

ЭТАЛОННЫЙ ЦИКЛ ЭДВАРДСА ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО СГОРАНИЯ

Докт. техн. наук, профессор Пиир А.Э.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Проблема экономичности тепловых двигателей возникла одновременно с появлением паровых машин и во времена Сади Карно достигла такой остроты, что подвигла этого военного инженера заняться ее изучением. На примере гипотетического двигателя с изотермическими источниками тепла Сади Карно сформулировал закон преобразования теплоты в работу и указал условия получения наибольшей «движущей силы огня» [1]. Его открытие можно выразить двумя фразами:

1. «Движущая сила огня» не зависит от вида рабочего тела и тем выше, чем больше теплопадение между верхним и нижним источниками теплоты.

2. «Движущая сила» (работа, КПД теплового двигателя) будут максимальными, если все процессы термодинамического цикла внутренне и внешне обратимы.

Эти условия в аналитическом виде известны как теорема Карно:

$$dW = \frac{T_A - T_B}{T_A} dQ_A - T_B (dS_A + dS_B); \quad (1)$$

где: dW – работа теплового двигателя;

dQ_A – количество теплоты, полученной рабочим телом в источнике А;

dS_A – уменьшение энтропии источника с температурой T_A ;

dS_B – увеличение энтропии источника с температурой T_B ;

Первое слагаемое представляет максимальный выход работы для поступившего тепла, а второе – величину потерянной работы от необратимости процессов, образующих цикл.

Если источники теплоты имеют переменную температуру, но все процессы цикла внутренне и внешне обратимы, то термодинамический КПД такого цикла будет иметь максимальную величину, равную:

$$\eta_t^{\max} = 1 - \frac{T_{\text{Вср}}}{T_{\text{Аср}}}; \quad (2)$$

где $T_{\text{Вср}}$ и $T_{\text{Аср}}$ – средняя термодинамическая температура нижнего и верхнего источников.

Со времен Сади Карно КПД тепловых двигателей вырос почти в 50 раз, однако проблема тепловой экономичности остается по прежнему актуальной. Неуклонный рост потребления топлива тепловыми электростанциями, автомобильным, авиационным, железнодорожным, морским транспортом сопровождается постоянным увеличением его стоимости.

Термодинамическое совершенство современных тепловых двигателей также оставляет желать лучшего, поскольку циклы Ренкина и Стирлинга в установках внешнего сгорания отвечают условиям обратимости лишь в части отвода теплоты в окружающую среду, а передача теплоты от продуктов сгорания к рабочему телу протекает необратимо с потерей работоспособности.

Из курса технической термодинамики известно, что в двигателях внутреннего сгорания, действующих по циклу Отто, Дизеля, Брайтона, наоборот, подвод теплоты при сжигании топлива в атмосфере сжатого воздуха протекает обратимо, зато отвод теплоты в изотермическую окружающую среду происходит по изобаре или изохоре, то есть необратимо.

И только в паровых холодильных, геотермальных и одноконтурных установках атомных электростанций, требования Сади Карно к обратимости процессов подвода и отвода теплоты реализуется наиболее полно.

Советская теплотехническая школа ошибочно преподносила цикл Карно как эталон тепловой экономичности энергоустановок [2,3,4], что не могло не повлиять на технические решения в области энергетики. Например, многолетние работы в области МГД генерации, исследования по совершенствованию отечественных газотурбинных и парогазовых установок путем «карнотизации» их термодинамических циклов [5,6] дали скромные результаты и внедрением не увенчались.

В то же время получили широкое научное международное признание новые методы термодинамического анализа энергоустановок, не связанные с циклом

Карно: по работоспособности тепла [7], энтропийный [8] и экзегетический [9] методы.

Установим конфигурацию эталонного термодинамического цикла для тепловых двигателей. Из термодинамики известно, что изохорный подвод теплоты при сжигании одного и того же количества топлива в атмосфере воздуха выгоднее изобарного, а изотермический подвод - самый плохой, поскольку первый обеспечивает получение максимальной работы при расширении продуктов сгорания в одинаковых конечных условиях.

Таким образом, при использовании продуктов сгорания в качестве источника тепла высокого потенциала и окружающей среды в качестве теплового стока, условиям обратимости будет полностью удовлетворять, предложенный нами, термодинамический цикл Эдвардса, образованный изохорным, адиабатным, изотермическим процессами для установки внешнего сгорания (см. рис. 1а) и его варианты: для газотурбинной установки с регенеративным подогревом воздуха (рис. 1б) или для установки с двигателем внутреннего сгорания (рис. 1в).

Термический КПД цикла Эдвардса использующий теплоту продуктов изохорного сгорания топлива в интервале температур от T_1 до T_2 (рис. 1а) будет максимальным и составит величину:

$$\eta_t^{\circ} = 1 - \frac{T_B}{T_{Acpr}} = 1 - \frac{T_1}{q_{12} / \Delta S_{21}} = 1 - \frac{T_1 \ln(T_2 / T_1)}{T_2 - T_1} = 1 - \frac{\ln(T_2 / T_1)}{T_2 / T_1 - 1}; \quad (3)$$

Для вариантов цикла Эдвардса с регенеративным подогревом или обобщенного цикла (рис. 1б, 1в) формула термического КПД примет вид:

$$\eta_{tp}^{\circ} = 1 - \frac{T_4 \ln(T_2 / T_1)}{T_2 - T_1}; \quad (4)$$

где T_1 и T_2 - начальная и конечная температуры продуктов сгорания топлива; T_4 - температура окружающей среды.

При изобарном подводе теплоты высокого потенциала выражения для термического КПД цикла Эдвардса остаются прежними.

Цикл Эдвардса может быть реализован различными способами. Наиболее просто - с помощью паротурбинной установки со сверхсверхкритическими параметрами пара 35 Мпа и 650 °С или надстройкой высокотемпературной газотурбинной установки над паротурбинной среднего давления.

Несмотря на отставание теории термодинамика циклов успешно развивалась эмпирическим путем. В качестве примера следует вспомнить паротурбинную установку двух давлений на английской АЭС Колдер Холл, дизельные установки с газотурбинным компрессором для наддува и паровым котлом утилизатором.

Необходимо отметить рациональную комбинацию газотурбинной паротурбинной установок на Северо-Западной ТЭЦ Санкт-Петербурга, которая позволила получить эффективный КПД энергоблока равный 0,50 при низкой температуре продуктов сгорания, всего 1100 °С [7].

Термический КПД цикла Эдвардса для этой установки равен:

$$\eta_t^{\circ} = 1 - \frac{273 \ln(1373/546)}{1373 - 546} = 0,7 ;$$

Относительный КПД энергоблока Северо-Западной ТЭЦ составляет:

$$\eta_{\text{р}}^{\circ} = \eta_{\circ} / \eta_t^{\circ} = 0,5 / 0,7 = 0,71 ;$$

что свидетельствует о высокой степени совершенства тепломеханического оборудования комбинированной парогазовой установки.

Выводы

1. Предложенная нами закономерность термодинамический цикл Эдвардса, является важным элементом в теории тепловых двигателей, поскольку представляет эталон тепловой экономичности всех установок, использующих теплоту сгорания топлива;

2. Цикл Эдвардса вытекает из теоремы Карно для случая теплового двигателя, действующего обратимо при изохорном (изобарном) источнике тепла и изотермическом тепловом стоке;

3. Цикл Эдвардса позволяет установить предел тепловой экономичности энергоустановки и оценить степень совершенства её оборудования по величине действительного КПД;

4. Цикл Эдвардса необходим при выборе рациональной тепловой схемы, оптимизации параметров комбинированных парогазовых установок методом заполнения площади цикла.

Литература:

1. Сади Карно. Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу. 1824 г.

2. Кириллин В.А., Сычёв В.В., Шейдлин А.Е. Термическая термодинамика. М.: "Энергия" 1968, 472 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. Под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова - М.: Машиностроение, 1983 г. - 372 с. ил.
4. Александров А.А. Термодинамические основы циклов термодинамических установок: учебное пособие для ВУЗов. - М.: издательство МЭИ, 2004. - 158 с.
5. Андрющенко А.И., Лапшов В.Н. Парогазовые установки электростанций - М.: "Энергия" 1965 - 236 с.
6. Уваров В.В. Газовые турбины и газотурбинные установки. М.: Высшая школа. 1970 - 320 с.
7. Калафати Д.Д. Термодинамические циклы атомных электростанций. М.-Л., Росэнергоиздат. 1963. 280 с.
8. Гохштейн Д.П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. М., Энергия. 1969. 368 с.
9. Шаргут Я., Петела Р., Эксергия. М., Энергия. 1968. 276 с.
10. Основы современной энергетики. Под ред. Е.В. Аметистова. - Часть 1 - М.: Издательство МЭИ. 2002 - 368 с.

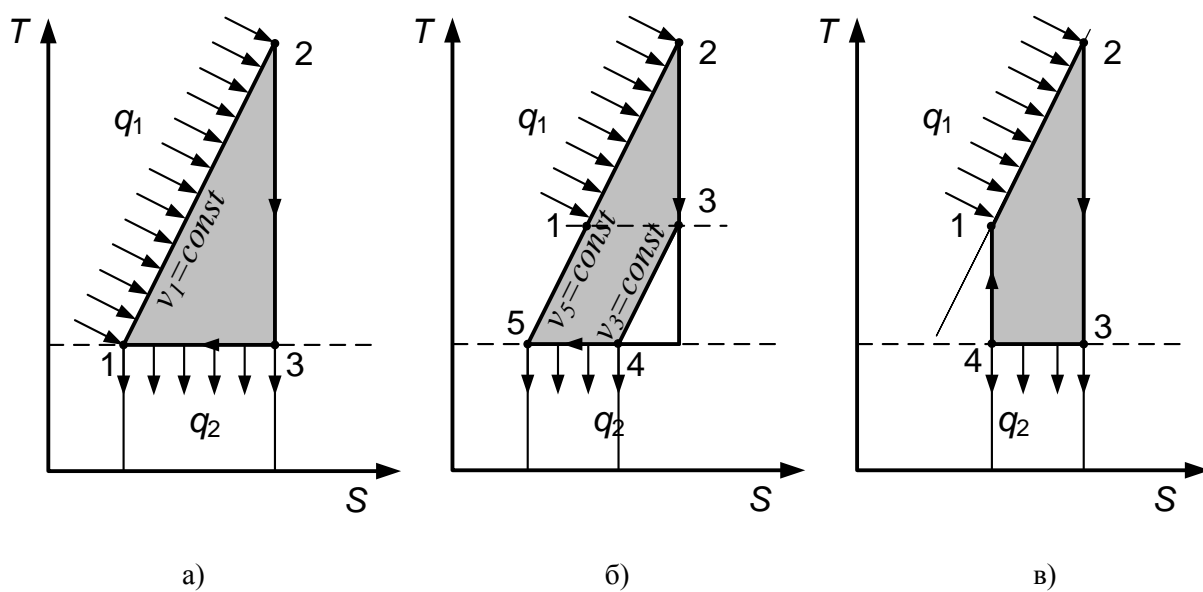


Рис. 1 Термодинамический цикл Эдвардса, его регенеративный и обобщенный варианты