

УДК 621.43

*А.П. Марченко, д-р техн. наук***ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗЕРВОВ ПОВЫШЕНИЯ КПД ДВИГАТЕЛЕЙ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

На протяжении почти полувековой истории двигателей внутреннего сгорания повышение коэффициента полезного действия является доминирующей тенденцией их совершенствования. К сегодняшнему дню усилиями многих поколений ученых и практиков индикаторный КПД (η_i) ДВС вырос практически в 10 раз от примерно 5% у двигателя Ленуара до 45...50% у большинства современных дизелей. Каждый из этих процентов роста η_i достигнут благодаря серьезным интеллектуальным усилиям и финансовым затратам.

С другой стороны, на всех исторических этапах развития ДВС, в том числе и сегодня, звучат предложения по такому изменению конструкции и рабочего процесса, которое обеспечит рост η_i от достигнутого уровня на 10...20%, а то и на более значительную величину. В этой связи примером может служить статья [1], автор которой предлагает новый способ работы теплового двигателя. В статье для дизеля Д70 (16ЧН25/27) обосновывается возможность увеличения η_i от 46,6% до 73,2%. При этом автор статьи обращает внимание читателей на тот факт, что новое значение η_i на 5,5% выше термического КПД цикла Тринклера-Сабатэ и на 2,2% выше КПД цикла Карно, вычисленных по параметрам дизеля Д70. К сожалению, подобные предположения по достижению $\eta_i = 70...80\%$ не являются единичными. Они постоянно звучат на различных научных семинарах, конференциях и конгрессах, посвященных проблемам двигателестроения. Именно эти обстоятельства и побудили автора к очередному ежегодному IX Конгрессу двигателестроителей приурочить данную статью. По замыслу статья должна ответить на вопрос о максимально возможном теоретическом коэффициенте полезного действия теплового двигателя (η_{\max}), разница между которым и индикаторным

КПД определяет максимальные теоретические резервы повышения η_i .

Вопрос относительно η_{\max} не является новым. Часто η_{\max} определяют как КПД цикла Карно, реализованного в диапазоне максимальной и минимальной температур реального цикла теплового двигателя. В связи с этим возник термин «карнотизация циклов», под которым подразумевают совершенствование действительных циклов с целью повышения их термодинамической эффективности. Причем, одни исследователи [2] карнотизацию понимают как приближение действительного цикла к прямоугольному в $T-s$ координатах. Другие же [3] отстаивают противоположную точку зрения: карнотизация – это не приближение действительного цикла к двум изотермам и двум адиабатам. Это методология повышения КПД теплового двигателя за счет приближения средних температур на участке теплоподвода к максимальным и средних температур на участке теплоотвода – к минимальным, что, очевидно, для анализа циклов поршневых ДВС является более предпочтительным. Воспользуемся этим подходом.

Рассмотрим именно цикл Тринклера-Сабатэ (рис. 1) и модернизируем его таким образом, чтобы значение работы было максимально возможным (впервые такие модернизированные циклы были исследованы лет 15 назад и результаты исследования представлены в [4, 5]).

От традиционного модернизированный цикл отличается тем, что адиабата расширения 4-5 продлена до точки 7, которая одновременно соответствует изотерме 1-7. Теплота Q_1 , как и в цикле Тринклера-Сабатэ, подводится в изохорном и изобарном процессах на участках 2-3 и 3-4. Отвод же теплоты Q_2 осуществляется в изотермическом процессе 7-1 при минимально возможной температуре, равной температуре окружающей среды T_0 .

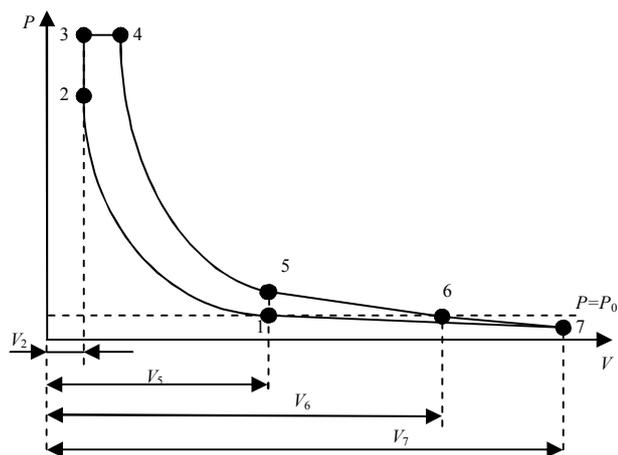


Рис. 1. Модернизированный цикл Тринклера-Сабатэ

Для представленных на рис.1 циклов Тринклера-Сабатэ, а также новых с отводом теплоты Q_2 по изобаре 6-1 (цикл 1-2-3-4-5-6-1) и изотерме 7-1 (цикл 1-2-3-4-5-6-7-1) выполним расчетные исследования, исходные данные и результаты которого представлены в табл.1–табл.3.

Таблица 1. Исходные данные

Наименование параметра	Значение параметра
Диаметр цилиндра теплового двигателя, м	0,12
Ход поршня для традиционного теплового двигателя, м	0,14
Показатель адиабаты	1,4
Мольные теплоемкости, кДж/(кмоль·К)	
mC_V	20,785
mC_p	29,099
Температура окружающей среды, К	300
Давление окружающей среды, МПа	0,1
Степень сжатия $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$	18
Степень повышения давления при сгорании $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$	1,8
Степень предварительного расширения $\rho = \frac{V_4}{V_3}$	1,2

Таблица 2. Параметры рабочего тела в характерных точках цикла

Точка цикла	T, К	p, МПа	V, м ³
1	300	0,1	$1,667 \cdot 10^{-3}$
2	953,3	5,72	$9,314 \cdot 10^{-5}$
3	1715,9	10,3	$9,314 \cdot 10^{-5}$
4	2059	10,3	$1,118 \cdot 10^{-4}$
5	697	$2,324 \cdot 10^{-1}$	$1,667 \cdot 10^{-3}$
6	547,9	0,1	$3,062 \cdot 10^{-3}$
7	300	$1,215 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-2}$

Таблица 3. Энергетические параметры процессов модернизированного цикла

Процесс	Теплота, кДж	Эксергия теплоты, кДж	Анергия теплоты, кДж	Работа, кДж
1-2	0,0	0,0	0,0	$9,127 \cdot 10^{-1}$
2-3	1,065	$8,191 \cdot 10^{-1}$	$2,464 \cdot 10^{-1}$	0,0
3-4	$6,713 \cdot 10^{-1}$	$5,643 \cdot 10^{-1}$	$1,07 \cdot 10^{-1}$	$1,918 \cdot 10^{-1}$
2-3-4	1,737	1,3834	$3,534 \cdot 10^{-1}$	$1,918 \cdot 10^{-1}$
4-5	0,0	0,0	0,0	1,903
4-6	0,0	0,0	0,0	2,111
4-7	0,0	0,0	0,0	2,458
5-1	$5,548 \cdot 10^{-1}$	$2,015 \cdot 10^{-1}$	$3,534 \cdot 10^{-1}$	0,0
6-1	$4,848 \cdot 10^{-1}$	$1,315 \cdot 10^{-1}$	$3,534 \cdot 10^{-1}$	$1,383 \cdot 10^{-1}$
7-1	$3,534 \cdot 10^{-1}$	0,0	$3,534 \cdot 10^{-1}$	$3,534 \cdot 10^{-1}$

В случае продления адиабаты расширения 4-5 только до точки 6, соответствующей изобаре с давлением окружающей среды p_0 , получим цикл 1-2-3-4-5-6-1 с отводом теплоты Q_2 в изобарном процессе на участке 6-1. В этом случае отвод теплоты будет осуществлен при температуре более высокой, чем окружающая среда, что, естественно, отразится как на значении КПД цикла 1-2-3-4-5-6-1, так и на величине полезной работы.

Данные табл. 3 позволяют определить работу и КПД исследуемых циклов. Так, для цикла 1-2-3-4-5-1

$$L_{iv} = L_{4-5} + L_{3-4} - L_{1-2} = 1,182 \text{ кДж},$$

$$\eta_{iv} = \frac{L_{iv}}{Q_1} \cdot 100\% = 68,1\%,$$

для цикла 1-2-3-4-5-6-1

$$L_{ip} = L_{4-6} + L_{3-4} - L_{1-2} - L_{6-1} = 1,252 \text{ кДж},$$

$$\eta_{ip} = \frac{L_{ip}}{Q_1} \cdot 100\% = 72,1\%,$$

и, наконец, для цикла 1-2-3-4-5-6-7-1

$$L_{ii} = L_{4-7} + L_{3-4} - L_{1-2} - L_{7-1} = 1,383 \text{ кДж},$$

$$\eta_{ii} = \frac{L_{ii}}{Q_1} \cdot 100\% = 79,7\%.$$

В соответствии с теорией, теплота может быть представлена в виде суммы

$$Q = E_Q + A_Q,$$

где E_Q – эксергия теплоты, равная максимально возможной работе при переходе рабочего тела в об-

ратимом процессе из заданного состояния до состояния равновесия с окружающей средой;

A_Q – анергия теплоты, которая определяет ее неработоспособную часть.

Данные табл. 2 позволяют вычислить эксергию и анергию теплоты на участке ее подвода и отвода, значения которых приведено в табл.3.

В расчетном исследовании получили, что работа модернизированного теоретического цикла 1-2-3-4-5-6-7-1 численно равна эксергии теплоты Q_1 , а следовательно, она является максимально возможной ($L_{it} = L_{max}$) для принятых начальных условий. При этом теплота Q_2 численно равна анергии подведенной теплоты A_{Q_1} . Следовательно, внешние потери работоспособной энергии в рассматриваемом цикле отсутствуют. Отсутствуют и внутренние потери эксергии, что и определяет равенство $L_{it} = L_{max} = E_{Q_1}$.

В общем случае

$$L_i = E_{Q_1} - \sum_{i=1}^n \Delta E_i - \sum_{j=1}^k D_j,$$

где $\sum_{i=1}^n \Delta E_i$ – сумма внешних потерь эксергии;

$\sum_{j=1}^k D_j$ – сумма внутренних потерь эксергии.

Чем больше величина отмеченных выше потерь, тем больше разница между величинами L_{max} и L_i .

Максимально возможным для принятых условий цикла 1-2-3-4-5-6-7-1 является и теоретический КПД ($\eta_{it} = \eta_{max}$).

Можно показать, что для такого теоретического цикла

$$\eta_{max} = \frac{E_{Q_1}}{Q_1} = 1 - \frac{\ln(\lambda \rho^k)}{\varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]},$$

а максимальная степень расширения

$$\delta_{max} = \frac{V_7}{V_1} = \varepsilon(\rho\lambda)^{\frac{1}{k-1}}.$$

Переход к циклу 1-2-3-4-5-6-1 с отводом теплоты Q_2 по изобаре 6-1 приводит к возникновению внешних потерь эксергии $E_{Q_2} = 0,1315$ кДж. На эту величину уменьшается работа цикла. Еще большие

внешние потери эксергии E_{Q_2} в цикле 1-2-3-4-5-1 с отводом теплоты Q_2 по изохоре. Согласно табл. 3 они численно равны 0,2015 кДж. В конечном итоге эти внешние потери эксергии приводят к уменьшению КПД теоретических циклов – $\eta_{ip} = 72,1\%$, $\eta_{iv} = 68,1\%$.

Выше изложенное позволяет сделать вывод о том, что значения L_{max} и η_{max} являются предельными для принятых условий, достичь значения которых в реальном цикле невозможно из-за обязательных внутренних и внешних потерь эксергии (потерь работоспособности энергии), а также естественных проблем по техническому обеспечению расширения рабочего тела до температуры окружающей среды. Вместе с тем, величины L_{max} и η_{max} могут служить точкой отсчета при определении максимальных теоретических резервов повышения индикаторного КПД η_i и индикаторной работы L_i : $\Delta L_i = L_{max} - L_i$, $\Delta \eta_i = \eta_{max} - \eta_i$.

Возвращаясь к проблеме «предложений» по обеспечению $\eta_i = 70..80\%$, следует сказать, что в этом случае значения предлагаемых η_i становятся соизмеримыми с η_{max} , что, как показано в статье, противоречит теории, а следовательно, не может быть осуществлено на практике.

Список литературы:

1. Захребётков Ю.В. Эффективность нового способа работы теплового двигателя // Двигателестроение. – 2001. – № 2. – С. 34-36.
2. Маравский А.В., Файн М.А. Огонь в упряжке, или как изобретают тепловые двигатели. – М.: Знание, 1990. – 192 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др. / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
4. Процессы в перспективных дизелях / Ф.И. Абрамчук, В.И. Крутов, А.П. Марченко и др. / Под ред. А.Ф. Шеховцова. – Х.: Изд-во «Основа», 1992. – 352 с.
5. Шокотов Н.К., Марченко А.П., Глушко А.В. Эксергия теплоты и образцовые циклы двигателей внутреннего сгорания // Двигатели внутреннего сгорания. – 1993. – Вып. 54. – С. 45 – 54.