

УДК 626.13

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ СРЕДНИХ МОЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗОВ, СОДЕРЖАЩИХСЯ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ДВС, ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛИНОМАМИ ПЕРВОЙ СТЕПЕНИ

А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ, А.И. Гарбовицкий, доцент, к.т.н., В.В. Крутских, ст. преподаватель, А.П. Зюбан, ст. преподаватель, «Московский государственный открытый университет им. В.С.Черномырдина» Губкинский институт (филиал), Губкин, Россия

***Аннотация.** Приводятся линейные аппроксимирующие зависимости средних молярных теплоемкостей при постоянном объеме газов, содержащихся в продуктах сгорания ДВС, от температуры t , °С, рассчитанных для диапазонов температур конца рабочих процессов ДВС. Использование этих результатов позволяет повысить точность определения расчетных параметров рабочих процессов.*

***Ключевые слова:** теплоемкость, аппроксимация, двигатели внутреннего сгорания, газы, программа MathCAD.*

ПОДАВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ СЕРЕДНІХ МОЛЬНИХ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ГАЗІВ, ЯКІ МІСТЯТЬСЯ У ПРОДУКТАХ ЗГОРЯННЯ ДВЗ, ВІД ТЕМПЕРАТУРИ ПОЛІНОМАМИ ПЕРШОГО СТУПЕНЯ

О.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ, А.І. Гарбовицький, доцент, к.т.н., В.В. Крутських, ст. викладач, А.П. Зюбан, ст. викладач, «Московський державний відкритий університет ім. В.С. Черномірдіна» Губкінський інститут (філія), Губкін, Росія

***Анотація.** Приводяться лінійні апроксимуючі залежності середніх молярних теплоємностей за постійного об'єму газів, що містяться у продуктах згорання ДВЗ, від температури t , °С, розрахованих для діапазонів температур кінця робочих процесів ДВЗ. Використання цих результатів дозволяє підвищити точність визначення розрахункових параметрів робочих процесів.*

***Ключові слова:** теплоємність, апроксимація, двигуни внутрішнього згорання, газу, програма MathCAD.*

AVERAGE MOLAR HEAT CAPACITY DEPENDENCE NOTION OF GASES CONTAINED IN ICE COMBUSTION PRODUCTS ON TEMPERATURE BY POLYNOMIALS OF THE FIRST DEGREE

A. Bazhinov, Professor, Doctor of Technical Sciences, KhNAHU, A. Garbovitskiy, senior lecturer, Candidate of Technical Sciences, V. Krutskikh, senior instructor, A. Ziuban, senior instructor, «V.C. Chernomyrdin Moscow state open university» Gubkinskiy institute (branch), Gubkin, Russia

***Abstract.** Linear approximating dependences of average molar heat capacities at constant volume of gases contained in ICE combustion products on temperature t °C, computer-calculated for to increase temperature range of ICE operating final processes are given. Application of these results allows determination accuracy of design parameters of operating processes.*

***Key words:** heat capacity, approximation, internal-combustion engines, gases, MathCAD programme.*

Введение

Для расчета рабочих процессов двигателя внутреннего сгорания необходимо знание средних мольных теплоемкостей при постоянном объеме и постоянном давлении рабочего тела. Величина теплоемкости зависит от температуры и давления газа, его физических свойств и характера процесса. При этом в диапазоне давлений рабочего тела автомобильных и тракторных двигателей влиянием давления рабочего тела на средние мольные теплоемкости пренебрегают.

Цель и постановка задачи

Объектом исследования является представление зависимостей средних мольных теплоемкостей воздуха и газов, содержащихся в продуктах сгорания ДВС, от температуры аналитическими выражениями, составленными посредством аппроксимации соответствующих табличных зависимостей от температуры полиномами первой степени.

Работа предназначена для автоматизации расчета рабочих процессов ДВС на базе алгоритмов, предложенных для расчета параметров рабочих процессов в диапазонах конечных температур, соответствующих рассматриваемому процессу. Расчет выполняется с использованием программы MathCAD. Цель работы – использование результатов расчета для автоматизации проектирования двигателей внутреннего сгорания и сопоставления их индикаторных параметров.

Представление зависимостей средних мольных теплоемкостей газов, содержащихся в продуктах сгорания ДВС, от температуры полиномами первой степени

Аппроксимация табличных значений средних мольных теплоемкостей при постоянном объеме газов, содержащихся в продуктах сгорания ДВС, позволяет выразить эти значения аналитическими зависимостями от температуры для диапазонов температур t_1 , °С, t_2 , °С конца рабочих процессов, протекающих в двигателях внутреннего сгорания, и выразить для этих процессов среднюю мольную теплоемкость каждого газа линейной зависимостью от температуры

$$(mc_{V_k})'_{t_0} = a_k + b_k \cdot (t - t_1) \quad (1)$$

где k – наименование (индекс) газа;

$a_k = (mc_{V_k})'_{t_0}$ – средняя мольная теплоемкость газа k , соответствующая минимальной температуре t_1 , °С конца рабочего процесса

$$b_k = \frac{(mc_{V_k})'_{t_2} - (mc_{V_k})'_{t_1}}{t_2 - t_1}, \quad (2)$$

где $(mc_{V_k})'_{t_2}$ – средняя мольная теплоемкость газа k , соответствующая максимальной температуре t_2 , °С конца рабочего процесса.

Для аппроксимации температур конца рабочих процессов использованы величины средних мольных теплоемкостей газов, входящих в состав рабочего тела ДВС, для температуры t , °С, от 0 °С до 2800 °С с шагом 100 °С, которые приведены в [1, 2].

Минимальная t_1 , °С и максимальная t_2 , °С температуры концов рабочих процессов, протекающих в двигателях внутреннего сгорания, представлены в табл. 1.

Таблица 1 Минимальная t_1 , °С и максимальная t_2 , °С температуры концов рабочих процессов ДВС

Наименование рабочего процесса	Бензиновый ДВС		Дизельный ДВС	
	t_1 , °С	t_2 , °С	t_1 , °С	t_2 , °С
1. Впуск, t_a	0	200	0	200
2. Сжатие, t_c	300	600	400	700
3. Сгорание, t_z	2300	2800	1600	2100
4. Расширение, b	1000	1500	700	1000
5. Выпуск, t_r	600	900	400	700

Средние мольные теплоемкости при постоянном объеме, кДж/(кмоль·град), воздуха и других газов, составляющих продукты сгорания ДВС, для диапазонов температур конца соответствующих рабочих процессов предлагается представлять следующими линейными зависимостями, полученными аппроксимацией с помощью программы MathCAD.

Численные значения коэффициентов a_k и b_k , определенные из (1) и (2) для рассматриваемых

диапазонов температур конца рабочих процессов ДВС, представлены в табл. 2 и 3.

$$\begin{aligned}
 &\text{Для воздуха} & (mc_V)_{t_0}^t &= a + b \cdot (t - t_1); \\
 &\text{для кислорода, } O_2 & (mc_{VO_2})_{t_0}^t &= a_{O_2} + b_{O_2} \cdot (t - t_1); \\
 &\text{для азота } N_2 & (mc_{VN_2})_{t_0}^t &= a_{N_2} + b_{N_2} \cdot (t - t_1); \\
 &\text{для водорода, } H_2 & (mc_{VH_2})_{t_0}^t &= a_{H_2} + b_{H_2} \cdot (t - t_1); \\
 &\text{для окиси углерода, } CO & (mc_{VCO})_{t_0}^t &= a_{CO} + b_{CO} \cdot (t - t_1); \\
 &\text{для углекислого газа, } CO_2 & (mc_{VCO_2})_{t_0}^t &= a_{CO_2} + b_{CO_2} \cdot (t - t_1); \\
 &\text{для водяного пара, } H_2O & (mc_{VH_2O})_{t_0}^t &= a_{H_2O} + b_{H_2O} \cdot (t - t_1).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Таблица 2 Численные значения коэффициентов a_k и b_k в диапазонах температур конца рабочих процессов, протекающих в бензиновых двигателях

Рабочий процесс		Наименование газа	a_k		b_k	
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$		Обозначение	Численное значение	Обозначение	Численное значение
1	2	3	4	5	6	7
Впуск						
0	200	Воздух	a	20,759	b	$1,13 \cdot 10^{-3}$
		Кислород O_2	a_{O_2}	20,96	b_{O_2}	$3,285 \cdot 10^{-3}$
		Азот N_2	a_{N_2}	20,705	b_{N_2}	$4.8 \cdot 10^{-4}$
		Водород H_2	a_{H_2}	20,303	b_{H_2}	$2,28 \cdot 10^{-3}$
		Окись углерода CO	a_{CO}	20,809	b_{CO}	$9 \cdot 10^{-4}$
		Углекислый газ CO_2	a_{CO_2}	27,546	b_{CO_2}	$2,1 \cdot 10^{-3}$
		Водяной пар H_2O	a_{H_2O}	25,185	b_{H_2O}	$3,095 \cdot 10^{-3}$
Сжатие						
300	600	Воздух	a	21,207	b	$2,947 \cdot 10^{-3}$
		Кислород O_2	a_{O_2}	22,086	b_{O_2}	$4,537 \cdot 10^{-3}$
		Азот N_2	a_{N_2}	20,973	b_{N_2}	$2,527 \cdot 10^{-3}$

Окончание табл. 2

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
		Водород Н ₂	a_{H_2}	20,809	b_{H_2}	$6,43 \cdot 10^{-4}$
		Окись углерода СО	a_{CO}	21,203	b_{CO}	$3,03 \cdot 10^{-3}$
		Углекислый газ СО ₂	a_{CO_2}	33,442	b_{CO_2}	$1,3 \cdot 10^{-2}$
		Водяной пар Н ₂ О	a_{H_2O}	26,261	b_{H_2O}	$5,4 \cdot 10^{-3}$
Сгорание						
2300	2800	Воздух	a	25,746	b	$1,248 \cdot 10^{-3}$
		Кислород О ₂	a_{O_2}	27,32	b_{O_2}	$1,4 \cdot 10^{-3}$
		Азот N ₂	a_{N_2}	25,327	b_{N_2}	$1,116 \cdot 10^{-3}$
		Водород Н ₂	a_{H_2}	23,744	b_{H_2}	$1,612 \cdot 10^{-3}$
		Окись углерода СО	a_{CO}	25,792	b_{CO}	$1,016 \cdot 10^{-3}$
		Углекислый газ СО ₂	a_{CO_2}	46,832	b_{CO_2}	$2,116 \cdot 10^{-3}$
		Водяной пар Н ₂ О	a_{H_2O}	36,942	b_{H_2O}	$3,526 \cdot 10^{-3}$
Расширение						
1000	1500	Воздух	a	23,284	b	$2,352 \cdot 10^{-3}$
		Кислород О ₂	a_{O_2}	24,804	b_{O_2}	$2,328 \cdot 10^{-3}$
		Азот N ₂	a_{N_2}	22,882	b_{N_2}	$2,354 \cdot 10^{-3}$
		Водород Н ₂	a_{H_2}	21,475	b_{H_2}	$1,716 \cdot 10^{-3}$
		Окись углерода СО	a_{CO}	23,351	b_{CO}	$2,386 \cdot 10^{-3}$
		Углекислый газ СО ₂	a_{CO_2}	41,079	b_{CO_2}	$6,165 \cdot 10^{-3}$
		Водяной пар Н ₂ О	a_{H_2O}	30,306	b_{H_2O}	$5,812 \cdot 10^{-3}$
Выпуск						
600	900	Воздух	a	22,091	b	$3,057 \cdot 10^{-3}$
		Кислород О ₂	a_{O_2}	23,447	b_{O_2}	$3,547 \cdot 10^{-3}$
		Азот N ₂	a_{N_2}	21,731	b_{N_2}	$2,93 \cdot 10^{-3}$
		Водород Н ₂	a_{H_2}	21,002	b_{H_2}	$1,103 \cdot 10^{-3}$
		Окись углерода СО	a_{CO}	22,112	b_{CO}	$3,167 \cdot 10^{-3}$
		Углекислый газ СО ₂	a_{CO_2}	37,44	b_{CO_2}	$9,547 \cdot 10^{-3}$
		Водяной пар Н ₂ О	a_{H_2O}	27,881	b_{H_2O}	$6,043 \cdot 10^{-3}$

Таблица 3 Численные значения коэффициентов a_k и b_k в диапазонах температур конца рабочих процессов, протекающих в дизельных двигателях

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	Наименование газа	a_k		b_k	
			Обозначение	Численное значение	Обозначение	Численное значение
1	2	3	4	5	6	7
Впуск						
0	200	Воздух	a	20,759	b	$1,13 \cdot 10^{-3}$
		Кислород O2	a_{O_2}	20,96	b_{O_2}	$3,285 \cdot 10^{-3}$
		Азот N2	a_{N_2}	20,705	b_{N_2}	$4,8 \cdot 10^{-4}$
		Углекислый газ CO2	a_{CO_2}	27,546	b_{CO_2}	$2,1 \cdot 10^{-2}$
		Водяной пар H2O	a_{H_2O}	25,185	b_{H_2O}	$3,095 \cdot 10^{-3}$
Сжатие						
400	700	Воздух	a	21,475	b	$3,113 \cdot 10^{-3}$
		Кислород O2	a_{O_2}	22,564	b_{O_2}	$4,243 \cdot 10^{-3}$
		Азот N2	a_{N_2}	21,186	b_{N_2}	$2,807 \cdot 10^{-3}$
		Углекислый газ CO2	a_{CO_2}	34,936	b_{CO_2}	$1,2 \cdot 10^{-2}$
		Водяной пар H2O	a_{H_2O}	26,776	b_{H_2O}	$5,667 \cdot 10^{-3}$
Сгорание						
1600	2100	Воздух	a	24,653	b	$1,642 \cdot 10^{-3}$
		Кислород O2	a_{O_2}	26,16	b_{O_2}	$1,71 \cdot 10^{-3}$
		Азот N2	a_{N_2}	24,251	b_{N_2}	$1,624 \cdot 10^{-3}$
		Углекислый газ CO2	a_{CO_2}	44,487	b_{CO_2}	$3,592 \cdot 10^{-3}$
		Водяной пар H2O	a_{H_2O}	33,743	b_{H_2O}	$4,756 \cdot 10^{-3}$
Расширение						
700	1000	Воздух	a	22,409	b	$2,917 \cdot 10^{-3}$
		Кислород O2	a_{O_2}	23,837	b_{O_2}	$3,223 \cdot 10^{-3}$
		Азот N2	a_{N_2}	22,028	b_{N_2}	$2,847 \cdot 10^{-3}$
		Углекислый газ CO2	a_{CO_2}	38,499	b_{CO_2}	$8,6 \cdot 10^{-3}$
		Водяной пар H2O	a_{H_2O}	28,476	b_{H_2O}	$6,1 \cdot 10^{-3}$
Выпуск						
400	700	Воздух	a	21,475	b	$3,113 \cdot 10^{-3}$
		Кислород O2	a_{O_2}	22,564	b_{O_2}	$4,243 \cdot 10^{-3}$
		Азот N2	a_{N_2}	21,186	b_{N_2}	$2,807 \cdot 10^{-3}$
		Углекислый газ CO2	a_{CO_2}	34,936	b_{CO_2}	$1,2 \cdot 10^{-2}$
		Водяной пар H2O	a_{H_2O}	26,776	b_{H_2O}	$5,667 \cdot 10^{-3}$

При расчете теплоемкостей при постоянном объеме перечисленных газов, содержащихся в продуктах сгорания ДВС, для диапазонов конечных температур (t_1 , °C, t_2 , °C) каждого процесса с использованием зависимостей (1) и (2) и табл. 3 и 4 с шагом $\Delta t = 100$ °C отклонение $\delta\%$ расчетных значений теплоемкости $(mc_{vk})_{t_0}^{t_1}$ от табличных $(mc_{vk}^*)_{t_0}^t$ не превышает 0,4 %, где

$$\delta = \frac{\left| (mc_{vk}^*)_{t_0}^t - (mc_{vk})_{t_0}^t \right|}{(mc_{vk}^*)_{t_0}^t} \cdot 100\% \quad (4)$$

Отметим, что погрешность при определении средних мольных теплоемкостей газов для диапазонов температур 0 °C – 1500 °C и 1501 °C – 2800 °C [1] составляет до 1,8 %.

Выводы

Относительная погрешность при аппроксимации табличных значений средних мольных теплоемкостей [1] в диапазонах конечных температур незначительна. Поэтому аппроксимация табличных значений $(mc_{vk})_{t_0}^t$ ли-

нейными зависимостями от температуры в диапазонах конечных температур (t_1 , °C, t_2 , °C) рабочих процессов ДВС обеспечивает достаточно точное совпадение расчетных значений средней мольной теплоемкости при постоянном объеме перечисленных газов с табличными.

Литература

1. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 2003. – 220 с.
2. Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания в 3 кн. Кн.1. Теория рабочих процессов: учебное пособие для вузов / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян и др. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2005. – 300 с.

Рецензент: Ф.И. Амбрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 31 января 2012 г.