

УДК 621.435

**МЕТОД ПРИВЕДЁННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВА
И ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛОВ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ МАШИН**© 2013 В. В. Анастасеев², С. В. Белозерцев¹, Е. Л. Михеенков¹, С. О. Некрасова¹¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)²ОАО «Кузнецов», г. Самара

Традиционно в процессах термодинамических и тепловых расчётов применяют массовые (кг или моли) или объёмные доли веществ и продуктов горения или других химических реакций. В процессе расчётов выявляются значительные различия свойств рассматриваемых веществ по теплотворности, потребным количествам воздуха для полного сгорания топлива. Затруднена возможность обобщённого рассмотрения свойств продуктов сгорания различных веществ как рабочих тел цикла и теплоносителей в теплообменных аппаратах. В то же время в паротурбостроении широко внедрены расчёты горения, проектирования газогенераторов с использованием понятия приведённых характеристик горючего. Проведён анализ возможности применения возможностей этих понятий для расчёта циклов тепловых машин.

Тепловые двигатели, энергетические установки, цикл работы, свойства топлива, максимальные температуры цикла, продукты сгорания, метод приведённых характеристик топлива.

Для нужд паротурбостроения, расчёта температур в металлургии разработана в середине XX века методика использования приведённых характеристик веществ, участвующих в процессах горения [1]. Она базируется на следующих положениях:

- расчётные величины относят не к массе, а к теплоте сгорания топлив. Это приводит к неожиданному факту – приведённые параметры теплотехнических расчётов становятся практически не зависимыми от составов топлив;

- используется правило Вельтера-Бертье, линейно связывающее физические свойства рабочих процессов (расходы и скорости воздуха и продуктов сгорания) с химическими свойствами реакции – количествами тепла от сгорания горючего и свойствами веществ – энтальпией, количественными характеристиками теплообмена, температурами и др. В результате упрощаются расчёты и выявляется простая линейная связь различных величин процессов;

- различия в горючей массе учитываются системой обобщённых констант, полученных по анализам состава топлива и обобщённым энергетическим показате-

лям теплот сгорания веществ. Для твёрдых топлив имеется возможность учёта наличия влаги и балластных составляющих – относительной влажности, наличия серы и зольности топлив, для природных и попутных газов – наличия повышенного содержания азота.

Основополагающим фактором стала выдвинутая Вельтером гипотеза, гласящая, что количество кислорода, которое расходуется при полном сгорании сухого топлива, прямо пропорционально количеству выделенного тепла. В результате появилась гипотеза, которая получила название правила Вельтера-Бертье. Математически правило записывается в современных научных терминах:

$$V_{\text{г}}^0 = a \cdot \frac{H_u}{1000}, \quad (1)$$

где $V_{\text{г}}^0$ – теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания топлива ($\text{м}^3/\text{кг}$); 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 4,1868 связи кДж и ккал.

В металлургии и при расчётах парогенераторов, для нужд которых и был создан метод приведённых характеристик, основным параметром является приведённая влажность топлива

$$W^{\text{II}} = \frac{W^{\text{P}}}{H_u} \cdot 4,19 \cdot 10^3, \text{ккал} \cdot 4,19 \cdot 10^3 / \text{кДж}, \quad (2)$$

где H_u – низшая теплотворная способность горючего, кДж/кг; W^{P} – относительная влажность горючего, %.

В качестве характеристик приняты относительная влажность горючего W^{P} и её приведённая величина W^{II} , 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 ($\alpha=1$).

Таблица 1. Теплотехнические характеристики энергетических топлив

Топливо	Характеристики, отнесённые к единице массы топлива				Приведённые характеристики		
	W^{P} , %	H_u , ккал/кг	V^0 , м ³ /кг	V_2^0 , м ³ /кг	W^{II} , %	$V_6^{n,0}$	$V_2^{n,0}$
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. 1 показывает различия характеристик энергетических топлив в физических и приведённых единицах.

Как можно видеть из табл. 1, при использовании в качестве единиц теплоты ккал приведённые характеристики имеют первый порядок. При переходе к системе СИ единица теплоты кДж/кг возрастает в 4,1868 раза. Теплота, к которой относят приведённые характеристики, возрастает в 4,19 раза, а сами показатели величин становятся меньше единицы. Для получения целых величин при введении системы СИ приходится вводить множитель 4,19 перед величиной теплоты, как это видно из сопоставления

зависимостей 1 и 2. Таким образом, значения приведённых величин становятся одинаковыми и в системе МКСС, и в СИ. Мы приносим извинения, так как не нашли нормативный источник с современными единицами измерения.

Удобство использования в качестве основной характеристики топлива приведённой влажности горючего объясняется строгим нормированием этого показателя для твёрдых топлив.

Знание состава продуктов сгорания и температуры смеси, кроме термодинамики циклов тепловых машин, необходимо для расчёта лучистого теплообмена и точки росы.

Таблица 2. Усреднённые значения констант для определения продуктов сгорания и величины $RO_2^{макс}$

Топливо	a	Δ	$x, \%$	$RO_2^{макс}, \%$
Донецкие антрациты	1,11	0,013	19,9	20,1
Донецкие полуантрациты	1,11	0,018	19,0	19,4
Донецкие тощие угли	1,11	0,036	18,5	19,0
Недонецкие тощие угли	1,10	0,038	18,7	19,1
Каменные угли и их отходы	1,10	0,050	18,2	18,7
Бурые угли при $V_a \leq 45\%$ при $V_a > 45\%$	1,09	0,055	19,4	129,7
	1,10	0,075	18,6	19,0
Мазут и нефть стабилизированная	1,10	0,065	15,0	16,0
Газ природный	1,11	0,12	10,6	11,8
Газ попутный	1,10	0,12	11,6	12,6
Газ доменных печей на коксе с добавкой природного газа	0,86	0,92	51,3	25,6
Газ коксовых печей	1,06	0,17	9,1	10,2

Таблица 3. Константы a и b для подсчёта объёмов воздуха и продуктов сгорания газообразных топлив по химическому составу топлива и по обобщённым параметрам

Топливо; газопровод	$CH_4, \%$	$H_u, \text{ккал/кг}$	$a = V_g^{n,0}$			$b = V_z^{n,0}$		
			по со- ставу топлива	обоб- щённые	отли- чия, %	по со- ставу топлива	обоб- щённые	отли- чия, %
1. Природный газ								
Саратов - Москва	84,5	8550	1,113	1,11	-0,3	1,255	1,25	-0,4
Первомайск - Сторо- жевка	62,4	6760	1,110	1,11	0	1,286	1,288	+0,2
Саратов - Горький	91,9	8630	1,110	1,11	0	1,246	1,25	+0,3
Серпухов-Ленинград	89,7	9010	1,110	1,11	0	1,245	1,25	+0,4
Гоголево-Полтава	85,8	7420	1,110	1,11	0	1,265	1,25	-1,2
Дашава-Киев	98,9	8570	1,110	1,11	0	1,245	1,25	+0,4
Рудки-Вильнюс	95,6	8480	1,113	1,11	-0,3	1,253	1,25	-0,2
Брянск-Москва	92,8	8910	1,110	1,11	0	1,247	1,25	+0,2
Газли-Коган	95,4	8740	1,112	1,11	-0,2	1,260	1,25	-0,8
Ставрополь-Грозный	98,29	9510	1,112	1,11	-0,2	1,250	1,25	0
2. Попутные газы								
Каменный Лог-Пермь	38,7	10120	1,100	1,10	0	1,243	1,24	-0,2
Кулишовка - Куйбы- шев	58,0	9970	1,103	1,10	-0,3	1,242	1,24	-0,2
Безенчук-Чапаевск	42,7	11220	1,110	1,10	-0,9	1,247	1,24	-0,6
Туркменнефть	93,9	9100	1,110	1,10	-0,9	1,243	1,24	-0,2
Туймазы-Уфа	50,0	10280	1,097	1,10	+0,3	1,235	1,24	+0,4
3. Промышленные газы								
Доменный на кок- се+природ	0,3	903	0,854	0,88	-0,5	1,803	1,8	-0,2
Доменный коксовый	25,6	4050	1,062	1,06	-0,2	1,247	1,25	+0,2

Объём водяных паров при $a > 1$ и отсутствии химической неполноты сгорания

$$V_{H_2O}^{n,0} = \left(\Delta + \frac{(21-x) \cdot a}{100} + 0,016 \cdot a \cdot a \right) \times \frac{H_u + 0,0124 \cdot W^n}{4,19 \cdot 1000} + 0,0124 \cdot W_p, \quad (7)$$

где Δ – индивидуальный коэффициент горючего из [1] (табл. 2, 3); коэффициент x записывается как

$$x = \frac{V_{RO_2}^n}{V_6^{n,0}} \cdot 100 = \frac{V_{RO_2}}{V_6^0} \cdot 100, \% \quad (8)$$

Объём сухих продуктов сгорания при $a > 1$ и отсутствии химической неполноты сгорания

$$V_{ce}^n = \left(a - \frac{21-x}{100} \right) \cdot V_6^{n,0} = \left(a - \frac{21-x}{100} \right) \cdot a \cdot (1 + 0,006 \cdot W_p). \quad (9)$$

Наблюдается хорошее совпадение результатов расчёта по составу газа и по обобщённым характеристикам при

определении теоретического потребного количества воздуха и объёма продуктов сгорания при $a = 1$. Важнейшими при расчёте термодинамики циклов работы тепловых машин параметрами результата сгорания горючего являются температура и состав продуктов сгорания – газовая постоянная $R_{гс}$, показатель адиабаты и энтропия, используемая для расчёта связи температур и давлений в процессах сжатия и расширения.

По утверждению Я.Л. Пеккера [1], приведённый метод характеристик топлива позволяет получать универсальную зависимость для определения калориметрической температуры горения групп топлив. Так, для природных газов получена единая графическая зависимость температур горения с учётом коэффициента избытка воздуха и начальной температуры горения. График этой зависимости изображён на рис.1. Данная графическая зависимость очень удобна для использования в расчётах процессов горения природных газов. Варьировать можно коэффициенты избытка воздуха и начальную температуру горения. Но сомнение вызывает единое значение калориметрической температуры горения для всех газов.

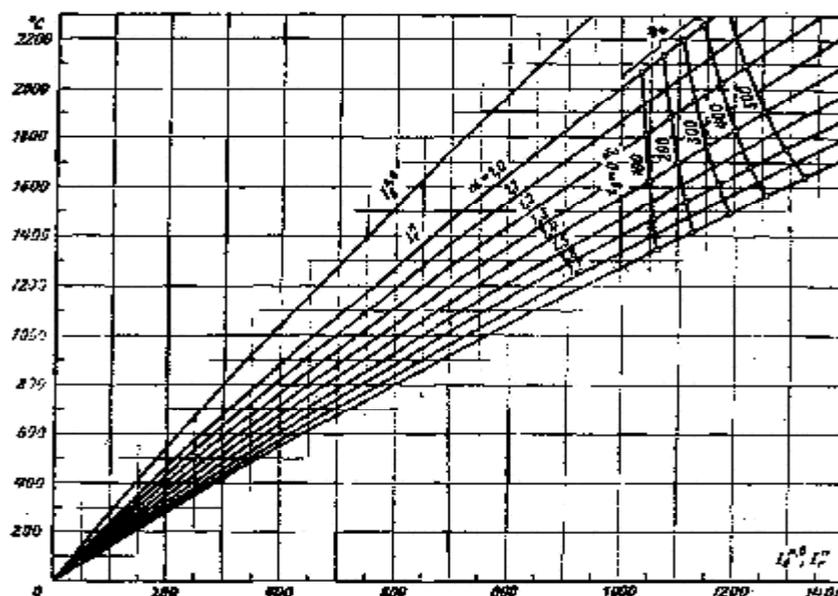


Рис. 1. Зависимость температуры горения природных газов от приведённой энтальпии воздуха и газов

Авторов заинтересовал метод обобщённых характеристик горючего в связи с тем, что конвертированные авиационные двигатели применяются в качестве приводов нагнетателей в газоперекачивающих аппаратах, привода электростанций, насосов закачки газов в промежуточные резервные хранилища газа и т.п. Состав транспортируемого (и технологического для работы двигателя) газа существенно различен в зависимости от места добычи. Мы полагаем, что метод приведённых характеристик горючего позволит получить единую расчётную термодинамическую модель цикла Брайтона работы тепловых машин для произвольных горючих.

Действительно, при отнесении удельной работы цикла Брайтона к нижней теплотворной способности горючего эта относительная величина для всех топлив оказывается практически единой.

Как утверждается в [1], в приведённых единицах легко пересчитываются характеристики парогенераторов для различных горючих. Этот фактор упрощает термодинамический анализ сложных систем тепловых двигателей (например, схем парогазовых или газопаровых двигателей).

Так, при условии равенства тепловосприятий и потерь тепла подведённому с топливом количеству теплоты H_u баланс энергий запишется в виде

$$\Sigma Q_i^n = (1 - 0,01q_1) + (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \times 10 = 1000, \quad (10)$$

где: q_1 – КПД котла, %; q_2 – потери тепла с уходящими газами; q_3 – потери тепла от химической неполноты сгорания; q_4 – потери тепла от механического недожога; q_5 – потери тепла от наружного охлаждения; q_6 – потери тепла со шлаком.

Если, например, величина $I^n = 200$, а величина $Q_i^n = 150$, то это означает, что

энтальпия составляет 20 %, а тепловосприятие – 15 % теплоты сгорания топлива H_u . Если же, например, в тепловом расчёте топки (при отсутствии потерь от горения) величина $I_a^n = 1180$, то это означает, что адиабатическая энтальпия представляет собой сумму $I_a^n = 1000 + I_{возд}^n$, причём тепло воздуха, вносимое в топку, составляет 18 % от тепла H_u . Т.е. для данной серии (типа) парогенератора все приведённые тепловосприятия мало или совсем не зависят от сорта и теплоты сгорания топлива.

Необходимо отметить сложности расчёта калориметрической температуры горения.

Жидкое нефтяное топливо, природные, нефтезаводские и сжиженные газы состоят в основном из углеводородов и $t_{кал}$ разных углеводородов также должны близко совпадать друг с другом. Правда, здесь имеет место неравенство теплот разрыва связей внутри молекул у различных углеводородов. Если расщепление молекул углеводородов является эндотермической реакцией, как это имеет место у алканов и, например, у метана, то $t_{кал}$ ниже, чем у углерода и водорода. Если же расщепление молекул является экзотермическим процессом, что характерно для непредельных углеводородов (например, у этилена и, особо, у ацетилена), то $t_{кал}$ этих углеводородов выше, чем у углерода и водорода.

По известным источникам [2] температура горения углеводородов существенно различна, что иллюстрирует табл. 4.

Разброс калориметрических температур горения углеводородов составляет от 2043⁰С у метана до 2620⁰С у этина (ацетилена).

Не представляется бесспорным положение авторов модели приведённых характеристик горючего о составе продуктов сгорания.

Таблица 4. Максимальные температуры при сгорании углеводородов в воздухе

Вещество	$t_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$
Алканы $C_n H_{2n+2}$			
Метан (CH ₄)	2043	Пентин (C ₅ H ₈)	2300
Этан (C ₂ H ₆)	2097	Гексин (C ₆ H ₁₀)	2275
Пропан (C ₃ H ₈)	2110	Гептин (C ₇ H ₁₂)	2250
Бутан (C ₄ H ₁₀)	2118	Октин (C ₈ H ₁₄)..	2235
Пентан (C ₅ H ₁₂)	2119	Децин (C ₁₀ H ₁₈)	2213
Гексан (C ₆ H ₁₄)	2124	Пентадецин (C ₁₅ H ₂₈)	2180
Октан (C ₈ H ₁₈)	2128	Эйкозин (C ₂₀ H ₃₈)	2167
Декан (C ₁₀ H ₂₂)	2129	Пентадекан (C ₁₅ H ₃₂)	2132
Эйкозан (C ₂₀ H ₄₂)	2132		
Ароматические углеводороды $C_n H_{2n-6}$			
Бензол (C ₆ H ₆)	2258	Цимол (C ₁₀ H ₁₄)	2186
Толуол (C ₇ H ₈)	2211	Фенилнонан (C ₁₅ H ₂₄)	2171
Ксилол (C ₈ H ₁₀)	2206	Фенилтетрадекан (C ₂₀ H ₃₄)	2160
Пропилбензол (C ₉ H ₁₂)	2197		
Алкены $C_n H_{2n}$			
Этен (C ₂ H ₄)	2284	Децен (C ₁₀ H ₂₀)	2164
Пропен (C ₃ H ₆)	2234	Пентадецен (C ₁₅ H ₃₀)	2153
Бутен (C ₄ H ₈)	2203	Эйкозен (C ₂₀ H ₄₀)	2151
Пентен (C ₅ H ₁₀)	2189		
Алкины $C_n H_{2n-2}$			
Этин (C ₂ H ₂)	2620	Бутин (C ₄ H ₆)	2340
Пропин (C ₃ H ₄)	2420		
Цикланы $C_n H_{2n}$			
Циклопентан (C ₅ H ₁₀)	2153	Пропилциклопентан (C ₈ H ₁₆)	2144
Метилциклопентан (C ₆ H ₁₂)	2149	Амилциклопентан (C ₁₀ H ₂₀)	2144
Этилциклопентан (C ₇ H ₁₄)	2145	Циклопентилдекан (C ₁₅ H ₃₀)	2140

В табл. 5 приведены данные по наиболее используемым природным горючим газам – химические формулы, молекулярные массы, потребные количества воздуха для стехиометрического сгорания, теплотворная способность и составляющие продуктов сгорания, их газовые постоянные и калориметрические температуры сгорания газов в атмосфере.

Табл. 5 позволяет понять соотношения потребных объемов атмосферного воздуха для стехиометрического сгорания

количества горючего. Традиционно принято для рассмотрения сгорания газов применять объёмные доли смесей. Можно просто получить соотношения горючего и продуктов сгорания в смеси, если состав углеводородов рассматривать в виде $C_n H_m$. Потребные объёмы воздуха для стехиометрической смеси понятны из нижней строки в таблице. Здесь принято, что содержание кислорода в атмосфере равно 21%, а азота 78,96%.

Таблица 5. Теплофизические характеристики продуктов сгорания природных газов

Газ	Формула	m	Газ. пост.	$r_{T=298K}$	H_u , МДж/м ³	H_u , кДж/моль
Бутан	C ₄ H ₁₀	58.123	143.05	2.3769072	112.4	2657.3
Бутилен	C ₄ H ₈	56.108	148.187	2.294505	107	2533
Водород	H ₂	2.0159	4124.46	0.0824391	10.223	241.81
Метан	CH ₄	16.043	518.263	0.6560694	33.948	802.6
Окись углерода	CO	28.01	296.84	1.1454531	11.96	282.98
Пропан	C ₃ H ₈	44.097	188.55	1.8033219	86.42	2043.1
Пропилен	C ₃ H ₆	42.081	197.583	1.7208787	81.46	1925.97
Этан	C ₂ H ₆	30.07	276.505	1.2296957	60.43	1428.6
Этилен	C ₂ H ₄	28.054	296.375	1.1472525	55.96	1323.1
Ацителен	C ₂ H ₂	26.038	319.322	1.0648093	53.16	1257.03

Таблица 5. Теплофизические характеристики продуктов сгорания природных газов (Продолжение)

Потр. кол-во воздуха			Объемы продуктов сгорания, м ³ /м ³				$R_{ПС}$	$t_{кал}$	
Газ	V_0 , м ³ /м ³	n+m/4	CO ₂	H ₂ O	N ₂	всего	$m_{ПС}$	Дж/кгК	°С
Бутан	30.95238	6.5	4	5	24.44	33.44	28.4318	292.4372	2127
Бутилен	28.57143	6	4	4	22.56	30.56	28.7983..	288.7983	2148
Водород	2.380952	0.5	0	1	1.88	2.88	24.5417	388.7912	2258
Метан	9.52381	2	1	2	7.52	10.52	27.633	300.89	2067
Окись углерода	2.38	1	1	0	1.38	2.38	34.7342	239.3747	2739
Пропан	23.80952	5	3	4	18.8	25.8	28.3232	293.5581	2033
Пропилен	21.42857	4.5	3	3	16.92	22.92	28.7983	288.7145	2233
Этан	16.66667	3.5	2	3	13.16	18.16	28.1233	295.6448	2109
Этилен	14.28571	3	2	2	11.28	15.28	28.7983	288.7145	2307
Ацителен	11.90476	2.5	2	1	9.4	12.4	29.787	279.1319	2637
$V_0 \rightarrow (n + m / 4)(100 / 21)$			n	m/2	0.7896V ₀	V V ₀ =m/4			

Выводы

1. Метод приведенных характеристик горючих, широко применяемый в металлургии и парогенераторостроении, представляет интерес и в термодинамическом анализе простых и сложных циклов Брайтона тепловых двигателей.

2. Необходимо уточнить область применимости метода приведенных характеристик горючего для анализа термодинамики цикла Брайтона.

3. Необходимо определиться с алгоритмом расчёта как энергетики горения, так и термодинамических показателей продуктов сгорания для их встраивания в термодинамический расчёт цикла Брайтона.

4. Актуальность введения приведенных характеристик горючего в термодинамические расчёты объясняется широ-

ким внедрением в качестве приводов газотурбинных двигателей, причем в паспорте (формуляре) двигателя приводятся мощностные характеристики, снятые на стендах с использованием какого-то имеющегося в наличии природного горючего газа или даже керосина, что требует создания алгоритма пересчёта показателей работы двигателя при наличии в качестве технологического топлива горючих газов произвольного состава.

Библиографический список

1. Пеккер, Я. Л. Теплотехнические расчеты по приведенным характеристикам топлива [Текст] / Я. Л. Пеккер. – М.: Энергия, 1977. – 256 с.
2. Равич, М. Б. Топливо и эффективность его использования [Текст] / М.Б. Равич. – М.: Наука, 1971. – 358 с.

METHOD OF REDUCED FUEL CHARACTERISTICS AND PARAMETERS OF THE OPERATING CYCLES OF HEAT ENGINES

© 2013 V. V. Anastaseev², S. V. Belozertsev¹, E. L. Mikheenkov¹, S. O. Nekrasova¹

¹Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

²«Kuznetsov» plc.

Traditionally mass (kg or moles) or volume fractions of substances and products of combustion or other chemical reactions are used in the processes of thermodynamical and thermal calculations. The process of calculation reveals significant differences in properties of the substances in question according to their calorific value and the amount of air required for complete combustion of the fuel. It is difficult to make a generalized analysis of the properties of products of combustion of various substances as working media of the cycle and heat transfer agents in heat exchangers. At the same time the calculation of combustion and design of gas generators using the idea of fuel reduced characteristics are widely used in steam turbine manufacturing. The feasibility of using these possibilities to calculate the cycles of heat engines is analyzed.

Heat engines, power plants, operating cycle, fuel properties, maximum temperature of the cycle, combustion products, method of reduced characteristics of fuel.

Информация об авторах

Анастасеев Валентин Валентинович, инженер, ОАО «Кузнецов». Область научных интересов: процессы горения в тепловых двигателях.

Белозерцев Сергей Викторович, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: belozertsev@mail.ru. Область научных интересов: расчет термодинамических циклов тепловых машин.

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. 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. Область научных интересов: тепловые двигатели, циклы тепловых машин.

Anastaseev Valentin Valentinovich, engineer, «Kuznetsov» plc. Area of research: processes of combustion in heat engines.

Belozertsev Sergey Viktorovich, fifth-year student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: belozertsev@mail.ru. Area of research: calculation of thermodynamic cycles of heat engines.

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. Area of research: thermodynamics of 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. Area of research: heat engines, cycles of heat engines.