



## ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ПОЖАРА В ЗАКРЫТОМ ПОМЕЩЕНИИ

Д.А. Пыленок, аспирант  
dimon39.94@mail.ru

В.А. Наумов, д-р техн. наук, профессор  
van-old@mail.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

По экспериментальным данным для продуктов горения рассчитаны многочлены аппроксимации зависимости теплоёмкости при постоянном объеме от температуры. Если не учитывать влияние температуры при пожаре в закрытом помещении, погрешность расчёта будет от 30 до 75 %.

*пожар в закрытом помещении, математическое моделирование, газообразные продукты горения, теплоёмкость*

Современные научные методы прогнозирования опасных факторов пожара базируются на результатах экспериментальных исследований и математического моделирования. В теоретических исследованиях наиболее часто используется интегральная модель динамики пожара, предложенная профессором Ю.А. Кошмаровым, подробно описанная в [1]. Указанная модель опирается на фундаментальные законы природы: первый закон термодинамики, закон сохранения массы, закон сохранения количества движения. Эти уравнения описывают всю совокупность взаимосвязанных процессов, присущих пожару: тепловыделение при горении, выделение и распространение газообразных продуктов горения, тепло- и массообмен с окружающей средой.

Характерной особенностью интегральной модели пожара является использование для описания газовой среды параметров термодинамической системы, осредненных по всему объёму помещения. При моделировании пожара в закрытом помещении полагают, что объём газовой смеси не изменяется. Тогда первый закон термодинамики для смеси газов в помещении будет иметь вид (1):

$$\frac{dU}{dt} = \sum Q_i, \quad (1)$$

где  $U$  – среднеобъемная внутренняя энергия смеси газов, Дж/м<sup>3</sup>;  
 $t$  – время, с;  
 $Q_i$  – внешние тепловые потоки, отнесенные к объёму смеси, Дж/(с·м<sup>3</sup>).

Среднеобъемная внутренняя энергия газовой смеси в (1) может быть рассчитана по известной формуле (2):

$$U = \rho C_V T, \quad (2)$$

где  $\rho$  – средняя плотность смеси газов в помещении, кг/м<sup>3</sup>;  
 $T$  – среднеобъемная термодинамическая температура, К;  
 $C_V$  – удельная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(кг·К).

Из уравнения состояния газа Менделеева-Клапейрона (3):

$$\rho T = p / R_g, \quad (3)$$

где  $p$  – давление, среднее по объему помещения, Па;  
 $R_g$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

В [1] для аналитического анализа введено упрощение модели, предложено считать, что теплоёмкость смеси можно рассчитать по формулам идеального газа (4):

$$C_V = R_g / (\gamma - 1), \quad (4)$$

где  $\gamma = \text{const}$  – показатель адиабаты идеального газа, у двухатомных газов  $\gamma = 1,4$ .

Подставляя (2)-(4) в (1), получим дифференциальное уравнение (5):

$$\frac{1}{\gamma - 1} \frac{d p}{d t} = \Sigma Q_i \quad (5)$$

Температура при пожаре в закрытых помещениях может подниматься до 1500 °С и выше [2]. Известно, что высокая температура влияет на термодинамические свойства продуктов горения (см., например, [3]). Тем не менее, в опубликованных работах по численному исследованию интегральной модели в помещении [4, 5] используется уравнение (5). При этом не учитывается влияние температуры на теплоёмкость газовой смеси. Кроме того, теплоёмкость и показатель адиабаты смеси газов зависит от их состава. Например, показатель адиабаты углекислого газа при 20 °С равен 1,3, а при 1000 °С –  $\gamma = 1,195$  [6]. Тогда и у газовой смеси  $\gamma$  изменится.

Цель настоящей статьи – по опытным данным получить аналитическую зависимость теплоёмкости газообразных продуктов горения при постоянном объеме от температуры и оценить целесообразность ее использования при математическом моделировании динамики пожара в закрытом помещении.

Теплоёмкость смеси газов рассчитывается по аддитивной формуле (6) [6]:

$$C_V = \left( \sum_j (y_j \cdot C_{Vj}) \right). \quad (6)$$

где  $y_j$  – массовые доли компонент газовой смеси,  
 $C_{Vj}$  – их удельная теплоёмкость при постоянном объеме, Дж/(кг·К).

При пожаре в состав газообразных продуктов горения чаще всего входят углекислый и угарный газы, реже хлористый водород и другие компоненты [1]. Кроме того, смесь газов в помещении включает не участвующий в химических реакциях азот и еще не прореагировавший кислород. По формуле (4) рассчитаем значения удельной теплоёмкости названных газов в рамках модели идеального газа:

Кислород	$C_V^o = 8314 / (32(1,4 - 1)) = 649,5 \text{ Дж}/(\text{кг К})$ ;
Азот воздуха	$C_V^o = 8314 / (28,15(1,4 - 1)) = 738,4 \text{ Дж}/(\text{кг К})$ ;
Углекислый газ	$C_V^o = 8314 / (44(1,33 - 1)) = 572,6 \text{ Дж}/(\text{кг К})$ ;

Угарный газ

$$C_V^o = 8314 / (28(1,4 - 1)) = 742,3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Наиболее полные сведения о теплоёмкости  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  в диапазоне температур от нуля до  $2500^\circ\text{C}$  содержатся в справочном пособии [7]. Оценим отклонение реальной теплоёмкости каждого из газов  $C_V$  от соответствующего значения идеального газа  $C_V^o$ :

$$E = 100\% \cdot (C_V - C_V^o) / C_V^o. \quad (7)$$

На рисунке 1 представлены результаты расчёта по формуле (7). Видно, что в условиях пожара отклонение значения теплоёмкости углекислого газа может достигнуть 75%, окиси углерода – 60%, кислорода – 40%, азота – 30%.

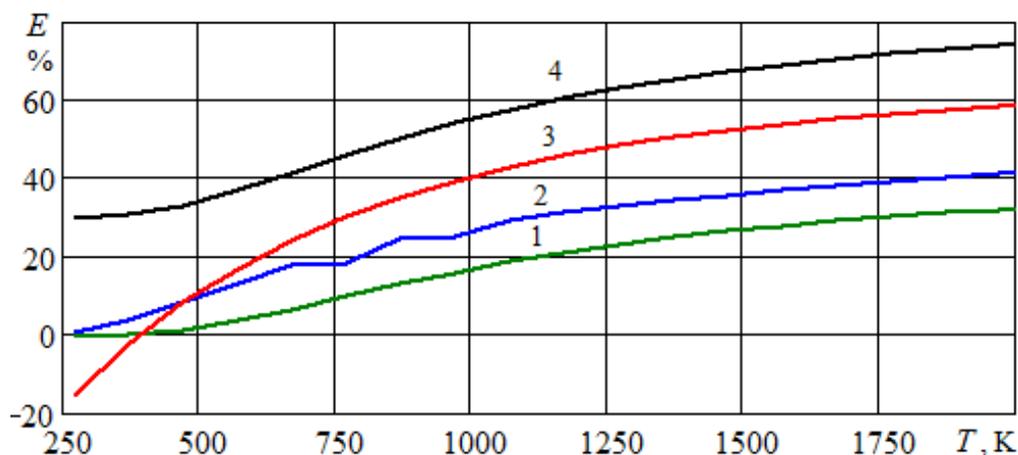


Рисунок 1 – Относительное отклонение реальной удельной теплоёмкости газа при постоянном объёме от соответствующего значения идеального газа:  
1 – азот, 2 – кислород, 3 – окись углерода, 4 – двуокись углерода

Экспериментальные данные [7] были использованы для получения аппроксимирующих многочленов (8):

$$f_n(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + \dots + a_nT^n, \quad (8)$$

Коэффициенты в (8) были найдены методом наименьших квадратов. Степень многочлена (8) определялась по методике, описанной в [8]. Рассчитывалось среднее квадратичное отклонение экспериментальных данных от многочлена (8)  $n$ -го порядка по формуле (9):

$$\varepsilon_n = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{N - n - 1} \sum_{i=1}^N \left( 1 - \frac{C_{Vi}}{f_n(T_i)} \right)^2}, \quad (9)$$

где  $N$  – объем выборки, в рассматриваемом случае  $N = 26$ .

Для теплоёмкости кислорода (рис. 2) по формуле (9) получаем  $\varepsilon_1 = 3,35\%$ ;  $\varepsilon_2 = 1,24\%$ ;  $\varepsilon_3 = 0,664\%$ ;  $\varepsilon_4 = 0,659\%$ . В данном случае нет смысла увеличивать порядок аппроксимации выше  $n = 3$ .

Для теплоёмкости азота (рис. 3) по формуле (9) получаем  $\varepsilon_1 = 2,99\%$ ;  $\varepsilon_2 = 1,00\%$ ;  $\varepsilon_3 = 0,984\%$ ;  $\varepsilon_4 = 0,523\%$ ;  $\varepsilon_5 = 0,536\%$ . Следовательно, устанавливаем порядок аппроксимации  $n = 4$ .

Аналогичные расчёты выполнены для теплоёмкости  $CO$  и  $CO_2$  (рис. 4 и 5).

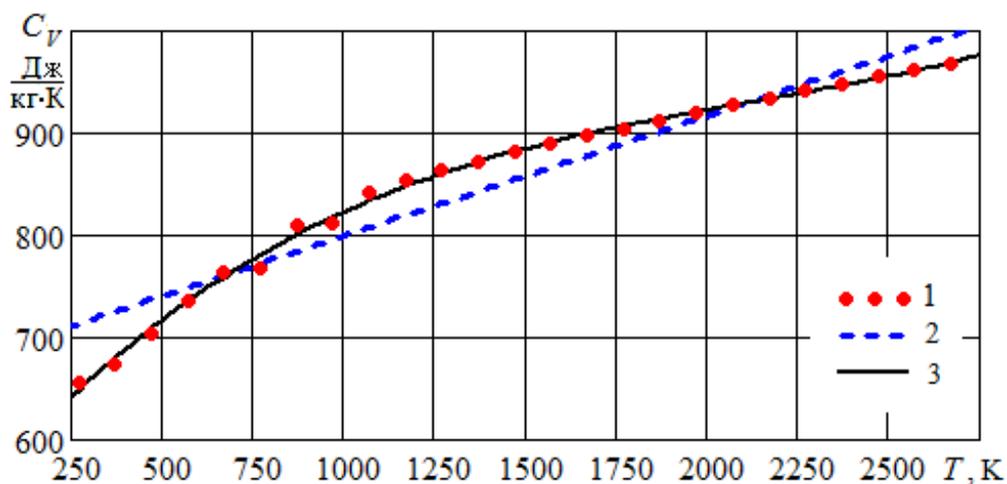


Рисунок 2 – Зависимость удельной теплоёмкости кислорода при постоянном объёме от температуры:  
1 – экспериментальные данные [7]; 2 – расчёт по (8) при  $n = 1$ ; 3 –  $n = 3$

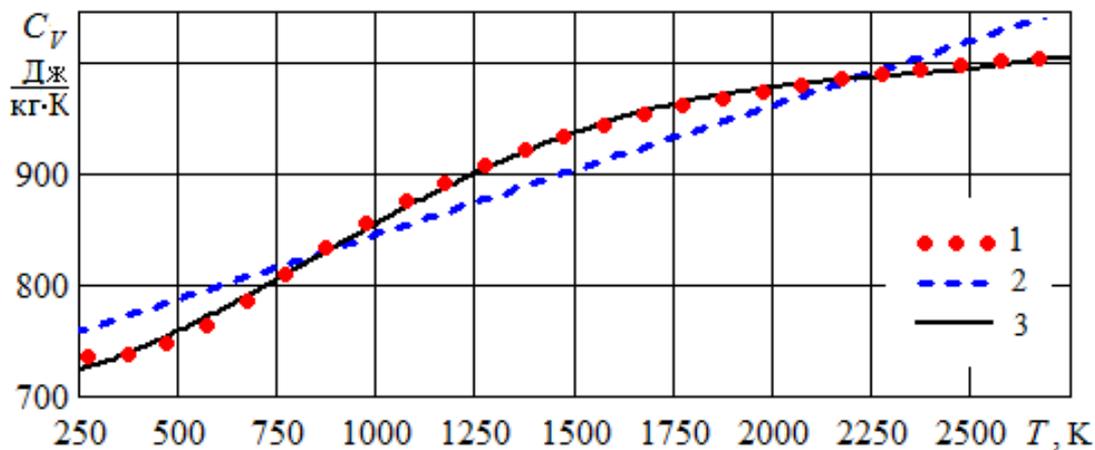


Рисунок 3 – Зависимость удельной теплоёмкости азота при постоянном объёме от температуры:  
1 – экспериментальные данные [7]; 2 – расчёт по (8) при  $n = 1$ ; 3 –  $n = 4$

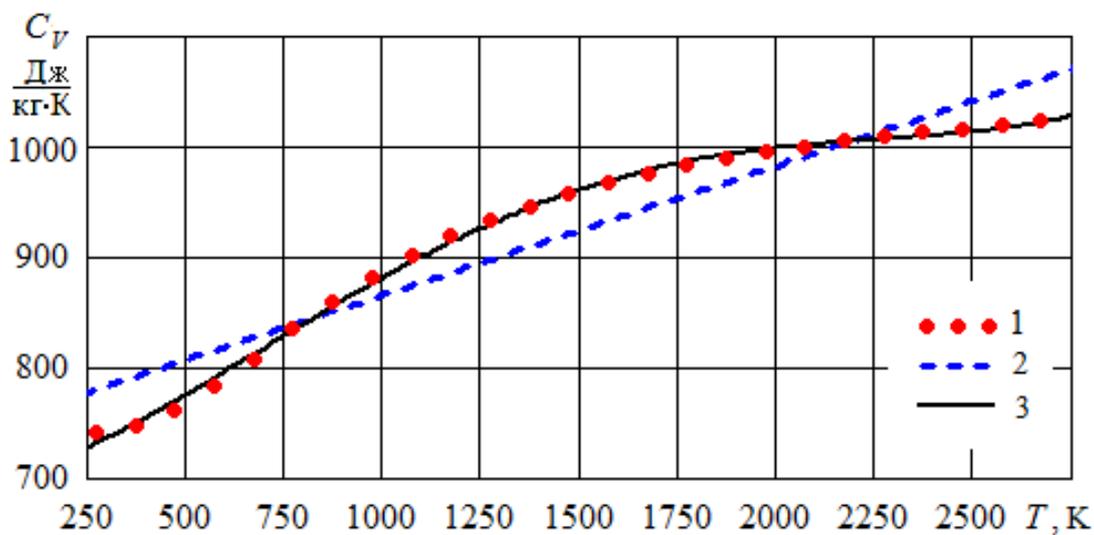


Рисунок 4 – Зависимость удельной теплоёмкости двуокиси углерода при постоянном объёме от температуры. Обозначения, как на рис. 3

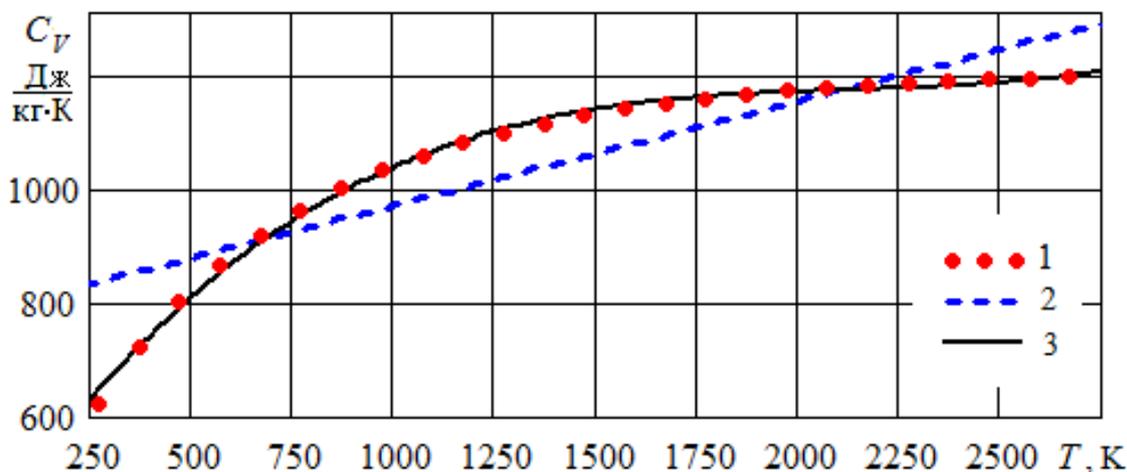


Рисунок 5 – Зависимость удельной теплоёмкости окиси углерода при постоянном объёме от температуры. Обозначения, как на рис. 2

Таким образом, применение модели идеального газа для расчёта теплоёмкости продуктов горения в условиях пожара может привести к ошибке до 75 % из-за повышения температуры и изменения состава смеси. По экспериментальным данным рассчитаны коэффициенты многочленов аппроксимации зависимости теплоёмкости при постоянном объёме от температуры для кислорода, азота, окиси и двуокиси углерода. Установлен достаточный для точности расчётов порядок многочленов аппроксимации. Полученные многочлены могут быть использованы при моделировании термодинамических процессов во время пожара в закрытом помещении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учебное пособие / Ю.А. Кошмаров. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы МВД России, 2000. – 118 с.
2. Пузач, С.В. Влияние температуры и граничных условий теплообмена на величину показателя токсичности веществ и материалов при пожаре в помещении / С.В. Пузач // Тепловые процессы в технике, 2013. – Т. 5, №6. – С. 247–253.
3. Гавин, Л.Б. Модель двухфазной турбулентной струи с учётом гетерогенного горения частиц / Л.Б. Гавин, В.А. Медведев, В.А. Наумов // Физика горения и взрыва. – 1988. – Т. 24, №3. – С. 12–17.
4. Михайлова, Н.А. Численная реализация интегральной математической модели пожара в помещении в интегрированной среде MATHCAD / Н.А. Михайлова // Интернет-Вестник ВолгГАСУ, 2014. – №11 (32). – С. 4. – URL: [http://vestnik.vgasu.ru/ attachments/Mihailova.pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Mihailova.pdf).
5. Калинина, Е.С. Интегративный подход к проведению занятий по математическим дисциплинам в вузах МЧС России Е.С. Калинина // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2017. – №2. – С. 187–193.
6. Наумов, В.А. Газодинамика: учебно-методическое пособие / В.А. Наумов. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2013. – 25 с.
7. Вукалович, М.П. Термодинамические свойства газов: учебное пособие / М.П. Вукалович, В.А. Кириллин, С.А. Ремизов. – Москва: Изд-во машиностроительной и судостроительной литературы, 1953. – 125 с.
8. Наумов, В.А. Прикладная математика: учебное пособие по решению профессиональных задач в среде Mathcad для студентов вузов, обучающихся в магистратуре / В.А. Наумов. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. – 144 с.

CHANGE OF THE HEAT CAPACITY OF THE GASEOUS COMBUSTION  
PRODUCTS DURING A FIRE IN AN ENCLOSED SPACE

D.A. Pylenok, student  
dimon39.94@mail.ru

V.A. Naumov, Doctor of Technical Science, Professor  
van-old@mail.ru

Kaliningrad State Technical University

The polynomial approximation of the heat capacity at constant volume on temperature was calculated according to the experimental data for combustion products. If not to take into account the effect of temperature in case of fire in an enclosed space, the error of calculation will be from 30 to 75 %.

*fire in an enclosed space, mathematical modeling, gaseous products of combustion, heat capacity*