют рис. 1. Процессы подвода и отвода теплоты протекают при постоянном давлении (см. рис. 2, а), а процессы расширения и сжатия в компрессоре и турбине считаются изоэнтропными.

Как видно, рассматриваемый цикл имеет некоторые особенности, обусловленные использованием в нем регенерации по М-циклу. Процессы $1-2$ и $2-2^*$ не эквивалентны по величине подведенной и отведенной теплоты: в процессе $2-2^*$ (охлаждение воздуха до температуры точки росы в сухих каналах) затрачивается больше энергии, чем в процессе $1-2$ (нагрев воздуха в солнечном нагревателе). Из-за различных значений изобарной теплоемкости C_p в начальной и конечной точках цикла на $h-s$ -диаграмме появляется дополнительный (условный) процесс $9-1$ выравнивания энтальпий, протекающий в окружающей атмосфере.

Анализ $p-t$ -фазовой диаграммы показывает, что при снижении статического давления ниже атмосферного за счет конденсации паров воды в каналах аппарата М-цикла и одновременном уменьшении температуры потока влага из паровоздушной смеси может выпадать в форме жидкости и твердой фазы. На выходе из аппарата М-цикла вследствие достаточно низкой температуры поток будет двухфазный, включающий воздух и мелкие частицы твердой фазы. Таким образом, выпадающая влага не будет “блокировать” поверхности конденсации аппарата М-цикла. Для улавливания мелких частиц твердой фазы и получения из них жидкой фракции, которая в дальнейшем используется во влажных каналах аппарата М-цикла, между низкотемпературным теплообменником и компрессором устанавливается улавливающий аппарат (на рис. 2, б не показан). Наличие твердой фазы в низкотемпера-

турном теплообменнике будет эффективно использовано для интенсификации теплообмена в нем.

Другая особенность состоит в следующем. Анализ $T-s$ -диаграммы приводит, на первый взгляд, к парадоксальному выводу, что теплообмен в аппарате М-цикла противоречит второму закону термодинамики, так как теплота от более холодного потока (линия 5–6–7) передается более нагретому (линия 2*–3). Однако это противоречие является кажущимся, поскольку, как указывалось выше, теплота, выделившаяся в каналах конденсации, затрачивается не на теплопередачу к насыщенному пару, а на фазовый переход–нагрев и испарение воды во влажных каналах аппарата М-цикла.

Расчеты адиабатного цикла показывают, что при относительно низкой температуре паровоздушного потока перед турбиной ($T_4 = 200\text{ }^\circ\text{C}$) за счет высокой теплоемкости паровоздушного потока его энтальпия соответствует температуре продуктов сгорания керосина в воздухе на уровне 1300...1400 $^\circ\text{C}$. Это существенно удешевляет стоимость газотурбинной установки, поскольку в ее конструкции могут использоваться более дешевые конструкционные материалы.

Из рис. 3 видно, что в исследованном диапазоне изменения температур T_2 и T_4 термический КПД цикла возрастает с ростом обеих температур. Например, при изменении температуры T_4 от 160 до 320 $^\circ\text{C}$ КПД цикла изменяется от 45 до 58% ($T_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$) и возрастает до 75...83% при $T_2 = 70\text{ }^\circ\text{C}$. Одновременно КПД полезной работы цикла возрастает с 37...56% до 77...82%, а электрический КПД — с 28...49% до 68...79%. *Таким образом, рассматриваемый цикл характеризуется высокими показателями термодинамического и электрического КПД при достаточно низкой температуре (но высокой энтальпией) паровоздушного потока перед турбиной.*

Следует отметить, что полученные в работе результаты по КПД цикла не противоречат циклу Карно, который является идеальным циклом для всех циклов в заданном интервале температур. С учетом высокой теплоемкости и эквивалентной температуры рабочего тела перед турбиной КПД рассматриваемого цикла хотя и высокий, но не превышает КПД цикла Карно. Что касается КПД цикла Брайтона, то при одинаковых условиях его КПД на 70...80% ниже КПД субатмосферного обратного цикла Брайтона.

На рис. 4 приводится зависимость степени регенерации выбросной теплоты в адиабатном цикле. Высокая степень регенерации цикла (более 50...80%) способствует высоким значениям термического КПД цикла, которые не могут быть достигнуты в прямом цикле Брайтона. С ростом температуры воздуха за солнечным нагревателем при $T_4 = \text{const}$ степень регенерации цикла быстро возрастает. Это обусловлено свойством аппарата М-цикла, тепловая мощность которого определяется абсолютной температурой T_2 . С ростом температуры рабочего тела перед турбиной при $T_2 = \text{const}$ степень регенерации цикла незначительно возрастает (см. рис. 4).

Приведенные выше данные получены для 1 кг воздуха на входе в солнечный нагреватель, поэтому они могут быть использованы для турбины произвольной мощности. Тепловая мощность солнечного нагревателя, камеры сгорания, дополнительного теплообменника определяются только для конкретной электрической мощности установки. Расчеты, выполненные для турбины электрической мощностью 10 кВт, показывают, что при температуре воздуха за солнечным нагревателем 80 $^\circ\text{C}$ и температуре рабочего тела перед турбиной 200 $^\circ\text{C}$ тепловая мощность аппарата М-цикла составляет около 70 кВт. В этом случае степень регенерации цикла равняется 0,65 (см. рис. 4), термический КПД цикла — 65%, а электрический КПД — 55%.

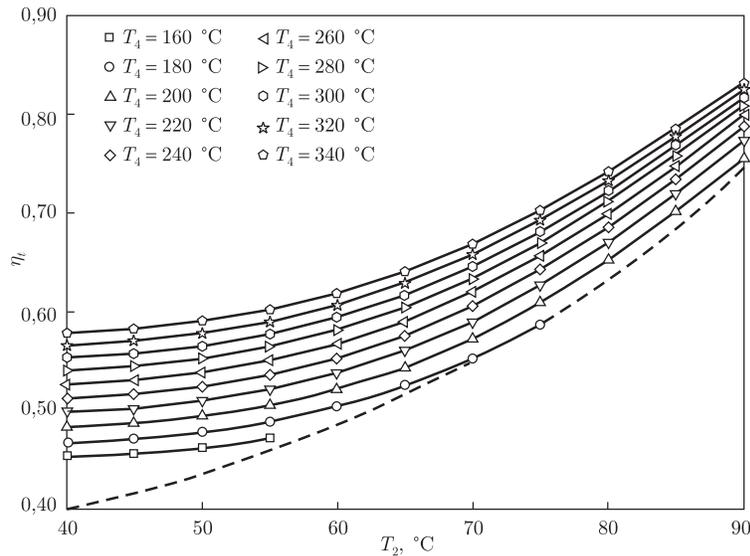


Рис. 4. Зависимость степени регенерации теплоты в аппарате М-цикла от температуры воздуха T_2 за солнечным нагревателем и температуры рабочего тела перед турбиной

С ростом температуры рабочего тела перед турбиной до 300 °С термический КПД цикла возрастает до 72, а электрический — до 66%, что обеспечивается увеличением степени сжатия воздуха (степени расширения рабочего тела). Вследствие этого тепловая мощность аппарата М-цикла уменьшается до 40 кВт. Тепловая мощность камеры сгорания при этом практически не изменяется (~13 кВт). Здесь проявляется еще одно важное свойство рассматриваемого цикла — возможность замены мало мощной камеры сгорания вторым солнечным нагревателем. Тогда подвод теплоты в цикле может осуществляться без использования химической энергии топлива.

Что касается политропного цикла, то при наличии потерь, соответствующих элементам современных газовых турбин, термический КПД цикла снижается на 7...10, а электрический — на 10...12%. За счет гидравлических потерь в политропном цикле увеличивается перепад давления в турбине и компрессоре; при этом потребляемая тепловая мощность аппарата Майсоценко незначительно возрастает, а степень регенерации цикла и потребляемая тепловая мощность камеры сгорания снижаются.

Таким образом, выполненные исследования показали принципиальную возможность создания газотурбинных установок с очень высокими значениями термического и электрического КПД, которые существенно превышают показатели всех современных установок, работающих по прямому и обратному циклу Брайтона. Разработка и создание таких установок может явиться “прорывным” технологическим направлением в газотурбостроении. Новый термодинамический цикл имеет высокие показатели для газотурбинных установок различной мощности, но, прежде всего, при создании газовых турбин малой мощности (2...10 кВт), КПД которых в прямом цикле Брайтона не превышает 8...12%.

Субатмосферная газотурбинная установка обратного цикла Брайтона может применяться для одновременной выработки электричества, теплоты и холода. Важным преимуществом такой схемы является возможность использования в конструкции турбины камеры сгорания атмосферного типа, что существенно снижает уровень окислов азота при сжигании топлива в воздухе высокой влажности и упрощает ее эксплуатацию.

Вследствие невысокой тепловой мощности камеры сгорания в микротурбинах мощностью 10 кВт и менее возможно применение второго солнечного нагревателя взамен камеры сгорания. Это открывает принципиальную возможность создания газотурбинных установок малой мощности без использования химической энергии топлива — только за счет использования солнечной (или вторичной) энергии, а также энергии окружающей среды в форме психрометрической разности температур.

Ключевым элементом рассматриваемого цикла является регенеративный аппарат М-цикла, обеспечивающий степень регенерации цикла на уровне 70...80% и более. Приемлемые с практической точки зрения значения тепловой мощности аппарата М-цикла определяются сочетанием электрического и термического КПД установки, минимальной температурой цикла, степенью расширения рабочего тела в турбине и степенью сжатия воздуха в компрессоре.

Идея и авторские права на схему газотурбинной установки, работающей по субатмосферному обратному циклу Брайтона с утилизацией теплоты по М-циклу, принадлежат PBCorporation (USA). Расчеты цикла выполнены по компьютерной программе PBCorporation (USA).

1. *Wilson D. G.* The design of high efficiency turbomachinery and gas turbine. – London: MIT Press Cambridge, Massachusetts, 1985. – 534 p.
2. *Tsujikawa Y. et al.* Proposal of atmospheric pressure turbine (APT) and high temperature fuel cell hybrid systems // JSME Internat. J. Ser. B. – 2004. – **47**, No 2. – P. 256–260.
3. *Vermes G., Beer J.* Ambient pressure gas turbine, U.S. Patent 6. – 298, 654 B1, Oct. 9, 2001.
4. *Maisotsenko V. et al.* Evaporative duplex counter-heat exchanger, U.S. Patent No 6. – 948, 558, B2, September 27, 2005.
5. *Khalatov A., Karp I., Isakov B.* Prospects of Maisotsenko cycle application in gas turbine industry of Ukraine // Internat. J. Energy Clean Environment. – 2011. – **12**, No 2–4. – P. 141–155.
6. *Gillan L., Maisotsenko V.* Maisotsenko open cycle used for gas turbine power generation / ASME/IGTI Turbo Expo 2003. – Atlanta, Georgia, June 16–19, 2003. – P. 10.
7. *Wickler K.* Life below the wet bulb: The Maisotsenko cycle. – Power, November-December 2003. – P. 1–3.

*Институт технической теплофизики
НАН Украины, Киев
PBCorporation, Los-Angeles, USA
Coolerado Corporation, Denver, USA*

Поступило в редакцию 25.09.2014

**Академік НАН України А. А. Халатов, С. Д. Северин, П. І. Бродецький,
В. С. Майсоценко**

Субатмосферний зворотний цикл Брайтона з регенерацією вихідної теплоти за циклом Майсоценка

Розглянуто новий термодинамічний цикл з високим ступенем регенерації, що використовує сонячну енергію і енергію навколишнього простору у формі психрометричної різниці температур. Особливістю циклу є високий коефіцієнт корисної дії, який значно перевищує КПД газотурбинних установок, що працюють за циклом Брайтона. Показано, що при малій потужності (до 10 кВт) установка може використовувати для виробництва електрики тільки психрометричну і сонячну енергію.

Academician of the NAS of Ukraine **A. A. Khalatov, S. D. Severin, P. I. Brodetsky, V. S. Maisotsenko**

Brayton's subatmospheric inverse cycle with regeneration of output heat by Maisotsenko's cycle

The novel thermodynamic cycle with a high regeneration rate using a solar energy and the environment energy in the form of a psychrometric temperature difference is considered. The primary cycle feature is the high thermal efficiency exceeding significantly the efficiency of gas turbines, based on the Brayton cycle. It is shown that, at the low turbine power (up to 10 kW), this unit can operate using only the psychrometric and solar energies for the electricity production.