

В.В. Стерлигов, Е.С. Татаринова, И.В. Чикурова

Сибирский государственный индустриальный университет

МЕТОДИКА ВЫБОРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

Трудно до конца поверить в гипотезу о глобальном потеплении, когда на всей территории России за Уралом несколько недель наблюдаются аномально сильные морозы. Но именно эта недостаточно обоснованная гипотеза изменения климата Земли подняла вопрос о «парниковом эффекте», при котором выбросы продуктов сгорания могут создавать условия для поглощения части солнечного излучения, что и приводит к увеличению температуры атмосферы.

Проблема «парникового эффекта» стала настолько широко обсуждаемой, что уже никто не заботится о доказательности заявлений. Но значительный положительный результат такого широкого обсуждения – утверждение связи экологии с энергопотреблением и придание сверхважной и приоритетной роли энергосбережению. Явным доказательством этого явилось установление платы за выбросы диоксида углерода CO_2 , генерируемого при сжигании углеводородного топлива.

Плата за выбросы предприятий существует давно, но только для вредных веществ. Перечень таких выбросов представлен в специальной «Хрестоматии энергосбережения» [1], однако он не содержит CO_2 . Как показывает реальный опыт, даже руководители природоохранных предприятий часто не знают об этих платежах. А между тем в федеральной программе РФ [2] определена плата – 400 руб/т. Такие платежи лягут большим грузом на финансы очень большого числа предприятий и, прежде всего, металлургических, потребляющих огромное количество углеводородного топлива.

При таких условиях должен измениться подход любого предприятия к выбору топлива: необходимо учитывать не только традиционно используемые показатели, но и такие, как количество углекислого газа CO_2 и плата за его выбросы. В настоящее время при выборе топлива для обобщающей оценки используются показатели разных качественных категорий (стоимость, калорийность, условия доставки, условия хранения и др.). Все это определяет задачу по выбору топлива как логическую.

В работе [3] предложен новый подход комплексной оценки топлива: все качества используемого топлива представляются в стоимостном выражении, что делает их однородными и позволяет суммировать. Кроме того, используются удельные показатели, отнесенные к единице энергии (кДж, ккал), содержащейся в единице топлива. Это позволяет дать комплексную оценку топлива в стоимостном выражении и сводит весь процесс выбора топлива к определению минимального значения стоимости всех затрат в процессе использования единицы энергии. Такая операция легко подвергается компьютерному счету, сравнение всех возможных вариантов топливно-энергетических балансов (ТЭБ) сводится к определению минимального значения среди них.

Для оценки прогнозируемого количества углекислого газа CO_2 при сжигании того или иного топлива предложено [4] использовать баланс по углероду топлива. Из соотношения молекулярных масс $M_{\text{CO}_2} : M_a = 44 : 12 = 3,67$ следует, что 1 кг углерода при полном окислении производит 3,67 кг CO_2 , что справедливо для любого исходного состояния углеродного топлива (газ, уголь или мазут).

В настоящей работе представлена попытка объединить эти два подхода. Так как эмиссия углекислого газа CO_2 определяется только общей массой углерода всех используемых видов топлива, учитывающихся в ТЭБ завода, это несложно сделать на основе документов по составу каждого топлива. А поскольку комплексная оценка топлива делается на основе его теплоты сгорания, то необходимо найти общий способ определения теплотворной способности газового, жидкого и твердого топлив.

Обычно для расчета теплоты сгорания ($Q_{\text{н}}^{\text{p}}$) газообразного топлива используется детерминированное выражение, содержащее теплоту сгорания каждого компонента топлива [5]:

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 30,18 \text{ CO} + 25,79 \text{ H}_2 + 85,55 \text{ CH}_4 + 152,26 \text{ C}_2\text{H}_6 + 217,95 \text{ C}_3\text{H}_8 + 283,38 \text{ C}_4\text{H}_{10} +$$

$$+ 348,90 C_5H_{12} + 55,2 H_2S, \text{ ккал/м}^3. \quad (1)$$

Для твердого и жидкого топлива, когда химический состав неизвестен, а известно только содержание химических элементов в топливе, расчет теплоты сгорания проводится по уравнению регрессии: содержание элементов выступает в качестве фактора, а коэффициенты (коэффициенты регрессии) определяются из опыта [5]:

$$Q_n^p = 81C^p + 246 C^p - 26 (O^p - S^p) - 6W^p, \text{ ккал/кг}. \quad (2)$$

В практике расчетов по горению топлива уравнение (1) по расчету на основе химического состава топлива является более предпочтительным, а формула Д.И. Менделеева (2) используется в силу невозможности представить данные по содержанию химических соединений в угле и нефти. Но точность этой статистической модели и адекватность ее доказаны уже многими десятилетиями. Для рассматриваемой задачи, в которой в качестве исходной величины можно принять начальную массу углерода, формула Менделеева является вполне подходящей в случае, если будет дока-

зано, что теплоту сгорания газообразного топлива можно рассчитать по этой формуле. Этого еще никто не делал.

Сначала проверку возможности использования формулы Менделеева для газов нужно провести на «чистых» однородных газах, например, на метане CH_4 и его гомологах, что будет полезно для расчетов природного газа как смеси различных газов. Методика такого расчета представлена в работе [4].

По такой же методике были проведены расчеты для углеродсодержащих чистых газов, результаты представлены в табл. 1.

Результаты расчетов по аппроксимирующей модели показывают ее полную адекватность гипотезе, а значит, можно оценивать углеродный потенциал топлива независимо от его физического состояния.

Поскольку любое газообразное топливо представляет собой смесь «чистых» газов того или иного состава, то можно ожидать, что как для отдельного газа (природного, доменного, коксового), так и для их смеси можно принять предположенный подход расчета теплоты сгорания единицы топлива, а так же и тепловую мощность, располагаемую или потребленную.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчетов по проверке адекватности модели

№	Показатель	Газ					
		метан	этан	пропан	бутан	пентан	оксид углерода
1	Молекулярная масса, кг	16	30	44	58	72	28
2	Плотность, кг/м ³	0,714	1,339	1,964	2,589	3,214	1,25
3	Масса углерода	12	24	36	48	60	12
4	Содержание углерода, %	75,0	80,0	81,8	82,7	83,3	42,8
5	Содержание водорода, %	25,0	20	18,1	17,3	16,7	57,2
6	Кратность эмиссии CO_2 $\bar{m}_{CO_2}$, кг/кг	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67
7	Теплота сгорания (расчетная) $Q_{н(р)}^p$, ккал/кг	12225	11400	11480	10957	10855	2422
8	Теплота сгорания $Q_{н(в)}^p$, ккал/м ³	8732	15268	22546	28371	34888	3028
9	Теплота сгорания (справочная) $Q_{н(с)}^p$, ккал/кг	8550	13370	22350	29510	92756	3050
10	Невязка интерпретации, %	+2,12	-0,66	+0,87	+1,8	+6,5	-0,72

Состав исследуемого газового топлива

Топливо (газ)	Содержание, % (объемн.)									
	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C _m H _n	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O
Доменный	25,33	0,9	0,12	–	–	–	14,07	0,18	57,1	2,3
Коксовый	6,40	55,5	24,6	–	–	2,00	2,00	0,8	6,4	2,3
Природный	–	–	88,37	2,72	0,92	–	4,39	–	2,05	0,5
Коксодоменная смесь	24,6	7,60	2,70	–	–	0,20	11,0	0,1	51,5	2,3

Вместе с тем для большей и полной доказательности предлагаемого подхода необходимо выполнить расчеты для реальных газов. Основная цель проводимого расчета на основе углеродного потенциала – возможность прогнозировать эмиссию углекислого газа CO₂ при сжигании природного газа. При этом используется понятие «удельная эмиссия», отнесенная к единице тепловой энергии (ккал, кДж).

Чтобы доказать возможность определения углеродного потенциала (масса углерода в исходном газообразном топливе), были проведены расчеты по литературным данным, представленным в таблице VII-II «Справочника конструктора печей прокатного производства» [7]. Состав рассмотренных топлив показан в табл. 2.

Ниже представлен пример расчета определения потенциала доменного газа.

Исходя из состава топлива, определим объем углеродсодержащих компонентов на 1 м³ газа:

$$V_{CO} = \frac{\%CO_2}{100} = \frac{25,33}{100} = 0,2533 \text{ м}^3;$$

$$V_{CH_4} = 0,0012 \text{ м}^3;$$

$$V_{CO_2} = 0,1407 \text{ м}^3.$$

Определим количество газа:

$$N_{CO} = \frac{V_{CO}}{22,4} = \frac{0,2533}{22,4} = 0,011 \text{ кмоль};$$

$$N_{CH_4} = 0,00005 \text{ кмоль};$$

$$N_{CO_2} = 0,0063 \text{ кмоль}.$$

Следовательно, можно рассчитать массу углерода:

$$m_{CO} = N_{CO} \cdot 12 = 0,132 \text{ кг};$$

$$m_{CH_4} = 0,00062 \text{ кг};$$

$$m_{CO_2} = 0,0756 \text{ кг}.$$

Общая масса углерода составит $\Sigma m = m_{CO} + m_{CH_4} + m_{CO_2} = 0,2076 \text{ кг}$.

Для проверки правильности расчета используем материальный баланс горения по углероду. Из расчета горения этого топлива [7] объем углеродсодержащего углекислого газа в продуктах сгорания $V_{CO_2} = 0,385 \text{ м}^3/\text{м}^3$; количество газа – $N_{CO_2} = 0,0172 \text{ моль}$, масса углерода $m'_C = 0,2064 \text{ кг}$.

Невязка баланса составит

$$\Delta = \frac{\Sigma m - m'_C}{\Sigma m} 100 \% =$$

$$= \frac{0,2076 - 0,2064}{0,2076} 100 \% = 0,57 \%$$

Такое значение невязки можно считать приемлемым и подтверждающим предложенную методику определения углеродного потенциала. По такой же методике были рассчитаны балансы для других топлив, сходимость оказалась такой же.

Признание возможным использовать регрессионную модель на основе элементарного анализа для определения теплоты сгорания газообразного топлива открывает новые возможности и подходы к сертификации горючих газов, и в первую очередь – природного газа, передаваемого в больших количествах и на огромные суммы на экспортных операциях.

В настоящее время, когда в соответствии с общепринятой методикой теплота сгорания природного газа определяется на основе химического анализа (1), для заполнения сертификата газа поставщику требуется содержать дорогостоящую лабораторию для проведения сложного химического анализа по определению содержания того или иного углеводорода, равно как и других ингредиентов природного газа. Это увеличивает стоимость газа для поставщика и еще в большей степени для потребителя, финансовые возможности которого значительно меньше, чем у поставщика.

При использовании предлагаемого подхода необходимо знать содержание элементов (углерода С, водорода Н и реже серы S); эти данные можно получить при сжигании анализируемого газа в калориметрической бомбе или в калориметре. При строгом пропорционировании газа-окислителя (воздуха или кислорода) легко определить в продуктах сгорания содержание газов CO_2 , H_2O и SO_2 даже с помощью недорогих газоанализаторов, работающих на принципе поглощения этих оксидов специальными веществами. Содержания углерода, водорода и серы в исходном газе легко рассчитать по соотношениям молекулярных масс.

Количество определяется по следующим отношениям:

$$m_{\text{C}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{3,67}; \quad m_{\text{H}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{9}; \\ m_{\text{S}} = \frac{m_{\text{SO}_2}}{32}.$$

Такой способ сертификации при поставках и контроль при покупке природного газа делает их доступными для любого потребителя, особенно, если расчет за поставки газа производить не по объемам, а по поставленной энергии, что является наиболее правильным.

Выводы. Доказана возможность производить выбор топлива разного рода (газ, уголь, мазут) на основе использования удельных стоимостных показателей, показывающих затраты на единицу выделенной энергии (ккал, кЖд). Для оценки возможной удельной эмиссии выбросов диоксида углерода на основе массы углерода газообразного топлива предложено использовать формулу Менделеева для расчета теплоты сгорания твердого топлива. Правильность гипотезы подтверждена расчетами. Практическим выводом из этой ситуации может быть выработка предложений по созданию

нового ГОСТа для экспериментального определения теплоты сгорания газообразного топлива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Хрестоматия энергосбережения. Справочник в 2 кн. / Под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплоэнергетик, 2003. – 688 с.
2. Государственная программа РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года». Утверждена Постановлением правительства РФ от 27.12.10. № 2446-р.1.
3. Стерлигов В.В., Козлова Н.Е., Абдыкалык Т.Е. Комплексная стоимостная оценка энергоэкологического качества топлива // Вестник СибГИУ. 2017. № 2 (20). С. 60 – 64.
4. Стерлигов В.В., Татарина Е.С., Чикурова И.В. Прогнозирование эмиссии диоксида углерода на основе углеродного потенциала топлива // Вестник СибГИУ. 2017. № 1 (19). С. 54 – 58.
5. Семикин И.Д., Аверин С.И. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1965. – 392 с.
6. Казанцев Е.И. Промышленные печи. – М.: Металлургия, 1964. – 451 с.
7. Бергауз А.Л., Гусовский В.Л. Справочник конструктора печей прокатного производства. Т. 1. / Под ред. В.М. Тымчака. – М.: Металлургия, 1969. – 570 с.

© 2018 г. В.В. Стерлигов, Е.С. Татарина,
И.В. Чикурова

Поступила 12 марта 2018 г.