

УДК 621.435

## ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА БРАЙТОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИВЕДЁННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВА

© 2013 Е. Л. Михеенков, С. О. Некрасова

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Источником получения полезного эффекта цикла тепловой машины является тепловая энергия топлив, применяемых в циклах. Максимальный эффект от топлив стремятся получить в циклах ракетных и авиационных двигателей, так как по своей специфике они возят горючее (а в ракетных двигателях и окислитель) на борту на всё время выполнения поставленной задачи. Энергетические и транспортные силовые установки должны использовать доступное по цене и наличию в данном регионе горючее. На примере самого распространённого цикла Брайтона рассмотрены факторы, определяющие максимальный коэффициент использования теплоты, вводимой топливом в цикл. Рассмотрены два фактора, накладывающие ограничения на КПД цикла Брайтона, – максимально допустимый по прочностным свойствам материалов и максимальный уровень продуктов сгорания топлив. Определены значения коэффициентов избытка воздуха при сгорании топлив и предельные характеристики тепловых машин по циклу Брайтона. Приведены сведения об обобщённом подходе к оценке энергетических свойств топлив и влиянии этого показателя на цикл Брайтона.

*Тепловые двигатели, энергетические установки, цикл работы, параметры циклов, топлива, максимальная температура цикла, коэффициент полезного действия, максимальная работа цикла, метод приведённых характеристик топлива.*

Энергетические возможности веществ, обеспечивающих подвод теплоты в ракетных, авиационных и энергетических тепловых машинах, существенно различны. Наивысшей теплотворной способностью обладают вещества, применяемые в ракетных и авиационных двигателях. На наиболее массовых энергетических, транспортных силовых установках применяют более доступные по ценам и с умеренными энергетическими свойствами вещества. Часто эти вещества являются попутными как результат других производственных процессов – выплавки чугуна, перегонки нефти, древесины, сланцев и т.п.

Рассмотрим наиболее распространённый цикл работы тепловых машин – цикл Брайтона. Он характеризуется подводом и отводом теплоты на двух уровнях давления – подвод при высоком уровне и отвод при низком уровне давления. Нижний уровень давления и температуры вещества цикла определяется обычно атмосферными условиями –  $p_a$  и  $T_a$ . Процесс

создания высокого давления вещества в цикле называют сжатием, а переход от верхнего уровня давления к нижнему – расширением. К сжатому веществу подводят тепловую энергию для повышения уровня его температуры, без чего невозможен процесс получения полезной работы цикла.

Удельная (на 1 кг рабочего тела) полезная работа цикла определяется как разность работ расширения и сжатия в цикле при едином перепаде давления – от атмосферного  $p_a$  до максимального  $p_K$ :

$$l_l = l_T - l_K = l_{Tad} h_T - l_{Kad} / h_{Kad}.$$

Для упрощения получающихся зависимостей между параметрами рабочего тела цикла можно принять в первом рассмотрении, что:

- показатели адиабат сжатия и расширения  $k'$  и  $k$  одинаковы;
- гидравлические потери в камере сгорания равны 0, т.е.  $p_K \approx p_2$ ;

– давление воздуха перед компрессором и газа за ступенями расширения равно атмосферному  $p_a$ .

Отношения давлений в цикле  $p = P_K / P_a = P_c / P_a$ . Удобно для упрощения записи зависимостей ввести (вслед за автором [1]) две относительные вспомогательные функции  $x = p^{\frac{k-1}{k}}$  и  $J = T_c / T_a$ . Тогда зависимость для полезной работы цикла запишем в виде

$$l_e = \frac{Rk}{k-1} T_a \left[ J \left( 1 - \frac{1}{x} \right) h_T - \frac{x-1}{h_K} \right], \quad (1)$$

причём работы компрессора (сжатия) и турбины (расширения):

$$l_K = \frac{Rk}{k-1} T_a (x-1) \frac{1}{h_K}; \quad (2)$$

$$l_T = \frac{Rk}{k-1} T_a J \left( 1 - \frac{1}{x} \right) h_T. \quad (3)$$

На рис. 1 приведены характеристики цикла – работа турбины  $l_T$ , компрессора  $l_K$ , цикла  $l_e$ , КПД цикла  $\eta_e$ , подводимой теплоты  $Q_1$ , температура газа за турбиной  $T_m$  и относительная работа цикла  $l_e/T_m$  как функции относительной степени сжатия (расширения).

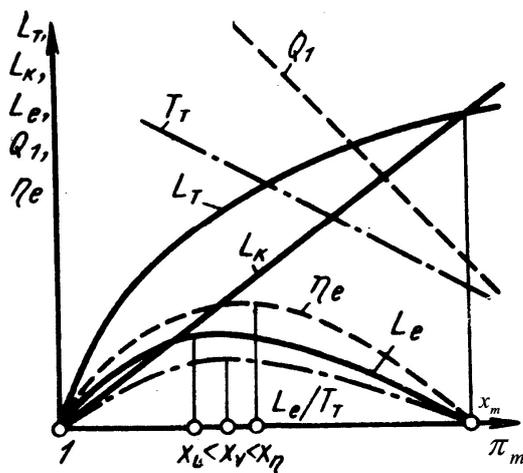


Рис. 1. Параметры простого цикла Брайтона

При  $\pi \rightarrow \infty$  работа сжатия  $l_K \rightarrow \infty$ , а работа расширения растет до некоторой максимальной величины  $l_T = \frac{Rk}{k-1} T_c h_T$ .

Эти кривые пересекаются при  $p = p_m$  (рис. 1). Величину  $\pi_m$  можно определить из уравнения (1) при  $l_e=0$ :  $J \left( 1 - \frac{1}{x} \right) h_T - \frac{x-1}{h_K} = 0$ . Поскольку значение одного корня при  $x=1$  очевидно, после сокращения на  $(x-1)$  получаем:

$$x_m = J h_K h_T \text{ и } p_m = (J h_K h_T)^{\frac{k}{k-1}}; \quad (4)$$

$$p_{opt} = (J h_K h_T)^{\frac{k}{2(k-1)}} \quad (5)$$

и, как это видно из сравнения уравнений (4) и (5),

$$p_{opt} = \sqrt{p_m}. \quad (6)$$

При  $\pi = \pi_{opt}$  работа цикла имеет максимальное значение.

Рассмотрим зависимости  $\eta_e$  цикла как функцию от  $T_a$ ,  $J$  и  $x$ . Примем, что  $h_e = \frac{l_e}{Q_1}$  и подведенная теплота

$$Q_1 = c_p (T_c - T_K) = \frac{Rk}{k-1} T_a \left( J - 1 - \frac{x-1}{h_K} \right), \quad (7)$$

тогда

$$h_e = \frac{J \left( 1 - \frac{1}{x} \right) h_T - \frac{x-1}{h_K}}{J - 1 - \frac{x-1}{h_K}}. \quad (8)$$

Дифференцированием выражения (8) получено значение оптимальной степени повышения давления для максимума КПД:

$$P_{opt} = \left[ \frac{Jh_T}{Jh_T - J + 1} \right]^{k-1} - \left[ \frac{\sqrt{J^2 h_T^2 - Jh_T (Jh_T + 1 - J)(Jh_K + 1 - h_K)}}{Jh_T - J + 1} \right]^{k-1} \quad (9)$$

С ростом степени повышения давления теплота  $Q_I$ , пропорциональная знаменателю выражения (8), монотонно уменьшается, поэтому дробь, т.е. коэффициент полезного действия  $\eta_e$ , достигает своего максимума при  $x_\eta > x_\ell$ .

Из приведённого выше анализа цикла Брайтона видно, что при известных КПД процессов сжатия и расширения достижение максимальной работы или КПД цикла определяется относительной максимальной температурой цикла  $\vartheta$  и показателем сжатия-расширения  $x$ . Целесообразно рассмотреть несколько рабочих тел, образованных продуктами сгорания широко применяемых топлив, и определить параметры цикла Брайтона. Расчётные зависимости связи параметров цикла Брайтона выведены для 1 кг воздуха. Авторам представилось целесообразным количество рабочего тела цикла определять по единице расхода топлива – 1 кг.

Калориметрическая температура продуктов сгорания в воздухе для применяемых в транспортных и энергетических установках газов и керосина приведена в табл. 1.

Таблица 1. Калориметрические температуры продуктов сгорания в воздухе для газообразного и жидкого топлива (при начальной температуре горения +25°C)

Горючее	Калориметрическая температура, °C
Керосин	2200
Водород	2258
Метан	2056
Пропан	2120
Природный газ	2003
Сланцевый	1900
Доменный	1470
Подземной газификации	1270

Характер изменения калориметрической температуры продуктов сгорания от начальной температуры можно проиллюстрировать на примере метана (табл. 2).

Таблица 2. Характер изменения калориметрической температуры продуктов сгорания от начальной температуры

Условия сгорания	Калориметрическая температура, °C
В хол. воздухе (+25°C)	2056
При сжатии до:	
100°C	2103
200°C	2166
400°C	2305

Свойства продуктов сгорания определяются составом смеси.

Как известно, калориметрическая температура определяется при условии задания начальной температуры горения. При сгорании в цикле начальная температура процессов горения равняется температуре за компрессором – чем выше степень повышения давления и ниже адиабатный КПД сжатия, тем выше начальная температура сгорания в камере сгорания.

Воспользуемся моделью определения состава продуктов горения произвольных углеводородных топлив для стехиометрического состава и пересчитаем состав смеси при произвольном значении коэффициента избытка воздуха для обеспечения требуемой рабочей температуры смеси. Задача определения температуры смеси упрощается тем, что, как видно из табл. 1 и 2, стехиометрическая температура у всех горючих выше предельного значения по долговечности работы газотурбинной установки в 1600 К. Для этого уровня температур для всех рассматриваемых горючих будем вести расчёт коэффициента избытка воздуха, состава смеси и термодинамических свойств смеси, по которым определим показатели цикла Брайтона.

Стехиометрический состав продуктов сгорания углеводородов в массовых долях [2]:

$$g_{CO_2} = \frac{11C/3}{11C/3 + 9H + 0,768L_0}; \quad (10)$$

$$g_{H_2O} = \frac{9H}{11C/3 + 9H + 0,768L_0}; \quad (11)$$

$$g_{N_2} = \frac{0,768L_0}{11C/3 + 9H + 0,768L_0}. \quad (12)$$

Пересчётом массового состава смеси для произвольного значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  находится, например, для массовой доли кислорода

$$g''_{O_2} = (g_{O_2} + g'_{O_2} \cdot (\alpha - 1)) / \alpha,$$

где без штрихов обозначено содержание вещества при стехиометрическом сгорании, с одним штрихом – в чистом воздухе и с двумя штрихами – в смеси с произвольным коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ . Кстати, для смеси с  $\alpha=1$  (стехиометрической)  $g_{O_2} = 0$ , т.е. исчерпана способность воздуха как окислителя. Аналогично:

$$g''_{N_2} = (g_{N_2} + g'_{N_2} \cdot (\alpha - 1)) / \alpha;$$

$$g''_{H_2O} = (g_{H_2O} + g'_{H_2O} \cdot (\alpha - 1)) / \alpha;$$

$$g''_{CO_2} = (g_{CO_2} + g'_{CO_2} \cdot (\alpha - 1)) / \alpha.$$

Из изложенного выше имеем:

– для максимального КПД цикла

$$h_e = \frac{J \left( 1 - \frac{1}{x} \right) h_T - \frac{x-1}{h_K}}{J - 1 - \frac{x-1}{h_K}}$$

и  $p_{opt}$  определяется по формуле (9);

– для максимальной работы

$$p_{opt} = (J h_K h_T)^{\frac{k}{2(k-1)}};$$

$$l_e = J \cdot \left( 1 - \frac{1}{x} \right) \cdot h_T - \frac{x-1}{h_K}.$$

Примем в расчёте реально достигнутые показатели КПД сжатия и расширения  $\eta_k=0,86$  и  $\eta_m=0,93$ . Для стандартной атмосферы  $T_a = 288$  К и для  $T_m = 1600$  К расчётное значение относительной мак-

симальной температуры цикла равно  $v=5,55$ .

Можно видеть, что если рассматривать цикл Брайтона как функцию от  $x$  и  $v$ , свойства веществ выпадают как факторы влияния.

При этом  $\eta_e$  (с  $x_{opt}$ ) и унифицированная работа  $l_{abs}$  (с  $x_{opt}$ ) у всех рабочих тел неизменны и составляют для принятых выше  $\eta_k$ ,  $\eta_T$  и  $v$  соответственно  $x_{opt}=2,99$ ;  $\eta_e=0,517$ ;  $x_{opt}=2,108$  и  $l_{abs}=1,43$ . Температура воздуха за компрессором для обеспечения максимальной работы равна 659 К, а для максимального КПД цикла 953 К.

Для перехода к конкретным рабочим телам (воздуху и продуктам сгорания топлив) необходимо знать величины  $R$  и  $k$  рабочих тел. Сжатие в цикле Брайтона подвергается воздух с  $R=287$  Дж/кг·К и  $k=1,4$ , а для продуктов сгорания можно принять  $k=1,3$  и  $R=288,3$  Дж/кг·К.

В паротурбостроении нашёл широкое применение метод расчёта энергетических свойств горючих по приведённым характеристикам [6]. Основопологающим фактором стала гипотеза Вельтера, гласящая, что количество кислорода, которое расходуется при полном сгорании топлива, прямо пропорционально количеству выделенного тепла. В результате появилась гипотеза, получившая название правила Вельтера-Бертге. Математически это правило записывается в современных научных терминах следующим образом:

$$V_g^0 = a \cdot \frac{H_u}{1000}, \quad (13)$$

где  $V_g^0$  – теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания топлива ( $m^3/kg$ );  $H_u$  – низшая теплотворная способность топлива (ккал/кг);  $a$  – коэффициент, практически постоянный для всех видов топлива,  $a \approx 1.1$ .

Для случая измерения теплотворной способности в системе СИ появляется коэффициент 4,19 связи размерностей кДж и ккал.

Таблица 3. Теплотехнические характеристики энергетических топлив

Топливо	Характеристики, отнесённые к единице массы топлива				Приведённые характеристики		
	$W^p$ , %	$H_u$ , ккал/кг	$V^0$ , м <sup>3</sup> /кг	$V_{s,2}^0$ , м <sup>3</sup> /кг	$W^n$	$V_6^{n,0}$	$V_2^{n,0}$
Донецкий Т	5,0	6550	7,21	7,6	0,76	1,10	1,16
Донецкий АШ	7,0	6010	6,63	6,93	1,16	1,10	1,15
Донецкий ППМ	11,0	3650	4,15	4,52	3,02	1,14	1,24
Кузнецкий ПС	6,5	6740	7,47	7,89	0,96	1,11	1,17
Карагандинский ПС	26,0	3620	4,09	4,71	7,18	1,13	1,30
Подмосковный Б	33,0	2510	2,98	3,62	13,2	1,19	1,44
Кизеловский Г	5,5	4970	5,52	5,93	1,11	1,11	1,19
Богословский Б	28,0	2840	3,27	3,90	9,85	1,15	1,375
Челябинский Б	17,0	3770	4,18	4,71	4,52	1,11	1,25
Экибастузский С	8,0	4050	4,51	4,90	1,98	1,11	1,21
Кушмурунский Б	35,0	3230	3,85	4,57	10,8	1,19	1,41
Итатский Б	45,0	2675	3,16	3,94	16,8	1,28	1,47
Назаровский Б	40,0	3060	3,61	4,33	13,0	1,18	1,41
Сланец эстонский	15,0	2730	2,99	3,50	5,52	1,10	1,29
Мазуты масло- и высокосернистые	3,0	9170-9310	10,15-10,28	10,93-11,06	0,32	1,11	1,19
Природные газы сухие	-	7946-8560	8,83-9,51	9,99-10,68	-	1,11	1,25

Табл. 3 показывает различия характеристик энергетических топлив в физических и приведённых единицах.

В качестве характеристик приведены относительная влажность горючего  $W^p$  и её приведённая величина  $W^n$ , теоретически необходимый объём воздуха  $V^0$  и его приведённая величина  $V_6^{n,0}$ , а также приведённый объём продуктов горения  $V_2^{n,0}$  при стехиометрическом горении ( $a = 1$ ).

Как можно видеть из табл. 3, при использовании в качестве единиц теплоты

ккал приведённые характеристики имеют первый порядок.

В табл. 4 приведена информация по термодинамическим свойствам горючих при сгорании в воздухе – адиабатная температура при сгорании в холодном и сжатом воздухе, потребные объёмные и массовые расходы воздуха, молекулярная масса и удельная газовая постоянная продуктов сгорания, коэффициент избытка воздуха для обеспечения максимальной температуры цикла 1600 К.

Таблица 4 Показатели цикла Брайтона для различных горючих

Горючее	Формула	Мол. масса	Адиаб. температура, К		$H_u$ , МДж/кг	$V_0$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$L_0$ , кг/кг	$m_{ПС}$	$R_{ПС}$	$a$	$L$ , МДж/кг	$\frac{L}{H_u}$
			273К	659К								
Керосин	-	-	2300	2580	43	-	14,8	28,84	288,3	1,95	6,819	0,158
Водород	H <sub>2</sub>	2,016	2510	2790	119,94	2,38	34,2	24,54	338,8	2,15	18,715	0,156
Метан	CH <sub>4</sub>	16,043	2310	2590	50,028	9,52	17,2	27,63	300,94	1,96	7,848	0,156
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,095	2375	2660	46,33	23,8	15,20	28,32	293,6	2,08	7,178	0,155
Дом. газ	-	30,82	1725	2020	4,855	0,799	0,75	30,82	269,77	1,41	0,755	0,155
П/газиф	-	30,31	1525	1810	4,89	0,826	0,789	30,31	274,27	1,20	0,772	0,157

В предпоследнем столбце табл. 4 приведена работа цикла Брайтона при сжигании 1 кг топлива по теплоёмкости воздуха в процессе сжатия и температуре 288 К. Самой высокой работоспособностью отличается как горючее водород; керосин и основные природные газы обеспечивают работоспособность в два раза меньше. В 20 раз меньшей работоспособностью обладают доменный и подземной газификации горючие газы (в табл.4 – дом. газ и п/газиф.). Этот факт надо учитывать при определении не только размеров оборудования для хранения горючего, но и его массы и стоимости, если задано потребное количество выработки полезной энергии.

Если же работу цикла отнести к низшей теплотворности горючего (последний столбец табл. 4), то величина удельной работы (на 1 кг рабочего тела и на один МДж низшей теплотворной способности горючего) различаются незначительно.

Приведённые выше соображения говорят о том, что если цикл Брайтона оптимизирован по какому-то итоговому параметру – работе цикла или КПД цикла, то при расчёте на единицу низшей теплотворной способности горючее не влияет на относительную величину работы одного МДж горючего.

Необходимо отметить, что рассуждения по оптимизации цикла Брайтона

проведены из предположений постоянства показателей адиабат воздуха и продуктов сгорания, без отборов воздуха на нужды потребителей и т.д. Данное сообщение должно дать толчок для более подробных исследований в области применения приведённых (обобщённых) характеристик топлива в термодинамическом анализе работы тепловых машин.

### Библиографический список

1. Акимов, В. М. Теория и расчет ВРД. [Текст] / В.М. Акимов. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с.
2. Болгарский, А. В. Расчёт процессов в камере сгорания ЖРД. [Текст] / А.В. Болгарский – М.: Оборонгиз, 1957. – 54 с.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справ. изд. в 4 т. [Текст] / Л. В. Гурвич, И. В. Вейц, В. А. Медведев [и др.] ; редкол.: В. П. Глушко (отв. ред.) ; АН СССР, Ин-т высоких температур, Гос. ин-т прикл. химии. – 3-е изд., перераб. и расшир. – М.: Наука, 1981.
4. Квасников, А. В. Теория жидкостных ракетных двигателей [Текст] : учеб. пособие для судостроит. машиностроит. и авиац. вузов / А. В. Квасников. – Л. : Судпромгиз, 1959. – 542 с.
5. Пеккер, Я. Л. Теплотехнические расчёты по приведённым характеристикам топлива [Текст] / Я. Л. Пеккер. – М.: Энергия, 1977. – 256 с.

## LIMIT VALUES OF THE BRAYTON CYCLE WITH THE USE OF REDUCED FUEL CHARACTERISTICS

© 2013 E. L. Mikheenkoy, S. O. Nekrasova

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

Heat energy of fuels used in cycles is a source of reaching useful effect of the heat engine cycle. The maximum effect of using the fuels can be obtained in the cycles of rocket and aircraft engines since, due to their specific nature, they carry the fuel (as well as the oxidizer in rocket engines) during the whole period of performing the mission. The energy and transport power installations are to use the fuel available in the region and reasonably-priced. Taking the most common Brayton cycle as an example we considered factors that determine the maximum coefficient of heat consumption of fuel in the cycle. Two factors are considered restricting the effi-

ciency of the Brayton cycle efficiency: the maximum permissible limit of the strength properties of materials and the maximum level of fuel combustion products. The values of the excess air ratios in the combustion of fuels and the limiting characteristics of heat engines according to the Brayton cycle are determined. The information on the generalized approach to the assessment of the energy properties of the fuels and the impact of this measure on the Brayton cycle is presented.

*Heat engines, power plants, operation cycle, cycle parameters, fuel, maximum temperature of the cycle, efficiency ratio, maximum work cycle, method of fuel reduced characteristics.*

### **Информация об авторах**

**Михеенков Евгений Леонтьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [Eugene.mikh.@gmail.com](mailto:Eugene.mikh.@gmail.com). Область научных интересов: термодинамика циклов тепловых машин, теплопередача.

**Некрасова Светлана Олеговна**, инженер кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [yhoji@yandex.ru](mailto:yhoji@yandex.ru). Область научных интересов: тепловые двигатели, циклы тепловых машин.

**Mikheenkov Evgeny Leontyevich**, candidate of technical science, associate professor of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [Eugene.mikh.@gmail.com](mailto:Eugene.mikh.@gmail.com). Area of research: thermodynamics cycles of heat engines, heat transfer.

**Nekrasova Svetlana Olegovna**, engineer of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [yhoji@yandex.ru](mailto:yhoji@yandex.ru). Area of research: heat engines, cycles of heat engines.