

Bioethanol Plasma Conversion into Dry Synthesis-Gas

Zhovtyansky V.A.¹, Dudnyk O.M.², Nevzglyad I.O.¹

¹ *The Gas Institute of NASU, Kiev*

² *Coal Energy Technology Institute of NASU, Kiev*

The laboratory installation for bioethanol plasma conversion into dry synthesis-gas is designed and tested. The synthesis-gas volumetric content of hydrogen is ranged between 66,8 and 68,2 %. The installation conversion chemical efficiency is up to 74,8 %. The installation productivity by dry synthesis-gas is amounted 0,23–0,5 m³/h. The method of the process efficiency definition is developed and approved. The installation productivity depending on parameters of plasma torch operation is determined. Power consumption for synthesis-gas and pure hydrogen production as well as economical parameters of the conversion process are determined.

Key words: alternative fuels, bioethanol, steam plasma conversion, plasma torch, synthesis-gas, hydrogen.

Received April 13, 2010

УДК 622.612.52:622.612.51

Методика и программа для расчета температуры горения природного газа

Крушневич С.П.

Институт газа НАН Украины, Киев

Представлена методика расчета температуры горения газовой смеси при заданных параметрах с учетом влияния диссоциации компонентов продуктов сгорания. На основе представленной методики разработана программа, позволяющая в удобной форме проводить расчеты температур горения, конечной температуры дымовых газов после их смешивания с избыточным воздухом и паром, которые подаются на охлаждение камеры сгорания.

Ключевые слова: адиабатическая температура горения, диссоциация, камера сгорания, ГТУ.

Представлено методику розрахунку температури горіння газової суміші при заданих параметрах з урахуванням впливу дисоціації компонентів продуктів згорання. На основі представленої методики розроблено програму, що дає змогу у зручній формі проводити розрахунки температур горіння, кінцевої температури димових газів після їх змішування з надлишковим повітрям та парою, що подаються на охолодження камери згорання.

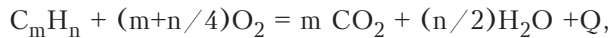
Ключові слова: адіабатична температура горіння, дисоціація, камера згорання, ГТУ.

Анализ программ расчета температуры горения указывает на то, что одни из них обладают широким набором функций, но сложны в освоении, другие просты и доступны, но предназначены для расчета невысоких температур горения, характерных для топков котлов. Учитывая изложенное, автором разработана программа расчета температуры горения для смеси с заданным составом и параметрами, в том числе с учетом особенностей камер сгорания газотурбинных двигателей.

Методика расчета температуры горения

Расчетное определение температуры горения конкретной смеси является достаточно сложной задачей, так как кроме состава смеси на температуру влияют ее начальное значение и давление. Увеличение температуры и давления исходных компонентов приводит к росту температуры горения. Теплообмен с окружающей средой и реакции диссоциации, наоборот, снижают температуру горения [1].

Общее уравнение реакции горения любого углеводорода имеет следующий вид:



где m, n — соответствующее число атомов углерода и водорода в молекуле; Q — теплота сгорания.

Адиабатическая (без теплообмена с окружающей средой) температура горения смеси известного состава может быть рассчитана в соответствии с первым законом термодинамики: тепло, выделяемое при горении, полностью тратится на нагрев продуктов сгорания [2].

При расчетах различают следующие адиабатические температуры горения газов: калориметрическая, теоретическая, действительная (расчетная) и жаропроизводительность. Эти температуры отличаются учетом внешних факторов, влияющих на температуру горения [2]. Так, жаропроизводительность определяет температуру горения смеси при $\alpha = 1$ (количество окислителя соответствует минимально необходимому для полного сжигания) и начальной температуре газа и воздуха $0^\circ C$. Калориметрическая температура учитывает действительный коэффициент избытка воздуха и температуру смеси, подаваемой на горение. Теоретическая температура дополнительно учитывает теплоту, затрачиваемую на диссоциацию. Действительная температура определяется из произведения теоретической на коэффициент η учитывающий потери на теплообмен с окружающей средой (стенками печи), отдачу тепла излучением, скорость потока и др. Иными словами, η — это КПД конкретной камеры сгорания (печи).

Формула определения теоретической температуры имеет следующий вид:

$$t_T = (Q_{H^p} + q_{физ} - q_{дис}) / \sum(V_i \cdot c_{pi}),$$

где Q_{H^p} — низшая теплота сгорания газа, $кДж/м^3$; $q_{физ}$ — теплосодержание (физическая теплота) газа и воздуха, которое отсчитывается от $0^\circ C$, $кДж/м^3$; $q_{дис}$ — количество тепла, которое поглощается при протекании процесса диссоциации диоксида углерода и водяного пара, $кДж/м^3$; $\sum(V_i \cdot c_{pi})$ — сумма произведений объемов и средних объемных теплоемкостей компонентов продуктов сгорания газа при постоянном давлении.

Диссоциация водяных паров и диоксида углерода является эндотермической реакцией, т.е. реакцией с поглощением тепла и увеличением объема.



Тепло, затрачиваемое на диссоциацию водяного пара и диоксида углерода, определяется по следующей формуле:

$$q_{дис} = 108,01 a V_{H_2O} + 127,12 b V_{CO_2}, \text{ кДж/м}^3$$

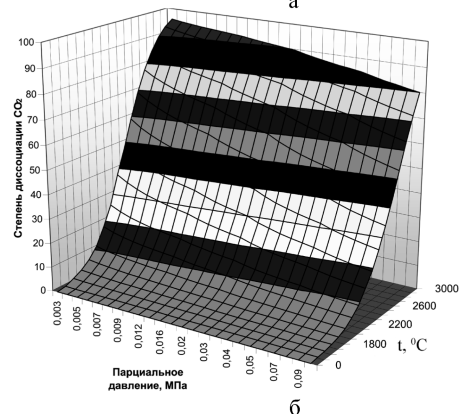
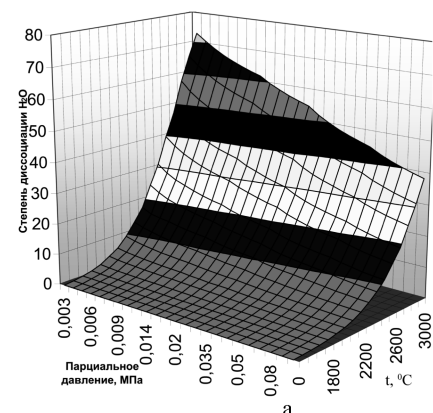
где a, b — степень диссоциации водяных паров и диоксида углерода, %.

Табличные значения степеней диссоциации приведены в [2, 3] (для парциальных давлений от 0,004 до 0,04 МПа и температур от 1500 до 3000 $^\circ C$). На основании этих данных построены трехмерные поля коэффициентов диссоциации (рисунок).

Из рисунка видно, что степень диссоциации повышается с ростом температуры и снижается с ростом парциального давления. Основываясь на такой тенденции, автор выполнил экстраполяцию табличных данных до парциального давления 2,5 МПа и температуры 4000 $^\circ C$.

Значение теплоемкостей компонентов, которые используются в программе, взяты из табличных данных [4] и аппроксимированы полиномом 4-й степени.

Расчет температуры продуктов сгорания газов после смешения с воздухом и водяным паром основывается на постоянстве энергии теп-



Графическое изображение поля коэффициентов диссоциации водяного пара (а) и диоксида углерода (б).

лоты до и после смешения: $Q_{1+2} = Q_1 + Q_2$

Теплоемкость смешанных потоков определяется по теплоемкостям потоков пропорционально их объемам. Отсюда формула определения температуры после смешения принимает следующий вид:

$$T_{1,2} = Q_{1,2} / [(\frac{c_{p1} V_1}{V_1 + V_2} + \frac{c_{p2} V_2}{V_1 + V_2})(V_1 + V_2)].$$

Описание программы расчета температуры горения

На основании изложенной методики разработана программа расчета калориметрической и теоретической температур горения смеси с заданными параметрами. С учетом конструкции камер сгорания газотурбинных двигателей в программу добавлена функция расчета температуры дымовых газов после смешения с избыточным воздухом и водяным паром с заданными параметрами.

На вкладке «Горючая смесь» задается состав горючей смеси (топливо и окислитель) в объемных процентах. Затем на вкладке «Температура горения» задаются температура и давление горючей смеси. При нажатии кнопки «Расчет температуры горения» выполняется расчет, учет влияния диссоциации активируется птичкой возле пункта «Диссоциация». Для проведения расчета температуры дымовых газов после смешения с воздухом следует ввести объем продуктов сгорания, воздуха и пара, а также указать температуру воздуха и пара. Расчет температуры горения и процесса смешения выполняется при нажатии на кнопку «Расчет смешения». На вкладке «Воздух» можно проверить коэффициент избытка воздуха (по кислороду).

Для проверки корректности работы программы выполнено сравнение расчетных температур горения метано-воздушных смесей с табличными данными из [7] (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,0$, содержание кислорода $A = 20\%$) (табл.1).

Кроме того, было проведено сравнение результатов расчетов теоретических температур горения заданных смесей по разработанной программе и данных, которые были рассчитаны по нашим исходным данным профессором Сорокой Б.С. (Институт газа НАН Украины) для составов с разным содержанием водяного пара (табл.2).

Анализ результатов сравнения показывает, что точность расчетов температуры горения по разработанной программе методом теплоемкостей довольно высока. Программа пригодна для предварительных расчетов температуры горения метано-воздушных смесей. Согласно табл.3,

рекомендуется использовать программу для расчета в диапазоне исходной температуры смеси от 20 до 927 °С, при давлении от атмосферного до 3 МПа, за исключением температур выше 627 °С при атмосферном давлении и выше 925 °С при давлении ниже 0,5 МПа. В диапазоне температур исходных компонентов до 327 °С происходит незначительное повышение температуры, тогда как выше 627 °С температура начинает понижаться, особенно при низком давлении. Скорее всего, это связано с неточностью табличных данных по коэффициентам диссоциации.

Смешение продуктов сгорания с воздухом рассчитывается по методике на основе теплоемкостей. Сравнение с программой термодинамических расчетов ГазКондНефть [6] (табл.3) показывает достаточно высокую точность расчетов.

Таблица 1. Сравнение температур горения метано-воздушных смесей и относительных отклонений при температуре исходных компонентов (20–927) °С

P, МПа	20 °С	Δ , %	327 °С	Δ , %	627 °С	Δ , %	927 °С	Δ , %
0,101	1899	-0,3	2034	-1,8	2156	-4,8	2267	-8,3
	1893		1998		2052		2078	
0,507	1925	0,2	2075	0,2	2214	-1,2	2344	-4
	1929		2079		2188		2249	
1,013	1934	0,2	2090	0,6	2236	-0,3	2373	-2,8
	1939		2102		2229		2307	
1,520	1938	0,2	2098	0,5	2248	-0,2	2389	-2,4
	1941		2109		2243		2332	
2,027	1941	0,1	2103	0,5	2255	-0,1	2400	-2,2
	1943		2113		2252		2348	
3,040	1945	0	2110	0,4	2266	-0,1	2415	-1,8
	1945		2119		2265		2372	

Примечание. Данные [7] (числитель) и полученные с помощью разработанной программы (знаменатель).

Таблица 2. Сравнение теоретических температур горения заданных смесей

Параметр	Содержание водяного пара	
	малое	повышенное
Состав смеси, подаваемой на горение, % (об.):		
N ₂	71,3	65,4
CH ₄	8,9	8,1
O ₂	18,9	17,4
H ₂ O	0,9	9,1
Входная температура смеси, °С	409,4	407,4
Давление смеси, МПа	1,975	2,053
Расчитанная температура горения, °С:		
данные проф. Сороки Б.С.	2128,35	1986,25
по разработанной программе	2126,20	2003,30
Δ , %	0,1	0,9

Таблица 3. Сравнение конечных температур смешивания продуктов сгорания $T_{см}$ с воздухом при 100 °С

Температура продуктов сгорания, °С	$T_{см}$, °С		Δ , %
	Программа	ГазКондНефть	
836,4	495,9	498,6	$\pm 0,5$
975,7	574,4	576,8	0,4
1200	702,9	701,2	0,2

Как и в случае с расчетом температуры горения, точность расчета процесса смешивания по использованной методике в основном зависит от точности определения теплоемкостей отдельных компонентов смеси.

Аппроксимация табличных данных выполнялась полиномом 4-й степени, что позволило добиться достаточно высокой точности расчетов.

Описанная программа расчета температуры горения находится по <http://sergeyk.kiev.ua/soft/gorenie/>.

Выводы

На основе представленной методики была разработана и опробована программа расчета адиабатической температуры горения для горючих смесей с заданным составом, температурой и давлением. При расчете температуры учиты-

вается влияние диссоциации продуктов сгорания. Дополнительно программа позволяет рассчитать температуру дымовых газов после смешивания с воздухом и водяным паром с заданными температурами и объемами. Программа использовалась для расчета температуры горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей и показала хорошую точность результатов.

Список литературы

1. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. — М. : Наука, 1980.
2. Стаскевич Н.Л., Северинец Г.Н., Вигдорчик Д.Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. — Л. : Недра, 1990. — 762 с.
3. Пеккер Я. Л. Теплотехнические расчеты по приведенным характеристикам топлив (обобщенные методы). — М. : Энергия, 1977. — 256 с.
4. Вукалович М.П., Кириллин В.А., Ремизов С.А. Термодинамические свойства газов. — М. : МАШГИЗ, 1953. — 370 с.
5. Карп. И.Н., Сорока Б.С., Дашевский Л.Н. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах. — К. : Техника, 1967. — 380 с.
6. Программный комплекс ГазКондНефть. <http://gas-condoil.com>

Поступила в редакцию 26.10.09

The Method and Program for Natural Gas Combustion Temperature Computation

Krushnevich S.P.

The Gas Institute of NASU, Kiev

The method for gas mixture burnin temperature calculation at set parameters taking into account influence of combustion products components dissociation is aduced. The program on the method basis is developed. The program allows to calculate smoked gases final temperature after their mixing with superfluous air and steam. The mixture serves for combustion chamber refrigeration.

Key words: adiabatic combustion temperature, dissociation, combustion chamber, gas turbine unit.

Received October 26, 2009