

УДК 621.435

ОГРАНИЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЦИКЛОВ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, НАЛАГАЕМЫЕ СВОЙСТВАМИ ТОПЛИВ

©2011 Е. Л. Михеенков

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) с собой на все время выполнения поставленной задачи. Энергетические и транспортные силовые установки должны использовать доступное по цене и наличию в данном регионе горючее. На примере самого распространенного 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 циклов тепловых машин по циклу Брайтона.

Тепловые двигатели, энергетические установки, цикл работы, параметры циклов, топлива, максимальные температуры цикла, коэффициент полезного действия, максимальная работа цикла.

Энергетические возможности веществ, обеспечивающих подвод теплоты в ракетных, авиационных и энергетических тепловых машинах, существенно различны. Наиболее 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 распространенный цикл работы тепловых машин – цикл Брайтона. Он характеризуется подводом и отводом теплоты на двух уровнях давлений – подвод при высоком уровне и отвод при низком уровне давления. Нижний уровень давлений и температур 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 давлений к нижнему – расширением. К сжатию веществу подводят тепловую энергию для повышения уровня его температуры, без чего невозможен процесс получения полезной работы цикла.

Удельная (на один кг рабочего тела) полезная работа цикла определяется как

разность работ расширения и сжатия в цикле при едином перепаде давлений – от атмосферного p_a до максимального p_k :

$$\ell_e = \ell_T - \ell_K = \ell_{Тад} \eta_T - \ell_{Кад} / \eta_{Кад}.$$

Выражая работу компрессора и турбины как функцию начальных температур и отношения давлений, получим

$$\ell_e = \frac{Rk}{k-1} T_c \left[1 - \left(\frac{p_m}{p_c} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_T - \frac{R'k'}{k'-1} T_a \left[\left(\frac{p_k}{p_a} \right)^{\frac{k'-1}{k'}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_K}.$$

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

- показатели адиабат сжатия и расширения k' и k одинаковы;
- гидравлические потери в камере сгорания равны 0, т.е. $p_k \approx p_c$;
- давление воздуха перед компрессором и газа за ступенями расширения равно атмосферному p_a .

Отношения давлений в цикле $\pi = p_k / p_a = p_c / p_a$. Удобно для упрощения записи зависимостей ввести (вслед за авторами [3]) две относительные вспомогатель-

ные функции $x = \pi^{\frac{k-1}{k}}$ и $\vartheta = T_c/T_a$. Тогда зависимость для полезной работы цикла:

$$l_e = \frac{Rk}{k-1} T_a \left[\vartheta \left(1 - \frac{1}{x} \right) \eta_T - \frac{x-1}{\eta_K} \right], \quad (1)$$

причем работы компрессора (сжатия) и турбины (расширения)

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

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

На рис. 1 приведены характеристики цикла – работа турбины L_T , компрессора L_K , цикла L_e , КПД цикла η_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).

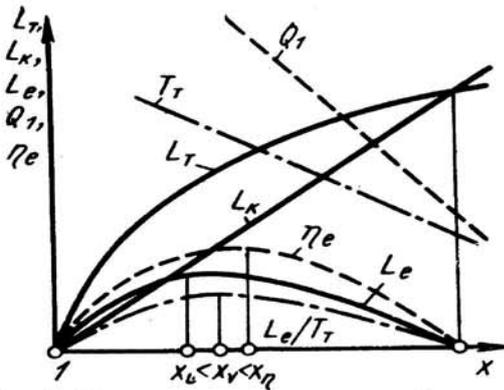


Рис. 1. Параметры простого цикла Брайтона

При $\pi \rightarrow \infty$ работа сжатия $l_K \rightarrow \infty$, а работа расширения растет до некоторой максимальной величины $l_T = \frac{Rk}{k-1} T_c \eta_T$. Эти кривые пересекаются при $\pi = \pi_m$ (см. рис. 1). Величину π_m можно определить из уравнения (1) при $l_e = 0$: $\vartheta \left(1 - \frac{1}{x} \right) \eta_T - \frac{x-1}{\eta_K} = 0$.

Поскольку значение одного корня при $x = 1$ очевидно, после сокращения на $(x-1)$ получается:

$$x_m = \vartheta \eta_K \eta_T \quad \text{и} \quad \pi_m = (\vartheta \eta_K \eta_T)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (4)$$

$$\pi_{opt} = (\vartheta \eta_K \eta_T)^{\frac{k}{2(k-1)}} \quad (5)$$

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

$$\pi_{opt} = \sqrt{\pi_m}. \quad (6)$$

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

Рассмотрим зависимости η_e цикла как функцию от T_a , ϑ и x . Примем, что $\eta_e = \frac{l_e}{Q_1}$

и подводимая теплота

$$Q_1 = c_p (T_c - T_K) = \frac{Rk}{k-1} T_a \left(\vartheta - 1 - \frac{x-1}{\eta_K} \right). \quad (7)$$

Тогда

$$\eta_e = \frac{\vartheta \left(1 - \frac{1}{x} \right) \eta_T - \frac{x-1}{\eta_K}}{\vartheta - 1 - \frac{x-1}{\eta_K}}. \quad (8)$$

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

$$\pi_{opt\eta} = \left[\frac{\vartheta \eta_T - \sqrt{\vartheta^2 \eta_T^2 - \vartheta \eta_T (\vartheta \eta_T + 1 - \vartheta) (\vartheta \eta_K + 1 - \eta_K)}}{\vartheta \eta_T - \vartheta + 1} \right]^{\frac{k}{k-1}}. \quad (9)$$

С ростом степени повышения давления теплота Q_1 , пропорциональная знаменателю выражения (8), монотонно уменьшается, поэтому дробь, т.е. коэффициент полезного действия η_e , достигает своего максимума при $x_\eta > x_l$.

Можно видеть, что очень важными характеристиками рабочего вещества цикла являются – удельная газовая постоянная R и показатель адиабаты k . Чем выше удельная газовая постоянная и показатель адиабаты, тем больше может быть полезная работа цикла. Удельная газовая постоянная вещества определяется молекулярной массой – чем она меньше, тем выше его удельная газовая постоянная. А наибольшие значения показателя адиабаты имеют одноатомные вещества, при увеличении числа атомов в молекулах показатель адиабаты снижается.

Подвод теплоты может производиться к веществу цикла путем подмешивания к нему других веществ, которые за счет химических или других преобразований выделяют тепловую энергию. Но возможна схема замкнутого цикла, когда расходования рабочего тела не происходит. Подвод теплоты

производится через систему теплообменников. Последние схемы целесообразны только для стационарных или специальных силовых установок. В данном рассмотрении мы их касаться не будем.

Выделение теплоты в цикле основных тепловых силовых машин чаще всего происходит как результат химических реакций и превращений. Условно вещества, способные вступать в соединения с другими веществами с выделением теплоты называют горючим, а вещества, вступающие с ними в химические реакции, называют окислителями. К горючим могут быть отнесены элементы, находящиеся в первых 3 группах и первых 4 периодах Периодической системы – H_2 , Li, Be, B, C, Mg и Al. Наиболее активные окислители располагаются во 2 и 3 группах, но в VI и VII периодах – O, F и Cl. В ходе химических превращений имеет место или выделение теплоты, или на превращения требуется энергия, потребляемая из ресурсов реакции. Химические реакции с выделением теплоты называют экзотермическими, а с поглощением теплоты – эндотермическими. Стандартные реакции хорошо изучены и количество теплоты на их прохождения известно. Количество теплоты в ходе этих реакций называют стандартной теплотой превращения. Стандартные термодинамические свойства элементов и продуктов химических преобразований приводятся в справочниках типа [1,2] или [5]. Знак минус в этих таблицах соответствует экзотермическим реакциям, знак плюс эндотермическим. Основным источником окислителя для большинства энергетических установок является кислород атмосферного воздуха. Концентрация кислорода в воздухе определяет минимальное количество воздуха, потребное для сгорания единицы массы (объема) горючего. Его называют теоретически необходимым количеством воздуха и в отечественной научной литературе обозначают $L_0(V_0)$, а смесь этого количества воздуха (L_0) с единицей массы или объема горючего (для V_0) называют стехиометрической. Именно стехиометрическому составу соответствует максимальное выделение теплоты и максимальный уровень температуры продуктов сгорания. Условный уровень температуры продуктов сгорания при атмосферном дав-

лении и начальной температуре реакции 293К называют адиабатной (иногда калориметрической) температурой данного топлива. Эта величина удобна для всевозможных горелок, когда именно атмосферные условия сгорания топлива практически соответствуют заданному стандарту. Минимальный набор термодинамических параметров (функций) продуктов реакций в справочниках включает зависимость теплоемкости C_p , энтальпии и энтропии от температур T . Газовая постоянная любых веществ принимается равной 8314,3 Дж/моль·К, а её удельные значения (на один килограмм массы или нормальный кубический метр) определяются по молекулярному составу и атомным массам элементов и продуктов реакций.

Максимальный уровень выделения тепла при сгорании топлива соответствует стехиометрической смеси. Наибольший интерес представляет смесь топлива с воздухом, которая определяется количеством топлива и значением L_0 . Если принять в рассуждениях 1 кг топлива, то масса продуктов сгорания и соответственно рабочего тела станет равной $(1+L_0)$ кг. За максимальную температуру вещества при рассмотрении цикла Брайтона можно принять или калориметрическую температуру продуктов сгорания или какое-то достигнутое на современном уровне развития техники значение, обеспечивающее необходимые ресурсы работы горячей части двигателя. Получение этого ограниченного уровня температур обеспечивается разбавлением воздухом, не участвующим в горении. В настоящий момент для энергетических или транспортных установок, работающих по циклу Брайтона, таким уровнем можно признать $T_2=1600K$.

Из приведенного выше анализа цикла Брайтона видно, что при известных КПД процессов сжатия и расширения достижение максимальной работы или КПД цикла определяется относительной максимальной температурой цикла ϑ . Целесообразно рассмотреть несколько рабочих тел, образованных продуктами сгорания широко применяемых топлив, и определить параметры цикла Брайтона. Расчетные зависимости связи параметров цикла Брайтона выведены для 1 кг воздуха. Автору представилось целесооб-

разным количество рабочего тела цикла определять по единице расхода топлива – одного 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

Горючее	$t_{\text{каль}}, ^\circ\text{C}$
Керосин	2100
Водород	2210
Метан	2065
Пропан	2115
Природный газ	2003
Сланцевый	1900
Доменный	1470
Подземной газификации	1270

Как известно, калориметрические температуры определяются при условии начала горения при температуре 0°C или 20°C . 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.

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

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

Условия сгорания	Калориметрическая температура $t, ^\circ\text{C}$
В хол. воздухе	2003
При сжатии до:	
100 $^\circ\text{C}$	2066
200 $^\circ\text{C}$	2128
400 $^\circ\text{C}$	2257

В реальных условиях атмосферный воздух всегда содержит то или иное количество паров воды, а учитывая, что пары воды имеют существенное различие по термодинамическим свойствам от среднего состава воздуха, целесообразно бы учесть и этот фактор. В данной статье автор не предпола-

гает вводить учет содержания воды в продуктах сгорания, это является темой других исследований.

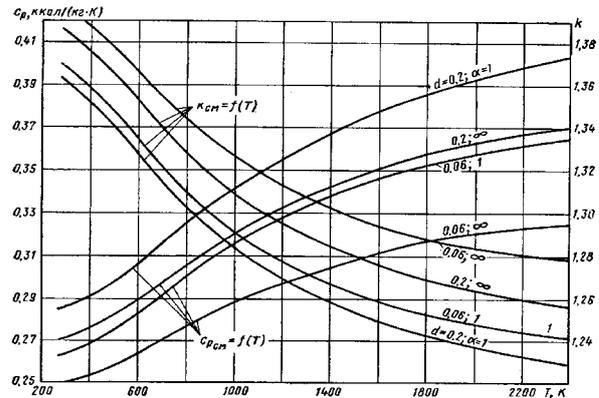


Рис. 2. Зависимость свойств продуктов сгорания керосина в воздухе от температуры, коэффициента избытка воздуха и влагосодержания

Свойства продуктов сгорания определяются составом смеси.

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

Стехиометрический состав продуктов сгорания углеводородов в массовых долях находят [4]:

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

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

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

Пересчет массового состава смеси для произвольного значения коэффициента избытка воздуха α 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 α . 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

$$\eta_e = \frac{\vartheta \left(1 - \frac{1}{x}\right) \eta_T - \frac{x-1}{\eta_K}}{\vartheta - 1 - \frac{x-1}{\eta_K}}$$

и $\pi_{опт} =$

$$= \left[\frac{\vartheta \eta_T - \sqrt{\vartheta^2 \eta_T^2 - \vartheta \eta_T \cdot (\vartheta \eta_T + 1 - \vartheta) \cdot (\vartheta \eta_K + 1 - \eta_K)}}{\vartheta \eta_T - \vartheta + 1} \right]^{\frac{k}{k-1}},$$

- для максимальной работы

$$\pi_{opt} = (\vartheta \eta_K \eta_T)^{\frac{k}{2(k-1)}},$$

$$\ell_e = \vartheta \cdot \left(1 - \frac{1}{x}\right) \cdot \eta_T - \frac{x-1}{\eta_K}.$$

Примем в расчете реально достигнутые показатели КПД сжатия и расширения $\eta_K = 0,86$ и $\eta_m = 0,93$. Для стандартной атмосферы $T_a = 288K$ и для $T_m = 1600K$ расчетное

значение относительной максимальной 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 КПД цикла

$$\eta_e = \frac{\vartheta \left(1 - \frac{1}{x}\right) \eta_T - \frac{x-1}{\eta_K}}{\vartheta - 1 - \frac{x-1}{\eta_K}}$$

и приведенную работу цикла в виде

$$\ell_{abs} = \frac{\ell_e}{Rk T_a} = \left[\vartheta \left(1 - \frac{1}{x}\right) \eta_T - \frac{x-1}{\eta_K} \right],$$

то η_e (с $x_{опт}$) и унифицированная работа ℓ_{abs} (с $x_{опт}$) у всех рабочих тел неизменны и составляют для принятых выше η_K, η_T и v соответственно $x_{опт} = 2,986$; $\eta_e = 0,517$; $x_{opt} = 2,1079$ и $\ell_{abs} = 1,4273$. Температура воздуха за компрессором для обеспечения максимальной работы равна 659K, а для максимального КПД цикла 953K.

Для перехода к конкретным рабочим телам (воздуху и продуктам сгорания топлив) необходимо знать величины R и k рабочих тел. Сжатию 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 табл. 3 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 1600K.

Таблица 3. Показатели цикла Брайтона для различных горючих

Горючее	Хим. форм.	Молек. масса	Адиаб. т-ра, К		Н _u , МДж/кг	V ₀ , м ³ /м ³	L ₀ , кг/кг	ипс	Rпс	α	L МДж/кг
			273К	659К							
керосин	-	-	2373	2618	43	-	14,8	-	288,3	2,553	6,819
водород	H ₂	2,016	2483	2728	141,79	2,38	34,1888	25,45	326,6	2,41	15,188
метан	CH ₄	16,043	2338	2583	55,263	9,52	17,1850	29,18	284,89	2,335	7,848
пропан	C ₃ H ₈	44,095	2428	2673	50,384	23,8	15,6309	29,90	278,0	2,38	7,178
дом. газ	-	30,82	1743	1988	4,455	0,799	0,75142	30,82	269,77	2,048	0,755
п/газиф	-	30,31	1543	1788	4,082	0,826	0,788972	30,31	274,27	1,959	0,772

В последнем столбце табл. 3 приведена работа цикла Брайтона при сжигании 1 кг топлива по теплоемкости воздуха в процессе сжатия и температуре 288К. Самой высокой работоспособностью отличается как топливо водород; керосин и основные природные газы обеспечивают работоспособность в два раза меньше. В 20 раз меньшей работоспособностью обладают доменный и подземной газификации горючие газы. Этот факт надо учитывать при определении не только размеров оборудования для хранения горючего, но и его массы (а также стоимости), если задано потребное количество выработки полезной энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Теория и расчет ВРД [Текст] / В.М. Акимов [и др.] - М.: Машиностроение, 1987. - 568 с.
2. Болгарский, А.В. Расчет процессов в камере сгорания ЖРД [Текст] / А.В. Болгарский. – М.: Оборонгиз, 1957.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справочник в 4 т. [Текст] / В.П. Глушко [и др.] – М.: Наука, 1978 - 1982.
4. Термодинамические свойства продуктов сгорания [Текст]: справочник в 10 т. / под ред. В.П. Глушко [и др.] – М.: ВИНТИ АН СССР, 1971. – 1979.
5. Квасников, А.В. Теория жидкостных ракетных двигателей [Текст] / А.В. Касников.- Л.: Судпромгиз, 1959. - 542 с.

HEAT ENGINE CYCLE LIMITATIONS IMPOSED BY FUEL PROPERTIES

©2011 E. L. Mikheyenkov

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

The heat energy of fuels used in a heat engine cycle is the source of the cycle's useful effect. The maximum fuel efficiency is particularly desirable in rocket and aircraft engines due their carrying the fuel (and the oxidant, in rocket engines) during the entire mission. In vehicle engines and power plants fuels are selected based on their cost and availability. Using the most prevalent Brayton cycle as an example, the article considers parameters that determine the maximum available heat factor introduced by a fuel into the cycle. Two parameters limiting the Brayton cycle's efficiency are considered, the maximum efficiency imposed by strength properties of materials and the maximum level of combustion products. The values of excess air factors for fuel combustion processes and limiting characteristics of heat engine cycles are determined for the case of Brayton cycles.

Heat engines, power plants, heat cycle, cycle parameters, fuel parameters, maximum cycle temperatures, efficiency.

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). Тел.: (846) 267-45-68. E-mail: teplotex_ssau@bk.ru. Область научных интересов: термодинамика циклов тепловых машин и теплопередача.

Mikheyenkov Evgeniy Leontjevich, Candidate of Engineering Sciences, associate professor in the Department of Heat Technology and Heat Engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-45-68. E-mail: teplotex_ssau@bk.ru. Area of research: focus on heat engine cycle thermodynamics and heat transfer.