

УДК 621.435

ИСТОЧНИКИ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЭНЕРГИИ В ЦИКЛАХ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

© 2011 Е. Л. Михеенков

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

В тепловых машинах источником получения полезной энергии (работы) по определению является тепловая энергия. Источником тепловой энергии является химическая реакция с выделением тепловой энергии между веществами, входящими в рабочее тело цикла теплового двигателя, или дополнительно вводимыми веществами. Продукты реакции горения и являются рабочим телом цикла на стадии его расширения с получением полезной энергии (работы). Для инженерных и научных задач получены энергетические характеристики процессов образования продуктов сгорания. Химическая термодинамика разработала систему уравнений, определяющих итоговый состав продуктов реакций и энергетику реакций. Для расчета циклов энергетических установок необходимо получить составы продуктов сгорания (термодинамические свойства- теплоемкости, удельную газовую постоянную) и максимальный уровень температур продуктов реакции. В статье дан обзор подходов к решению задачи по определению термодинамических свойств продуктов сгорания и приведены значения этих параметров для наиболее распространенных топлив при их сгорании в воздухе.

Рабочее тело цикла, тепловая энергия, горючее, окислитель, реакции горения, продукты сгорания, термодинамические свойства продуктов сгорания.

Тепловые машины по определению в качестве основополагающего понятия имеют дело с тепловой энергией, то есть для получения полезной энергии необходим подвод к рабочему телу машины и отвод от рабочего тела энергии в виде теплоты. Тепловые машины позволяют получать желаемый полезный эффект как за счет изменения объемов рабочего тела, так и за счет преобразования энергии потока массы. Рабочие тела используются в виде одной фазы или при наличии фазовых, химических преобразований.

Температура рабочих тел циклов тепловых машин является определяющим фактором при наличии фазовых превращений веществ, являющихся рабочими телами тепловых машин. Но и при отсутствии фазовых переходов в рабочих веществах цикла именно температура является важнейшим фактором, определяющим эффективность использования подведенного количества теплоты в цикл.

Разработчики авиационных, ракетных двигателей или двигателей для энергетических, транспортных целей имели дело с различными веществами для создания тепловой энергии в циклах тепловых машин. Знания о свойствах источников теплоты носили специфически отраслевой комплекс понятий и представлений об их возможностях. Ракетные двигатели требовали максимальной концентрации тепловых источников в единице массы/объема веществ. Аналогичные требования, возможно в меньшей степени, имелись и для преобразуемых веществ в авиа-

ции. Энергетические, транспортные установки должны были использовать наиболее доступные располагаемые расходуемые вещества. Теплота чаще всего подводится в цикл как результат химических превращений веществ, уже имеющихся в составе рабочего тела или дополнительно добавляемых.

Автору представилось полезным получить общий взгляд на расходуемые источники тепловой энергии в циклах тепловых машин, особенно важный при конвертировании авиационных двигателей в качестве силовых установок уже для энергетики и транспорта (перевод их с керосина на газовые топлива).

Выделение теплоты в цикле как результат химических реакций принято называть горением. Для реакции горения необходимы горючее (вещество, способное вступать в реакции соединения с другими веществами с выделением теплоты) и окислитель (вещество, располагающее возможностью вступать в реакции соединения с веществами горючего). Нередко, как это имеет место в ракетных двигателях твердого топлива, рабочее вещество цикла может состоять из смеси горючего и окислителя.

К топливам могут быть отнесены элементы, находящиеся в первых трёх группах и первых четырёх периодах Периодической системы – H₂, Li, Be, B, C, Mg и Al. Перечисленные элементы по активности образования соединений располагаются в ряд активности, что необходимо учитывать при

выборе элементов (так, Al может отобрать кислород у водорода из воды, что используют в генераторах водорода). Окислителями называют элементы 5, 6 и 7 периодов – фтор, кислород, хлор. К окислителям можно отнести и сложные вещества с высоким содержанием отмеченных элементов. Окислитель присоединяет недостающие электроны, тогда как горючее отдает свои внешние электроны. В ракетных топливах кроме горения источником теплоты является (с меньшим энергетическим эффектом) реакция разложения при наличии каких-то тепловых инициаторов или катализаторов.

Изучением процессов преобразования веществ в ходе химических реакций, количества выделяющейся при этом тепловой энергии, занимается химическая термодинамика. Нас будет интересовать энергетика процессов химических реакций. Реакции соединения, назовем их прямыми, в соответствии с законом сохранения энергии могут протекать с выделением тепла из системы химических превращений в окружающую среду или потребовать подпитки тепловой энергией от окружающей среды. Полагается, что обратные реакции, как правило, сопровождаются обратными процессами обмена теплотой с окружающей средой. Реакции, сопровождающиеся выделением тепла в окружающую среду, называют экзотермическими. Реакции, протекающие с поглощением тепла из окружающей среды, называют эндотермическими. Состав продуктов сгорания определяется значениями констант равновесия процессов горения; сами же константы равновесия задают обычно в виде отношений парциальных давлений в газовой смеси. Именно значения констант равновесия определяют фракционный состав смеси при текущих значениях температур реакции.

Процессы горения являются сложными в силу протекания как экзотермических, так и эндотермических реакций одновременно в зонах горения. Полезным эффектом процессов горения является повышение температуры вещества. Чем выше степень подогрева продуктов реакций (их называют продуктами сгорания – ПС), тем эффективнее показатели горючего и окислителя. Для газовоздушных и поршневых двигателей принято говорить о теплотворной способности топлива, имея в виду количество теплоты, получающееся при

сгорании определенной массы или объема горючего.

Термодинамика химических реакций подробно изучена, количественно описаны энергетические потребности при образовании химических соединений. Вводят понятие теплового эффекта химической реакции – количество тепловой энергии, потребное для осуществления химического превращения при условии, что реагенты и продукты реакции будут иметь одинаковые температуры. Учитывая, что наиболее часто мы рассматриваем химические процессы при постоянном давлении, наиболее удобным термодинамическим потенциалом оказываются или энтальпия, или свободная энтальпия. Созданы справочные таблицы стандартных величин теплоты образования химических соединений. Они даются для каких-то стандартных условий по давлению и температуре веществ (например, давлении $p = 101325$ Па и температуре - 0, 293 или 298К). Это исключает дополнительные данные о фазовом состоянии продуктов реакции. Исходные вещества (химические элементы) имеют нулевые значения энтальпии, а продукты реакции (сложные соединения) имеют энтальпии их образования со знаком минус или плюс. Знак минус означает, что при образовании этих соединений потребовалось от продуктов реакции в окружающую среду отвести указанное количество теплоты. Данная реакция образования соединения является экзотермической. Знак плюс говорит, что при образовании соединения потребовался подвод теплоты со стороны окружающей среды, то есть имела место эндотермическая реакция.

Желательно, чтобы топлива при преобразованиях обеспечивали максимальное выделение тепловой энергии:

$$H = (\sum J_i)_m - (\sum J_i)_{nc},$$

где $(\sum J_i)_m$ и $(\sum J_i)_{nc}$ – сумма стандартных энтальпий компонентов топлива и продуктов сгорания.

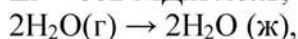
Химическая термодинамика позволяет производить тепловые расчеты, если известен состав веществ, его называют элементарным составом: A_a, B_b, C_c , где A, B, C – химические элементы топлива и a, b, c, – количество атомов этих элементов. Количество теплоты пропорционально массе исходных веществ. Проще всего химические реакции

описываются с применением мольных количеств веществ (запись самих формул химических реакций определяет количество молей элементов, потребных для совершения реакции) или парциальных давлений (если реакции происходят в газообразной фазе и именно парциальные давления определяют константы скорости реакции или их равновесного состояния). На практике же удобно приводить результаты расчетов к массовым или объемным долям веществ, оценивая количество вещества в килограммах или *нормальных* кубометрах. Слово *нормальных* говорит о назначении каких-то единых значений давлений и температур (в разных странах эти значения различны).

Например, для реакции сгорания метана

$$\text{CH}_4(\text{г}) + 2\text{O}_2(\text{г}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{г}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{г})$$

$$\Delta I = -802 \text{ МДж/моль,}$$



$$\Delta I = -88 \text{ МДж/моль.}$$

Сумма $\Delta I_{\text{сумм}} = -890 \text{ МДж/моль.}$

Процесс сгорания моля метана (16 кг) в воздухе без превращения паров воды в жидкость выделяет 802 МДж, а с учетом конденсации паров воды суммарно обеспечивает выделение 890 МДж. Именно это значение помещают в справочниках как теплоту реакции. Здесь применен закон Гесса, который утверждает аддитивность тепловых энергий отдельных реакций. Значение $\Delta I = 802 \text{ МДж/моль}$ или $50,125 \text{ МДж/кг}$ называют нижней теплотворной способностью метана, а величину $\Delta I = 890 \text{ МДж/моль}$ или $55,625 \text{ МДж/кг}$ называют высшей теплотворной способностью метана.

Кроме теплотворной способности важной характеристикой топлива является потребное количество окислителя для полного сгорания одного кг или одного нормального кубометра горючего. Тепловые двигатели в качестве окислителя используют кислород атмосферного воздуха. При стехиометрическом составе смеси происходит полное исчерпание кислорода воздуха и максимальное выделение тепловой энергии. Для углеводородных топлив стехиометрический состав обеспечивает превращение водорода в воду, а углерода в двуокись. Вот такое минимальное количество окислителя, обеспечивающее полное сгорание килограмма или нормального кубометра топлива называют теоретически необходимым количеством окислителя.

Смесь заданной единицы массы или объема топлива с теоретически необходимым количеством воздуха называют стехиометрической смесью топлива с воздухом. А отношение фактически имеющегося в процессе горения количества окислителя (воздуха) к теоретически необходимому называют коэффициентом избытка окислителя (воздуха). Для стехиометрической смеси коэффициент избытка окислителя (воздуха) равен 1. В отечественной литературе теоретически необходимое количество воздуха принято обозначать L_0 , а коэффициент избытка воздуха обозначают символом α . В общем смысле стехиометрический состав горючего и окислителя означает исчерпание возможностей образования соединений или горючего или окислителя.

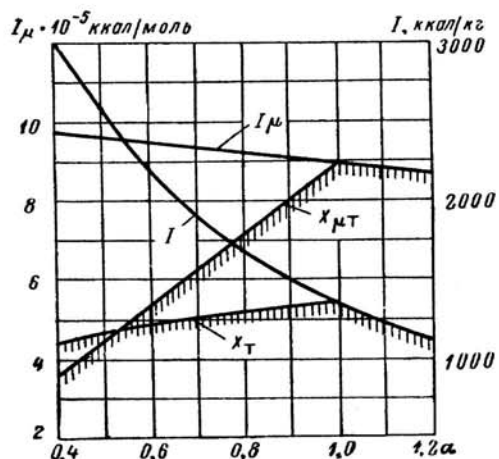


Рис. 1. Изменение полной энтальпии горения пары керосин + 95% HNO_3 в зависимости от коэффициента избытка окислителя: I_{μ} — полная энтальпия 1 моля топлива; I — энтальпия 1 кг топлива; $X_{\mu T}$ — молекулярная химическая энергия; X_T — массовая химическая энергия

Представление о количественных показателях тепловой энергии горения топлива приводится в [5] для пары керосин + 95% HNO_3 . С увеличением α энтальпия топлива уменьшается, а химическая энергия растет и при значении $\alpha=1$ образуется их максимум. Химическая энергия реакций при $\alpha>1$ не меняется, т.к. исчерпан потенциал горючего.

Данный рисунок приведен как иллюстрация того факта, что максимальное выделение теплоты соответствует стехиометрической смеси топливо-горючее.

При рассмотрении балансов энергии в стехиометрической смеси полагают полное использование валентностей элементов.

Приведем сведения об основных химических элементах топлив авиационных, ракетных и энергетических установок.

Топлива, приведенные табл. 1, относят к классу углеводородов и присваивают им обозначение C_nH_m . Здесь n и m - условные доли углерода и водорода в топливе.

Если топливо по массе содержит 85% C и 15% H_2 , то его формула рассчитывается $n = g_C \cdot 100 / \mu_C = 0,85 \cdot 100 / 12 = 11,082$, $m = g_H \cdot 100 / \mu_H = 0,15 \cdot 100 / 1 = 15$, т.е. условная формула этого углеводородного топлива $C_{11,082}H_{15}$.

Таблица 1. Авиационные топлива

Марка топлива	T	T-1	ТС-1	T-2	T-6	T-7	МРТУ38-1
Условная формула	$CH_{1,96}$	$C_{7,2}H_{13,3}$	$C_{1,02}H_{1,99}$	$C_{1,1}H_{2,15}$	$C_{6,8}H_{13,3}$	CH_2	$C_{1,2}H_{2,34}$
Содержание серы и влаги	-	0,05	0,05	0,05	-	0,01	-
% C по массе	85,96	86,23	85,585	85,57	85,99	85,63	86,02
% H по массе	14,04	13,27	13,915	13,93	14,01	14,36	13,98
L_0 , кг/кг	14,72	14,56	14,709	14,715	14,709	14,79	14,704
H_u , МДж/кг	43	43	43,130	43,130	43,130	43,130	43,130

В качестве топлив в [3] (табл. 2) приведены химические элементы (и для сравнения керосин T-1). Введен параметр удельной теплопроизводительности H_u , МДж/кг – это

тепловыделение на 1 кг стехиометрической смеси топлива с воздухом, определяющее максимальную температуру продуктов сгорания: $H_u / (1 + L_0)$.

Таблица 2. Перспективные топлива ракетных и авиационных двигателей

Свойства	Горючие элементы							
	H_2	Li	Be	B	C	Mg	Al	T-1
Атомная масса	1,016	6,94	9,01	10,81	12,01	24,3	26,98	-
Плотность, кг/дм ³	0,07	0,476	1,84	2,3	2,25	1,74	1,74	0,8
Массовая удельная теплота сгорания H_u , МДж/кг	120	42,98	62,8	58,82	32,79	24,81	30,98	42,91
Объемная удельная теплота сгорания H_v , МДж/м ³	8,51	21,7	115,5	135,3	73,77	43,16	83,65	34,33
Уд. теплопроизв. H_u , МДж/кг	3,40	7,175	7,218	5,549	2,623	6,444	6,388	2,699
Стехиомет. коэффициент L_0	34,2	4,99	7,7	9,6	11,5	2,85	3,85	14,9

Несколько особняком стоят так называемые доменные газы (табл. 3). Они получаются как результат сгорания кокса или древесного угля при выплавке чугуна в домнах. Их особенность заключается в недостатке свободного кислорода при горении, что приводит к неполному сгоранию углерода с образованием не двуокиси CO_2 , а окиси CO углерода. Горючим веществом в этих газах является именно окись углерода, которая при наличии дополнительного кислорода

превращается в двуокись углерода с выделением тепла. Естественно, теплотворная способность доменных газов значительно ниже таковой для приведенных в табл. 4 природных газов.

Важной характеристикой ПС является стехиометрическая температура, достигаемая при полном сгорании топлива. Выделяемое количество теплоты химических реакций расходуется на нагрев продуктов сгорания и процессы диссоциации веществ.

Таблица 3. Состав доменного газа (объемные %)

Печь	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂	Hu, МДж/м ³
Коксовая	9,0 – 14,0	31 – 25,0	0,3 – 0,5	2 – 3,0	57 – 58,0	3,559 – 3,978
Древесноугольная	10 -15,0	29 - 23	1,2 – 1,7	5,5 -7,5	50 - 54	4,186 – 4,605

Таблица 4. Состав природных газов (объемные %)

Производитель												Hu, МДж/м ³
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	H ₂ S	CO	H ₂	H ₂ O	
Башнефтьгаз	50,0	22,0	9,8	1,2	0,4	16,6	–	–	–	–	–	43,043
Куйбышевнефть	58,0	17,2	7,4	2,0	0,5	13,6	0,8	0,5	–	–	–	41,742
Коксовый завод	25,5	2,3	–	–	–	3,0	2,9	–	6,5	59,8	–	16,956
Иgrim-Серов	95,7	1,9	0,5	0,3	0,1	1,3	–	–	–	0,2	–	34,467
Первомайск-Сторожевка	62,4	3,6	2,6	0,9	0,2	30,0	0,1	–	–	–	–	36,676
Бухара-Урал	94,9	3,2	0,4	0,1	0,1	0,9	0,4	–	–	–	–	36,718

За более подробной информацией рекомендую обращаться в [6] или [4].

Решение задачи в общей постановке определяется текущим химическим составом и балансом энергий реакций. Как показал автор [5], для простейшего случая сгорания углеводородного топлива, содержащего С, Н и О, следует рассматривать образование CO₂, H₂O, CO, H₂, O₂, OH, O, H. Рассмотрение должно включать уравнения:

- баланса теплоты;
- баланса массового состава;
- баланса парциальных давлений;
- химического равновесия при определяемой температуре.

При сгорании в воздухе количество уравнений увеличивается.

Решение можно достигнуть прямым аналитическим способом, методом последовательных приближений, кинетическим методом, методом ступенчатого нахождения равновесия, интерполированием по расчетным таблицам, по номограммам и энтропийным I-S диаграммам. Оценку величины температуры с достаточной в инженерной практике точностью можно произвести интерполированием по таблицам термодинамических свойств образования продуктов.

Максимальное тепловыделение от сгорания горючего имеет место при стехиометрическом составе смеси. Конечный состав продуктов сгорания включает не восемь (и

более) составляющих, а только воду и двуокись углерода, а при наличии серы ее трехокись.

Теплота сгорания (кДж/кг) с конкретным массовым составом горючего определяется или опытным путем, или по эмпирической формуле Д.И. Менделеева :

$$Q=339C+1256H-109(O-S)-25(9H+W), \quad (1)$$

где С,Н, S, O,W – процентное содержание углерода, водорода, серы, кислорода и влажности соответственно.

Теоретически необходимое количество кислорода (кг/кг) для полного сгорания 1 кг горючего равно

$$O_0=0,01(8/3C+8H-O), \quad (2)$$

а теоретически необходимое количество воздуха определяется дополнительно массовым процентным содержанием в нем кислорода (например, для высоты 0 км в стандартной атмосфере кислорода 23,2% по массе):

$$L_0=O_0/0,232=(8/3C+8H-O)/0,232= \\ =11,49C+4,48H-4,31O. \quad (3)$$

В формулу (3) надо подставлять не проценты, а доли веществ в топливе; так, для топлива Т-1 – 0,8623 для С и 0,1377 для Н.

Состав продуктов сгорания (в массовых долях) довольно просто и строго определяется для случая стехиометрического сгорания:

$$g_{CO_2} = \frac{11C/3}{11C/3 + 9H + 0,768L_0}, \quad (4)$$

$$g_{H_2O} = \frac{9H}{11C/3 + 9H + 0,768L_0}, \quad (5)$$

$$g_{N_2} = \frac{0,768L_0}{11C/3 + 9H + 0,768L_0}. \quad (6)$$

Транспортировщики газа применяют в расчетах объемные доли смеси.

При расчете циклов двигателей интерес представляет знание величин процентного состава продуктов сгорания, температур и термодинамических параметров – газовой постоянной, теплоемкостей и показателя адиабаты. В общем случае, как это отмечено выше, необходимо решать систему уравнений с замыканием отмеченных различных балансов. Задача существенно упрощается, если решать ее для стехиометрического состава смеси и иметь в виду, что продуктами сгорания будут вода, двуокись углерода, а азот не образует соединений с кислородом. Тогда теплотворная способность горючего, потребные количества кислорода/воздуха определяются по приведенным выше простым зависимостям.

Учитывая, что ПС при стехиометрическом составе углеводородного топлива и воздуха дадут только три вещества – H₂O, CO₂ и азот N₂ - для любого топлива с использованием таблиц типа приложения III [6] методом последовательных приближений можно легко найти адиабатную температуру ПС любого топлива.

Автор [7] предлагает рассматривать три вида температур горения топлив: калориметрическая, теоретическая и расчетная. Максимальную температуру ПС без учета процессов диссоциации в ходе горения автор называет калориметрической $t_{кал}$. Температуру, определяемую с учетом диссоциации, $t_{расч}$, а максимальную температуру, подсчитываемую с использованием теоретического состава топлива, формулы Д.И. Менделеева и известных теплоемкостей ПС, называют теоретической $t_{теор}(t_{макс})$. Ранее по предложению Д.И. Менделеева эту температуру называли жаропроизводительностью ($t_{теор} = t_{расч} = t_{макс}$ при $\alpha=1$ и начальных температурах $t_{г}=t_{в}=0^{\circ}C$).

Температура $T_{макс}$ (рис. 3) в отличие от данных на рис. 2, реализуется без ограничения содержания кислорода в воздухе, напри-

мер при сжигании углеводородов в печах с кислородным дутьем или в водородно - кислородных ЖРД.

Калориметрическая температура продуктов сгорания в воздухе для применяемых в транспортных и энергетических установках топлив приведена в табл. 5.

Таблица 5. Калориметрические температуры продуктов сгорания в воздухе для газообразного и жидкого топлива

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

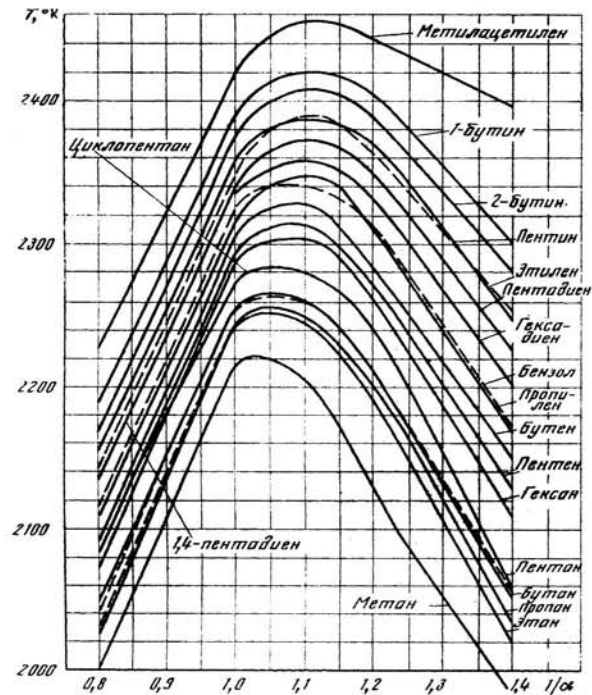


Рис. 2. Зависимость калориметрической и расчетной температуры сгорания в воздухе углеводородов от коэффициента избытка воздуха

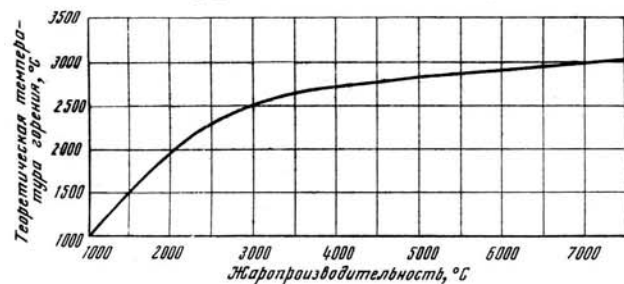


Рис. 3. Зависимость температуры горения углеводородов в воздухе с учетом и без учета диссоциации веществ

Из рис. 2 можно видеть, что очень сильное влияние на уровень температур ПС оказывают процессы диссоциации компонентов горючего. Этот же факт отражен и на рис. 3.

Хочется отметить, что температура смеси продуктов сгорания зависит от наличия кислорода в окислителе. Так, для 1 кг керосина при сгорании в воздухе массовое количество продуктов сгорания ($1+L_0$) составляет 15,5... 15,8 кг, при использовании перекиси водорода - 8,5 кг, азотной кислоты - 6,3 кг, жидкого кислорода - 4,5 кг. Количество химической теплоты окисления горючего неизменно и при уменьшении массы продуктов сгорания обеспечивается их большой нагрев.

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. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справочник в 4 т. [Текст] / В.П. Глушко [и др.] - М.: Наука, 1978 -1982.
3. Термодинамические свойства продуктов сгорания: справочник в 10 т. [Текст] / В.П. Глушко [и др.] - М.: ВИНТИ АН СССР, 1971 - 1979.
4. Иванов, Ю.В. Основы расчета и проектирования газовых горелок [Текст] / Ю.В. Иванов.- М.: Гостопиздат, 1963. - 360 с.
5. Квасников, А.В. Теория жидкостных ракетных двигателей [Текст] / А.В. Квасников.- Л.: Судпромгиз, 1959. - 542 с
6. Линчевский, В.П. Топливо и его сжигание [Текст] / В.П. Линчевский, под ред. М.Б. Равича и О.А. Цухановой. - М.: Металлургиздат, 1959.
7. Равич, М.Б. Топливо и эффективность его использования [Текст] / М.Б. Равич. - М.: Наука, 1971. - 358.

ENERGY SOURCES IN HEAT ENGINE CYCLES

© 2011 E. L. Mikheyenkov

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

Thermal energy is, by definition, the source of useful energy (work) in a heat engine. The source of thermal energy is a heat-producing chemical reaction between the substances comprising the working mass of a heat engine, or between additional substances introduced. Heat-producing chemical reaction is called combustion reaction. A combustion reaction involves two types of substances: fuels and oxidants. The products of combustion reaction comprise the working mass of the thermodynamic cycle on its expansion stage, yielding useful energy (work). Energetic characteristics of combustion product generation processes are available for engineering and scientific purposes. There is a system of equations developed in chemical thermodynamics that determine the resulting products and energetic parameters of a reaction. To calculate heat engine cycles, it is necessary to obtain the characteristics of combustion products (thermodynamic properties – heat capacity, specific gas constant) and the maximum temperature levels of reaction products. The article provides an overview of approaches to determine the thermodynamic properties of combustion products and lists the values of these parameters for the most widespread fuels when combusted in air.

Working mass, heat energy, fuel, oxidant, combustion reactions, combustion products, thermodynamic properties of combustion products.

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.