

УДК 662.61

В.О. Давыдов, канд. техн. наук, доц.,
А.В. Бондаренко, магістр,
Одес. нац. политехн. ун-т

МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ СМЕСИ ГАЗООБРАЗНОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ ИЗБЫТКЕ ВОЗДУХА

В.О. Давыдов, А.В. Бондаренко. Метод розрахунку температури горіння довільної суміші газоподібного вуглеводневого палива при довільному надлишку повітря. Запропоновано метод розрахунку температури горіння суміші газоподібного палива. Проведено порівняльний аналіз розрахункових і реальних значень: калориметричних і теоретичних температур горіння для метану і пропану, та теплоти згорання для довільних сумішей вуглеводневих газів. Показано, що відносна похибка моделювання температури горіння не перевищує 10 %, а теплоти згорання — менше 2 %.

Ключові слова: горіння, продукти згорання, температура горіння.

В.О. Давыдов, А.В. Бондаренко. Метод расчета температуры горения произвольной смеси газообразного углеводородного топлива при произвольном избытке воздуха. Предложен метод расчета температуры горения смеси газообразного топлива. Проведен сравнительный анализ расчетных и реальных значений: калориметрических и теоретических температур горения для метана и пропана и теплоты сгорания для произвольных смесей углеводородных газов. Показано, что относительная погрешность моделирования температуры горения не превышает 10 %, а теплоты сгорания — меньше 2 %.

Ключевые слова: горение, продукты сгорания, температура горения.

V.O. Davydov, A.V. Bondarenko. The method of calculating the combustion temperature of any mixture of hydrocarbon fuel for any excess air. A method for calculating the combustion temperature of the mixture of gaseous fuel is proposed. A comparative analysis of the calculated and measured values of the calorimetric and theoretical combustion temperatures is carried out for methane and propane, as well as of combustion heat for arbitrary mixtures of hydrocarbon gases. It is shown that the relative error of modeling the combustion temperature does not exceed 10 % and is less than 2 % for combustion heat.

Keywords: combustion, combustion products, combustion temperature.

Одно из направлений повышения эффективности нефтеперерабатывающей промышленности заключается в разработке методов оптимального сжигания газообразного углеводородного топлива с переменной теплотой сгорания. Оптимальный режим обеспечивается подачей в область горения количества кислорода, близкого к стехиометрическому. В случае, когда состав топлива известен, это не сложно организовать технически.

В то же время в процессе переработки нефти, при производстве сертифицированной продукции на различных установках, образуется смесь углеводородных газов постоянно меняющегося состава. Сжигание подобной смеси на имеющихся печах и котлах не представляется возможным по причине отсутствия средств управления таким процессом. Поэтому смесь бесполезно сжигается на так называемом факеле, что можно наблюдать на любом нефтеперерабатывающем заводе.

Поэтому преследовалась цель разработки методики оптимального сжигания топлива с переменной теплотой сгорания.

Для достижения поставленной задачи, прежде всего, необходимо было разработать простую, с вычислительной точки зрения, модель горения газообразного топлива. Определенные

решения данной задачи можно получить, основываясь на законах теории горения, термохимии и термодинамики.

Современная теория горения предлагает проработанный математический аппарат на основе дифференциальных уравнений [1]. Существуют специализированные пакеты для инженерных расчетов процесса горения различного топлива в горелках и установках любой геометрии [2]. С другой стороны, численное решение необходимых дифференциальных уравнений весьма требовательно к вычислительным ресурсам и в большинстве случаев не может быть реализовано в реальном режиме времени.

Термохимия в самом простом случае предлагает ряд уравнений для химической кинетики полного / неполного окисления для реагентов, взятых в стехиометрическом соотношении. В самом сложном случае процесс горения рассматривается, как цепочки десятков и тысяч элементарных преобразований элементов.

Термодинамический анализ позволяет построить энергетический баланс любого процесса при условии, что известны значения всех необходимых параметров: энтальпии исходных веществ, продуктов сгорания и их расходные характеристики. В рассматриваемой задаче неизвестен состав и массовые расходы продуктов сгорания.

Таким образом, на основе предварительных исследований и анализа литературных источников была синтезирована следующая упрощенная модель горения газа.

Горение решено рассматривать как три последовательные стадии [3]:

- $C + 0,5O_2 = CO - 110,5$ кДж/моль;
- $H_2 + 0,5O_2 = H_2O - 286$ кДж/моль;
- $CO + 0,5O_2 = CO_2 - 283$ кДж/моль.

После пересчета на килограмм газообразного топлива были получены данные, представленные в табл. 1. Они позволяют определить: массу кислорода, необходимого для сжигания произвольного количества компонентов топлива, массу и состав (без учета диссоциации CO и H₂O) продуктов сгорания при наличии определенного количества кислорода, а также суммарное количество выделяемой в результате горения теплоты Q_{Σ} .

Таблица 1

Результаты сжигания 1 кг топлива

Топливо	Масса необходимого кислорода, кг	Масса продукта сгорания, кг	Продукт сгорания	Теплота сгорания, кДж/кг
C	4/3	11/3	CO	9208
H ₂	8	9	H ₂ O	143000
CO	4/7	11/7	CO ₂	10116

Таким образом, горение любого газообразного углеводородного топлива рассматривается как окисление углерода и водорода, которые в нем содержатся.

Для расчета значения высшей теплоты сгорания топлива Q_v^p из получаемого суммарного количества теплоты Q_{Σ} необходимо вычесть стандартную энтальпию образования данной массы топлива. Если в качестве топлива выступает смесь газов, то необходимо вычесть сумму стандартных энтальпий образования всех компонентов, исходя из парциального состава смеси.

Для преобразования Q_v^p в низшую теплоту используется соотношение

$$Q_v^p = Q_n^p + 22500 \cdot m_H,$$

где m_H — масса содержащегося в топливе водорода.

Теплота Q_n^p также равна суммарному теплосодержанию продуктов сгорания. Если не учитывать режимы горения, при которых кислорода нехватает на окисление углерода, то в общем

случае в состав продуктов сгорания могут входить следующие компоненты: CO, CO₂, H, H₂O, O, N. В этом случае суммарное теплосодержание продуктов сгорания имеет вид

$$h_{\text{CO}}(T)m_{\text{CO}} + h_{\text{CO}_2}(T)m_{\text{CO}_2} + h_{\text{H}}(T)m_{\text{H}} + h_{\text{H}_2\text{O}}(T)m_{\text{H}_2\text{O}} + h_{\text{O}}(T)m_{\text{O}} + h_{\text{N}}(T)m_{\text{N}} = Q_{\text{H}}^p, \quad (1)$$

где $h(T)$ — энтальпия и m — масса указанных компонентов.

Если обозначить энтальпии и массы компонентов как $h_i(T)$ и m_i , то в общем виде (1) можно записать как

$$\sum_i h_i(T)m_i = Q_{\text{H}}^p. \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет определить температуру пламени. Если коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,0$, то оно определяет жаропроизводительность. При этом основной проблемой решения является поиск зависимостей $h(T)$ для всех компонентов продуктов сгорания, принятых в единой системе отсчета.

Для расчета калориметрической температуры пламени в правую часть (2) необходимо добавить величину $Q_{\text{физ}}$, учитывающую теплосодержание газа и воздуха, отсчитываемое от 0 °С,

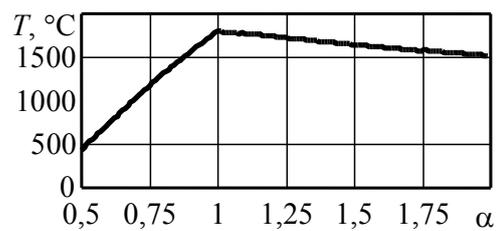
$$\sum_i h_i(T)m_i = Q_{\text{H}}^p + Q_{\text{физ}}.$$

Для учета диссоциации продуктов сгорания необходимо из правой части (2) вычесть величину $Q_{\text{дисс}}$, определяющую суммарные затраты теплоты на диссоциацию CO₂ и H₂O,

$$\sum_i h_i(T)m_i = Q_{\text{H}}^p + Q_{\text{физ}} - Q_{\text{дисс}}.$$

Алгоритм определения теоретической температуры в уравнении (2) является итерационным. Сначала необходимо определить первое приближение температуры T' без учета диссоциации. Затем второе приближение температуры T'' при предположении, что диссоциация происходит при температуре T' . Процесс поиска решения продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие $T' = T''$.

Расчетным путем получены зависимости калориметрической и теоретической температур от избытка воздуха α для метана и пропана. Пример зависимости теоретической температуры для метана представлен на рисунке. Результаты сравнения расчетных значений температур со справочными приведены в табл. 2. Также проведен сравнительный анализ теплоты сгорания Q_{H}^p различных смесей газов, получаемой расчетным путем, с фактическими данными (табл. 3).



Расчетная зависимость теоретической температуры пламени от избытка воздуха для метана

Таблица 2

Результаты сравнения расчетных и справочных значений температур

Температура пламени	Расчетное значение, °С	Справочное значение [4], °С	Относительная погрешность, %
Метан			
калориметрическая в воздухе при $t = 0$ °С	1831	2030	9,5
теоретическая в газовой среде	1801	1870	3,7
Пропан			
калориметрическая в воздухе при $t = 0$ °С	1935	2110	8,3
теоретическая в газовой среде	1895	1920	1,5

Таблиця 3

Результаты сравнения расчетных и реальных значений теплоты сгорания Q_n^p
различных смесей углеводородных газов

Компонентный состав, % об.								Q_n^p		Отн. погрешность, %
C_1	C_2	C_3	iC_4	nC_4	iC_5	nC_5	H_2	Факт.	Рассч.	
13,2	6,7	18,7	21,8	15,7	0	3,3	21	46962	46906	0,1
6,3	2,8	1	0,2	0,7	0,3	0,2	89	73221	71909	1,8
6,3	2,8	1	0,2	0,7	0,3	0,2	89	73221	71909	1,8
8	6,9	5,2	1,4	1,3	0,3	0,1	76,8	59334	59193	0,2
6,5	4,7	3,4	0,7	0,6	0,2	0,1	83,8	65558	65308	0,4
0,5	14,6	60,8	12,5	11,4	0	0,2	0	46255	45289	0,07

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы. Предложенная упрощенная модель горения газов с высокой точностью определяет теплоту сгорания газообразного углеводородного топлива произвольного состава. Относительная погрешность при этом менее 2 %. Расчетные значения калориметрической температуры пламени определяется с погрешностью 7...10 %, теоретической — 1...5 %. Положение максимума моделируемой температуры пламени соответствует стехиометрическому соотношению топлива и кислорода.

Литература

1. Химия горения / У. Гардинер, Г. Диксон-Льюис, Р. Целнер и др. — М.: Мир, 1988. — 464 с.
2. FlowVision [Электронный ресурс] / ООО ТЕСИС. — Ноябрь, 2013. — <http://flowvision.ru/>. — 20.11.2013.
3. Ложкин, В.Н. Организованные процессы горения углеводородных топлив в двигателях пожарных автомобилей и образование вредных веществ / В.Н. Ложкин, В.А. Буравцов, Б.В. Гавкалюк // Вестн. С.-Петерб. ун-та гос. пожар. службы: науч. электрон. журнал. — 2009. — Вып. № 4. — С. 14 — 22.
4. Александров, А.А. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики [Электронный ресурс] / А.А. Александров, К.А. Орлов, В.Ф. Очков. — Март, 2012. — <http://twf.mpei.ac.ru/rbtpp/>. — 20.11.2013.

References

1. Khimiya gorennya [Combustion chemistry] / U. Gardiner, G. Dikson-L'yuis, R. Tselner etc. — Moscow, 1988. — 464 p.
2. FlowVision: [electronic resource] / ООО TESYS. — November, 2013. — <http://flowvision.ru/>. — 20.11.2013.
3. Lozhkin, V.N. Organizovannye protsessy gorennya uglevodorodnykh topliv v dvigatelyakh pozharnykh avtomobiley i obrazovanie vrednykh veshchestv. [Organized combustion processes of hydrocarbon fuels in engines of fire trucks and the formation of harmful substances] / V.N. Lozhkin, V.A. Buravtsov, B.V. Gavkalyuk // Herald of St. Petersburg University of State Fire Service: sci. electron. Journal. Vol.4, 2009, pp. 14 – 22. ISSN: 2218-130X
4. Teplofizicheskie svoystva rabochikh veshchestv teploenergetiki. [Thermo-physical properties of the working substances of power system] [electronic resource] A.A. Aleksandrov, K.A. Orlov, V.F. Ochkov. — March, 2012. — <http://twf.mpei.ac.ru/rbtpp/> — 20.11.2013.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Максимов М.В.

Поступила в редакцию 15 октября 2013 г.