

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ****Золотарев Олег Владимирович**

канд. техн. наук, доцент

**Крутских Валентина Васильевна**

старший преподаватель

Губкинский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Московский  
государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

г. Губкин, Белгородская область

**УТОЧНЕНИЕ СРЕДНИХ МОЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ПРОДУКТОВ  
СГОРАНИЯ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИКИ ТЕПЛОВОГО  
РАСЧЕТА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

*Аннотация:* статья посвящена расчету рабочих процессов двигателя внутреннего сгорания, для осуществления которого обычно пользуются средними мольными теплоемкостями при постоянном объеме и при постоянном давлении. Величина теплоемкости зависит от температуры и давления газа, его физических свойств и характера процесса. Для определения средних мольных теплоемкостей различных газов в зависимости от температуры используют эмпирические формулы, либо справочные таблицы или графики. Для диапазонов конечных температур рабочих процессов представлены аналитические формулы, определяющие зависимость теплоемкости при постоянном объеме для продуктов сгорания топлива в ДВС. Разработка этих алгоритмов позволяет автоматизировать тепловой расчет ДВС с высокой степенью точности и возможностью сравнения результатов при варьировании исходными данными в широких пределах.

*Ключевые слова:* рабочие процессы ДВС, средняя мольная теплоемкость, эмпирические формулы.

*Введение.* В [1] представлены значения средних мольных теплоемкостей газов, входящих в состав рабочего тела ДВС для температуры от  $t^{\circ}=0^{\circ}\text{C}$  до

$t^{\circ}=2800^{\circ}\text{C}$  с шагом  $100^{\circ}\text{C}$ , и эмпирические формулы для интервалов температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $1500^{\circ}\text{C}$  и от  $1501^{\circ}\text{C}$  до  $2800^{\circ}\text{C}$ . При этом отклонение значений средних мольных теплоемкостей, полученных по этим формулам, от табличных значений не превышает 1.8%. Современные информационные технологии позволяют получить эмпирические формулы для определения средних мольных теплоемкостей при постоянном объеме продуктов сгорания ДВС от температуры, дающие относительную погрешность вычислений не более 0,2%.

*Методология.* Эмпирические формулы для определения средних мольных теплоемкостей продуктов сгорания ДВС от температуры и коэффициента избытка воздуха получены с помощью компьютерной программы Mathcad.

*Основная часть.* Средняя теплоемкость рабочего тела определяется как отношение количества теплоты, сообщаемой телу в заданном процессе к изменению температуры. Для расчета рабочих процессов двигателя внутреннего сгорания обычно пользуются средними мольными теплоемкостями при постоянном объеме  $m_{cv}$  и при постоянном давлении  $m_{cp}$ . Величина теплоемкости зависит от температуры и давления газа, его физических свойств и характера процесса. Для определения средних мольных теплоемкостей различных газов в зависимости от температуры используют эмпирические формулы, либо справочные таблицы или графики.

Для аппроксимации использованы величины средних мольных теплоемкостей газов, входящих в состав рабочего тела ДВС для температуры, которые приведены в таблице 1, [1].

С помощью программы Mathcad была проведена аппроксимация зависимостей средних мольных теплоемкостей газов, входящих в состав рабочего тела ДВС, в виде многочленов до четвертой степени. Анализ показал, что наименьшие отклонения эмпирических средних мольных теплоемкостей от табличных, возникают в том случае, если эти зависимости имеют линейных вид для диапазона температур, характерных для каждого рабочего цикла ДВС.

Температура рабочего тела в конце рабочих процессов для бензиновых ДВС лежит в пределах [1]:

в конце процесса впуска –  $0^{\circ}\text{C} < t_a^{\circ} < 200^{\circ}\text{C}$ ;

в конце процесса сжатия –  $300^{\circ}\text{C} < t_c^{\circ} < 600^{\circ}\text{C}$ ;

в конце процесса сгорания –  $2100^{\circ}\text{C} < t_z^{\circ} < 2800^{\circ}\text{C}$ ;

в конце процесса расширения –  $1000^{\circ}\text{C} < t_b^{\circ} < 1500^{\circ}\text{C}$ ;

в конце процесса выпуска –  $600^{\circ}\text{C} < t_r^{\circ} < 900^{\circ}\text{C}$ .

Температура рабочего тела в конце рабочих процессов для дизельных ДВС лежит в пределах [1]:

в конце процесса впуска –  $0^{\circ}\text{C} < t^{\circ} < 200^{\circ}\text{C}$ ;

в конце процесса сжатия –  $400^{\circ}\text{C} < t^{\circ} < 700^{\circ}\text{C}$ ;

в конце процесса сгорания –  $1500^{\circ}\text{C} < t^{\circ} < 2100^{\circ}\text{C}$ ;

в конце процесса расширения –  $700^{\circ}\text{C} < t^{\circ} < 1000^{\circ}\text{C}$ ;

в конце процесса выпуска –  $300^{\circ}\text{C} < t^{\circ} < 700^{\circ}\text{C}$ .

В [1] представлены формулы для определения средних молярных теплоемкостей отдельных газов при постоянном объеме для интервалов температур  $0^{\circ}\text{C}$  до  $1500^{\circ}\text{C}$  и от  $1501^{\circ}\text{C}$  до  $2800^{\circ}\text{C}$ . В таблицах 1 и 3 представлены аналитические зависимости для определения средних молярных теплоемкостей  $mC_v(t)$  газов при постоянном объеме для характерных диапазонов температур в конце соответствующего рабочего процесса бензиновых и дизельных ДВС.

Таблица 1

Аналитические зависимости средних молярных теплоемкостей  
продуктов сгорания бензиновых двигателей

Рабочий цикл ДВС бензиновый	$t^{\circ}\text{C}$	Наименование газа	Формула для определения средних молярных теплоемкостей газов при постоянном объеме, кДж/(кмольград)
Впуск	$0-200^{\circ}\text{C}$	Воздух	$mc_{v(t)} = 1.13 \cdot 10^{-3}t + 20.755$
		Кислород $\text{O}_2$	$mc_{v\text{O}_2}(t) = 3.24 \cdot 10^{-3}t + 20.96$
		Азот $\text{N}_2$	$mc_{v\text{N}_2}(t) = 2.9 \cdot 10^{-4}t + 20.705$
		Водород $\text{H}_2$	$mc_{v\text{H}_2}(t) = 3.18 \cdot 10^{-3}t + 20.303$
		Окись углерода $\text{CO}$	$mc_{v\text{CO}}(t) = 9.055 \cdot 10^{-2}t + 20.809$

		Углекислый газ CO <sub>2</sub>	$mc_{VCO_2}(t)=2.253 \cdot 10^{-2}t+27.546$
		Водяной пар H <sub>2</sub> O	$mc_{VH_2O}(t)=2.42 \cdot 10^{-3}t+25.186$
Сжатие	300°C–600°C	Воздух	$mc_V(t)=2.947 \cdot 10^{-3}t+20.323$
		Кислород O <sub>2</sub>	$mc_{VO_2}(t)=4.537 \cdot 10^{-3}t+20.725$
		Азот N <sub>2</sub>	$mc_{VN_2}(t)=2.527 \cdot 10^{-3}t+20.215$
		Водород H <sub>2</sub>	$mc_{VH_2}(t)=6.43 \cdot 10^{-4}t+20.616$
		Окись углерода CO	$mc_{VCO}(t)=3.03 \cdot 10^{-3}t+20.294$
		Углекислый газ CO <sub>2</sub>	$mc_{VCO_2}(t)=1.33 \cdot 10^{-2}t+29.452$
		Водяной пар H <sub>2</sub> O	$mc_{VH_2O}(t)=5.4 \cdot 10^{-3}t+24.641$
Сгорание	2100°C–2800°C	Воздух	$mc_V(t)=1.28 \cdot 10^{-3}t+22.786$
		Кислород O <sub>2</sub>	$mc_{VO_2}(t)=1.436 \cdot 10^{-3}t+24.001$
		Азот N <sub>2</sub>	$mc_{VN_2}(t)=1.131 \cdot 10^{-3}t+22.688$
		Водород H <sub>2</sub>	$mc_{VH_2}(t)=1.667 \cdot 10^{-3}t+17.832$
		Окись углерода CO	$mc_{VCO}(t)=1.091 \cdot 10^{-3}t+23.246$
		Углекислый газ CO <sub>2</sub>	$mc_{VCO_2}(t)=2.296 \cdot 10^{-3}t+40.067$
		Водяной пар H <sub>2</sub> O	$mc_{VH_2O}(t)=3.691 \cdot 10^{-3}t+28.367$
Расширение	1000°C–1500°C	Воздух	$mc_V(t)=2.42 \cdot 10^{-3}t+20.83$
		Кислород O <sub>2</sub>	$mc_{VO_2}(t)=2.428 \cdot 10^{-3}t+22.326$
		Азот N <sub>2</sub>	$mc_{VN_2}(t)=2.415 \cdot 10^{-3}t+20.437$
		Водород H <sub>2</sub>	$mc_{VH_2}(t)=1.67 \cdot 10^{-3}t+19.831$
		Окись углерода CO	$mc_{VCO}(t)=2.57 \cdot 10^{-3}t+20.689$
		Углекислый газ CO <sub>2</sub>	$mc_{VCO_2}(t)=6.235 \cdot 10^{-3}t+34.693$
		Водяной пар H <sub>2</sub> O	$mc_{VH_2O}(t)=5.861 \cdot 10^{-3}t+24.419$
Выпуск	600°C–900°C	Воздух	$mc_V(t)=3.057 \cdot 10^{-3}t+20.257$
		Кислород O <sub>2</sub>	$mc_{VO_2}(t)=3.547 \cdot 10^{-3}t+21.319$
		Азот N <sub>2</sub>	$mc_{VN_2}(t)=2.93 \cdot 10^{-3}t+19.973$
		Водород H <sub>2</sub>	$mc_{VH_2}(t)=1.103 \cdot 10^{-3}t+20.340$
		Окись углерода CO	$mc_{VCO}(t)=2.967 \cdot 10^{-3}t+18.552$
		Углекислый газ CO <sub>2</sub>	$mc_{VCO_2}(t)=9.547 \cdot 10^{-3}t+31.712$
		Водяной пар H <sub>2</sub> O	$mc_{VH_2O}(t)=6.043 \cdot 10^{-3}t+24.255$

В таблице 2 в качестве примера показана относительная погрешность, возникающей при расчете средней мольной теплоемкости кислорода для процесса сжатия в бензиновом ДВС по эмпирической формуле

$$mc_{VO_2}(t)=3.547 \cdot 10^{-3}t+21.319 \quad (1)$$

Таблица 2

Табличные, эмпирические значения средней мольной теплоемкости  
кислорода для процесса сжатия в бензиновом ДВС  
и относительные погрешности вычислений

Температура, t °С	Табличные значения, кДж/(кмоль·град)	Эмпирические значения, кДж/(кмоль·град)	Относительная погрешность, %
300	22.086	22.086	0
400	22.540	22.564	0.159
500	22.994	23.020	0.156
600	23.447	23.447	0

Таблица 3

Аналитические зависимости средних мольных теплоемкостей  
продуктов сгорания дизельных двигателей

Рабочий цикл ДВС дизельный	t °С	Наименование газа	Формула для определения средних мольных теплоемкостей газов при постоянном объеме, кДж/(кмольград)
Впуск	0°–200°С	Воздух	$mc_V(t) = 1.13 \cdot 10^{-3}t + 20.759$
		Кислород O <sub>2</sub>	$mc_{VO_2}(t) = 3.285 \cdot 10^{-3}t + 20.96$
		Азот N <sub>2</sub>	$mc_{VN_2}(t) = 4.8 \cdot 10^{-4}t + 20.801$
		Водород H <sub>2</sub>	$mc_{VH_2}(t) = 3.18 \cdot 10^{-3}t + 20.303$
		Окись углерода CO	$mc_{VCO}(t) = 0.9 \cdot 10^{-3}t + 20.809$
		Углекислый газ CO <sub>2</sub>	$mc_{VCO_2}(t) = 2.1 \cdot 10^{-2}t + 27.546$
		Водяной пар H <sub>2</sub> O	$mc_{VH_2O}(t) = 3.095 \cdot 10^{-3}t + 25.185$
Сжатие	400°С–700°С	Воздух	$mc_V(t) = 2.947 \cdot 10^{-3}t + 20.296$
		Кислород O <sub>2</sub>	$mc_{VO_2}(t) = 4.243 \cdot 10^{-3}t + 20.857$
		Азот N <sub>2</sub>	$mc_{VN_2}(t) = 2.807 \cdot 10^{-3}t + 20.063$
		Водород H <sub>2</sub>	$mc_{VH_2}(t) = 6.43 \cdot 10^{-4}t + 20.615$
		Окись углерода CO	$mc_{VCO}(t) = 3.196 \cdot 10^{-3}t + 20.197$
		Углекислый газ CO <sub>2</sub>	$mc_{VCO_2}(t) = 1.19 \cdot 10^{-2}t + 30.176$
		Водяной пар H <sub>2</sub> O	$mc_{VH_2O}(t) = 5.67 \cdot 10^{-3}t + 32.668$
Сгорание	1500°С–2100°С	Воздух	$mc_V(t) = 1.69 \cdot 10^{-3}t + 21.925$
		Кислород O <sub>2</sub>	$mc_{VO_2}(t) = 1.745 \cdot 10^{-3}t + 23.578$
		Азот N <sub>2</sub>	$mc_{VN_2}(t) = 1.673 \cdot 10^{-3}t + 21.550$
		Водород H <sub>2</sub>	$mc_{VH_2}(t) = 1.629 \cdot 10^{-3}t + 19.890$
		Окись углерода CO	$mc_{VCO}(t) = 1.655 \cdot 10^{-3}t + 22.062$
		Углекислый газ CO <sub>2</sub>	$mc_{VCO_2}(t) = 3.747 \cdot 10^{-3}t + 38.415$
		Водяной пар H <sub>2</sub> O	$mc_{VH_2O}(t) = 4.85 \cdot 10^{-3}t + 25.936$

Расширение	700°C–1000°C	Воздух	$mc_V(t)=2.917 \cdot 10^{-3}t+20.367$
		Кислород O <sub>2</sub>	$mc_{VO_2}(t)=3.223 \cdot 10^{-3}t+21.581$
		Азот N <sub>2</sub>	$mc_{VN_2}(t)=2.847 \cdot 10^{-3}t+20.0235$
		Водород H <sub>2</sub>	$mc_{VH_2}(t)=1.1 \cdot 10^{-3}t+20.324$
		Окись углерода CO	$mc_{VCO}(t)=3.043 \cdot 10^{-3}t+20.308$
		Углекислый газ CO <sub>2</sub>	$mc_{VCO_2}(t)=8.6 \cdot 10^{-3}t+32.479$
		Водяной пар H <sub>2</sub> O	$mc_{VH_2O}(t)=6.1 \cdot 10^{-3}t+24.206$
Выпуск	300°C–700°C	Воздух	$mc_V(t)=3.096 \cdot 10^{-3}t+21.278$
		Кислород O <sub>2</sub>	$mc_{VO_2}(t)=4.378 \cdot 10^{-3}t+20.773$
		Азот N <sub>2</sub>	$mc_{VN_2}(t)=2.638 \cdot 10^{-3}t+20.182$
		Водород H <sub>2</sub>	$mc_{VH_2}(t)=1.103 \cdot 10^{-3}t+20.478$
		Окись углерода CO	$mc_{VCO}(t)=3.088 \cdot 10^{-3}t+20.277$
		Углекислый газ CO <sub>2</sub>	$mc_{VCO_2}(t)=1.264 \cdot 10^{-2}t+31.157$
		Водяной пар H <sub>2</sub> O	$mc_{VH_2O}(t)=5.538 \cdot 10^{-3}t+25.115$

*Выводы.* В ходе проведения исследований было установлено, что аппроксимация средних молярных теплоемкостей при постоянном объеме [кДж/кМоль град] воздуха и других газов, составляющих продукты сгорания ДВС полиномами высших степеней, не увеличивает точность вычислений. Поэтому целесообразно средние молярные теплоемкости для диапазонов температур конца соответствующих рабочих процессов, представлять линейными зависимостями. При этом относительные погрешности расчета ниже относительных погрешностей расчета значений средних молярных теплоемкостей при постоянном объеме, вычисленных с использованием их зависимостей от температуры, представленных в [1] для диапазонов температур  $0^\circ\text{C} < t^\circ < 1500^\circ\text{C}$  и  $1500^\circ\text{C} < t^\circ < 2800^\circ\text{C}$ .

### *Список литературы*

1. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. – М.: Высшая школа, 2008. – 495 с.
2. Кирьянов Д. Mathcad 14. – СПб: БХВ-Петербург, 2007.
3. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М: Высшая школа, 2002.

4. Золотарев О.В. Выявление основных показателей дизельного топлива для наилучшей работы двигателей внутреннего сгорания [Текст] / О.В. Золотарев, В.В. Крутских // Новое слово в науке: перспективы развития: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 05 марта 2015 г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – С. 124–127. – ISBN 978-5-906626-64-6.

5. Золотарев О.В. Показатели, влияющие на работоспособность деталей ДВС [Текст] / О.В. Золотарев, Д.Т. Михай // Научные исследования: от теории к практике: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 12 февр. 2015 г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – С. 183–185. – ISBN 978-5-906626-61-5.