

УДК 621.1.016

Д. Г. Калишук, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);  
Н. П. Саевич, кандидат технических наук, старший преподаватель (БГТУ);  
А. И. Вилькоцкий, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

### ПРИМЕНЕНИЕ АППРОКСИМАЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРИ РАСЧЕТАХ АДИАБАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Проведен анализ алгоритма расчетов адиабатной температуры продуктов сгорания природного газа. Для упрощения и снижения трудоемкости расчетов предложены аппроксимационные зависимости, описывающие взаимосвязь удельных энтальпий компонентов продуктов сгорания с их температурами. Получено уравнение теплового баланса для процесса горения природного газа с использованием в качестве окислителя кислорода воздуха, в котором применены указанные аппроксимационные зависимости.

The analysis of the algorithm calculations adiabatic temperature of combustion products of natural gas. To simplify and reduce the complexity of the calculations suggested approximate dependencies, describing the relationship of specific components of the enthalpies of combustion products with their temperatures. Obtained the equation of thermal balance for the combustion process of natural gas by using oxygen as an oxidizer of air, which applied the indicated nye approximate dependence.

**Введение.** В химической промышленности, энергетике и других сферах производственной деятельности широко используются теплотехнические агрегаты и установки, в которых одним из теплоносителей или рабочим телом являются продукты сгорания различных топлив. В Беларуси основное промышленное топливо – природный газ. В подавляющем большинстве случаев при сжигании природного газа в качестве окислителя используется кислород воздуха. При технологическом проектировании теплотехнических агрегатов и установок, анализе их работы, наладке, контроле процессов горения важнейшим параметром является теоретическая температура продуктов сгорания. В ходе аналитического определения теоретической температуры продуктов сгорания в первую очередь проводят расчеты их состава. Эти расчеты базируются на уравнениях химических реакций взаимодействия компонентов природного газа с кислородом воздуха и их материальных балансах [1–5]. Затем составляется уравнение теплового баланса, из которого определяется адиабатная (калометрическая) температура продуктов сгорания. В этом уравнении приход тепла с компонентами топливной смеси (воздухом и природным газом) в сумме с количеством тепла, выделившегося в результате сгорания топлива, приравнивается к расходу тепла с продуктами сгорания.

Адиабатная температура продуктов сгорания практически совпадает с теоретической в тех случаях, если ее величина не превышает 1500°C [1, 2, 4]. При более высоких температурах существенную роль начинает играть частичная диссоциация компонентов продуктов сгорания, в первую очередь диоксида углерода и воды (перегретого водяного пара). За счет

тепловых эффектов диссоциации теоретическая температура продуктов сгорания может оказаться значительно ниже адиабатной. Учет эффектов диссоциации проводится с помощью уравнений химического равновесия реакций диссоциации, их материальных и тепловых балансов.

Точные расчеты адиабатной температуры продуктов сгорания очень трудоемки. Они проводятся методом последовательных приближений, так как удельные энтальпии компонентов продуктов сгорания зависят от величины искомого параметра – их температуры. В справочнике [1] удельные энтальпии компонентов продуктов сгорания даны в табличном виде для диапазона температур от 100 до 2500°C с шагом 100°. С. Л. Ривкиным [6] таблицы, характеризующие удельные энтальпии таких продуктов сгорания, как азот, диоксид углерода, водяной пар, кислород представлены более подробно, с шагом в один градус. Однако верхний диапазон их значений существенно ниже – до 1500°C. В ряде источников, в том числе и справочнике [6], имеются аппроксимационные зависимости для определения удельных энтальпий газов, являющихся компонентами продуктов сгорания. Но они сложны и неоднородны по своему виду. Использование имеющегося в литературе материала, по мнению авторов, сложно и очень трудоемко при проведении ручных расчетов адиабатной температуры, а также усложняет подготовку алгоритмов расчетов при помощи ЭВМ. Поэтому нами предпринята попытка получения несложных и в то же время достаточно точных аппроксимационных зависимостей для определения величин удельных энтальпий продуктов сгорания природного газа с целью их применения для практических расчетов адиабатной температуры.

**Основная часть.** Точные расчеты адиабатной температуры продуктов сгорания природного газа можно произвести, решив уравнение

$$h_T + \alpha v_B^0 (h_B + h_{вп} Y_{вп}) + H_H^d = \sum_{i=1}^n h'_i v_i^0, \quad (1)$$

где  $h_T, h_B, h_{вп}$  – удельные энтальпии природного газа, воздуха и содержащегося в воздухе водяного пара соответственно, Дж/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $v_B^0$  – теоретический расход сухого воздуха на сжигание 1 м<sup>3</sup> природного газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа;  $Y_{вп}$  – относительная объемная доля водяного пара в воздухе, поступающем в топку для сжигания природного газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> сухого воздуха;  $H_H^d$  – низшая объемная теплота сгорания природного газа, Дж/м<sup>3</sup>;  $h'_i$  – удельная энтальпия  $i$ -го компонента продуктов сгорания при адиабатной температуре, Дж/м<sup>3</sup>;  $v_i^0$  – выход (объем)  $i$ -го компонента продуктов сгорания в расчете на 1 м<sup>3</sup> природного газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа;  $n$  – число компонентов продуктов сгорания.

Значения  $h_T, v_B^0, H_H^d, v_i^0$  должны быть даны в расчете на 1 м<sup>3</sup> природного газа, приведенного к нормальным термодинамическим условиям. Величины  $h_B, h_{вп}, h'_i$  даются в расчете на 1 м<sup>3</sup> соответствующего компонента при нормальных термодинамических условиях. При этом  $h_T$  соответствует температуре и составу сжигаемого природного газа, а  $h_B$  и  $h_{вп}$  – температуре воздуха, подаваемого в топку.

Природный газ, в том числе поставляемый в Беларусь, в определяемых количествах помимо метана содержит углеводороды от этана до пентана включительно, а также азот и диоксид углерода [1–3]. Поэтому в продуктах его сгорания в значимых для расчетов адиабатной температуры количествах содержатся следующие компоненты: азот, диоксид углерода, водяной пар, кислород и аргон.

В ходе анализа было установлено, что для аргона удельная энтальпия  $h_{Ar}$ , кДж/м<sup>3</sup>, зависит от температуры линейно [7]. Эту зависимость можно описать формулой

$$h_{Ar} = 0,9273t, \quad (2)$$

где  $t$  – температура, °С.

Для остальных четырех компонентов продуктов сгорания природного газа в требуемых интервалах температур,  $h'_i$  была аппроксимирована полиномами третьего порядка

$$h'_i = a_i + b_i t + c_i t^2 + d_i t^3, \quad (3)$$

где  $a_i, b_i, c_i, d_i$  – коэффициенты.

Значение коэффициентов интерполяционных уравнений вида (3) для различных газов представлены в таблице.

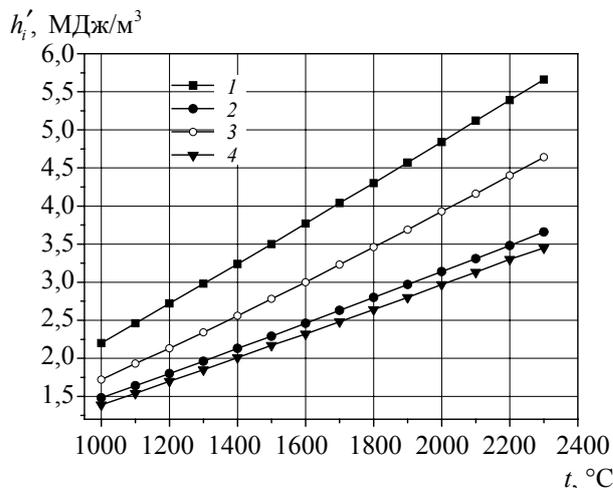
**Коэффициенты уравнения (3)  
для различных газов**

**в диапазоне температур от 1000 до 2300°С**

Газ	$a$	$b$	$c \cdot 10^4$	$d \cdot 10^8$
Диоксид углерода	-168,1108	2,1673	2,3872	-3,4621
Водяной пар	16,7380	1,3682	3,8260	-4,4730
Азот	-37,0088	1,3245	1,2957	-1,5590
Кислород	-58,2723	1,4633	0,7726	-0,4923

Интервалы применения интерполяционных зависимостей были выбраны исходя из реальных условий протекания процесса сжигания природного газа. Для обеспечения благоприятных условий горения и интенсивного сжигания природного газа теоретическая температура продуктов сгорания должна быть выше 1000°С. В то же время она не может быть выше 2300°С при использовании в качестве окислителя кислорода воздуха даже при предварительном подогреве его до 500°С. Это подтверждают материалы монографии [4] и результаты наших расчетов.

Коэффициенты аппроксимационных зависимостей, приведенные в таблице, обеспечивают сходимость справочных [1, 5] и расчетных значений  $h'_i$  в пределах  $\pm 0,3\%$ . Это позволяет при применении указанных зависимостей в уравнении (1) обеспечить погрешность расчета адиабатной температуры не более 5°. Графики, иллюстрирующие сходимость рассчитанных по аппроксимационным уравнениям значений  $h'_i$  с их табличными данными из [1], представлены на рисунке.



Сравнение расчетных значений  $h'_i$  (линии) с их табличными значениями [1] (точки):  
1 – диоксид углерода; 2 – водяной пар;  
3 – кислород; 4 – азот

Анализ результатов предварительных расчетов адиабатной температуры продуктов сгорания природного газа, проведенных при различных значениях исходных температур природного газа и воздуха, при варьируемых в реальных пределах величинах относительной влажности воздуха и коэффициента его избытка показал следующее. Вклад в приходную, левую часть уравнения теплового баланса (1) от  $h_r$  при его температуре до 25°C составляет не более 0,12%. Пренебрежение этим слагаемым вызовет снижение точности расчетов адиабатной температуры не более, чем на 3°. Это дает основание упростить уравнение (1) и после подстановки в него значений  $h'_i$  согласно аппроксимационным зависимостям (2) и (3) представить в виде

$$\begin{aligned}
 H_H^d + \alpha v_B^0 (h_B + h_{вп} Y_{вп}) = & \\
 -168,1108 v_{CO_2}^0 - 37,0088 v_{N_2}^0 - 58,2723 v_{O_2}^0 + & \\
 + 16,7380 v_{H_2O}^0 + t(2,1673 v_{CO_2}^0 + 1,3245 v_{N_2}^0 + & \\
 + 1,4633 v_{O_2}^0 + 1,3682 v_{H_2O}^0 + 0,9273 v_{Ar}^0) + & \\
 + t^2 \cdot 10^{-4} (2,3872 v_{CO_2}^0 + 1,1957 v_{N_2}^0 + & \\
 + 0,7726 v_{O_2}^0 + 3,8260 v_{H_2O}^0) - & \\
 - t^3 \cdot 10^{-8} (3,4621 v_{CO_2}^0 + 1,5590 v_{N_2}^0 + & \\
 + 0,4923 v_{O_2}^0 + 4,4730 v_{H_2O}^0), & \quad (4)
 \end{aligned}$$

где  $v_{CO_2}^0, v_{N_2}^0, v_{O_2}^0, v_{H_2O}^0, v_{Ar}^0$  – выход диоксида углерода, азота, кислорода, водяных паров и аргона в расчете на 1 м<sup>3</sup> природного газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа.

При отсутствии предварительного подогрева воздуха, поступающего в топку для сжигания природного газа, из левой части уравнения (4) также можно исключить произведение  $\alpha v_B^0 h_{вп} Y_{вп}$  из-за его малой значимости (не более 0,1% от общего прихода тепла).

Авторами разработана программа расчетов на ЭВМ параметров продуктов сгорания природного газа, включающая определение их

адиабатной температуры с применением зависимостей (2)–(4). Программа реализована на языке программирования Visual Basic. Сравнение результатов наших расчетов с данными по величинам адиабатной температуры продуктов сгорания природного газа, приведенными в монографиях [4, 5], подтвердили их достаточную достоверность.

**Заключение.** Получены аппроксимационные зависимости для определения удельной энтальпии продуктов сгорания природного газа. Применение данных зависимостей позволяет рассчитывать адиабатную температуру продуктов сгорания с суммарной погрешностью не более 10°C. При использовании разработанных зависимостей снижается трудоемкость ручных расчетов адиабатной температуры методом последовательных приближений, а также упрощается алгоритм расчетов с помощью ЭВМ.

#### Литература

1. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред. чл.-кор. А. В. Клименко и проф. В. М. Зорина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 564 с.
3. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
4. Равич, М. Б. Газ и эффективность его использования в народном хозяйстве: монография / М. Б. Равич. – М.: Недра, 1987. – 238 с.
5. Равич, М. Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов: монография / М. Б. Равич. – М.: Наука, 1964. – 362 с.
6. Ривкин, С. Л. Термодинамические свойства газов: справочник / С. Л. Ривкин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
7. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справочное издание: в 4 т. / Л. В. Гурвич [и др.]. – М.: Наука, 1978. – Т. 1, кн. 2. – 328 с.

Поступила 26.02.2011