

УДК 669.1

В.В. Стерлигов, Н.Е. Козлова, Т.Е. Абдыкалык

Сибирский государственный индустриальный университет

**КОМПЛЕКСНАЯ СТОИМОСТНАЯ ОЦЕНКА
ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ТОПЛИВА**

Один из основных вызовов современному обществу в глобальных масштабах – это возможность потепления климата Земли. И почти единогласно все определяют причиной этого «парниковый эффект», возникающий на способности некоторых газов, входящих в состав атмосферы, поглощать волны инфракрасной части спектра солнечного света, которая переносит энергию теплового излучения.

Существует даже формальный перечень парниковых газов. Согласно данным работы [1] к ним относятся: диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4), озон и другие газы. Как следует из теплофизики [2], способностью практического поглощения тепловой энергии обладают газы, имеющие в своем составе три и более атомов, и хотя вода, вернее, водяные пары (H_2O) попадают под это определение, вода не включена в этот список в силу быстрого исчезновения из атмосферы в виде жидкости (дождя).

В различных источниках [3 – 5] объемная доля каждого из парниковых газов по содержанию в атмосфере оценивается по-разному:

CO_2 – 0,0314 % [3]; 0,0393 – 0,0397 % [4]; 0,03 – 0,05 % [5];

CH_4 – 0,0002 % [3]; 0,01985 [4]; 0,018 [5];

Озон – 0 – 0,000002 % [3]; 0,000001 [5].

Несмотря на то, что эти данные немного различаются между собой, следует признать общие тенденции в ранжировании данных по каждому газу. Наибольший вклад вносит диоксид углерода CO_2 , который на 70 % [5] имеет антропогенное происхождение.

Источником диоксида углерода является углеводородное топливо, которое используется при сжигании для различных целей, и генерирует CO_2 при окислении углерода кислородом. Поэтому самым действенным путем снижения эмиссии CO_2 является уменьшение объемов сжигаемого топлива. Но так как в настоящее время человечество 70 % потребляемой энергии использует в виде теплоты, генерируемой при сжигании топлива [6], то отказаться от использования топлива невозможно, и

единственным путем как-то решить эту проблему является ограничение выбросов CO_2 путем энергосбережения, т.е. рационализация потребления топлива. Это и указано в ст. 2 п. 5 Киотского протокола [7], принятого в 1997 году как основного директивного документа по выполнению Рамочной конвенции по изменению климата [8], утвержденной в 1991 году в Рио-де-Жанейро.

Этот документ впервые ввел экономическую ответственность за выбросы CO_2 и установил квоты на его выбросы, которые каждая страна должна уменьшить в соответствии с приложением к Киотскому протоколу. Россия отстояла права сохранить выбросы на прежнем уровне ввиду регенерирующего действия сибирских лесов на состав атмосферы. С другой стороны, глубокое падение производства в начале XXI века позволило России не превышать квоты. Поскольку правовые положения Киотского протокола прекратили свое действие в 2012 году, в настоящее время запущен механизм создания нового, так называемого Посткиотского документа. В декабре 2015 года в Париже состоялся экологический саммит, где главы 192 государств подписали соглашение [9], в котором закреплена политическая воля участников саммита продолжить борьбу с «парниковым эффектом».

Эта общая глобальная реакция на выбросы CO_2 начинает проявляться и в России, хотя медленно и с запозданием. Примером этого может служить перечень газов [10], за выбросы которых установлена плата. Среди них нет CO_2 , хотя во всем мире такая величина существует и по разным данным колеблется в широких пределах от 12 до 15 \$ за тонну. На федеральном уровне в России тоже существует такая неопределенность. Так, в работе [10] эта величина определена в 25 \$ за тонну выбросов. Между тем, имеется косвенное доказательство существования такой нормы в подпрограмме федеральной программы энергосбережения [11]. В этом документе представлена цифра 400 руб./тонну CO_2 , что резко отличается от всех вышеприведенных данных.

Все это определяет низкий уровень решения проблемы парникового эффекта в нашей стране. Международные тенденции и готовность Российской Федерации интегрироваться в общемировой процесс требуют уже сейчас готовиться к работе по этой проблеме, изучать имеющуюся информацию и проводить новые исследования, чему и посвящена настоящая работа.

Тот очевидный факт, что количество выбросов CO_2 зависит от объема энергопотребления, а следовательно и от количества сжигаемого топлива, определяет приоритет энергосбережения перед экологией. Принцип: «Меньше сжигаешь топлива, меньше имеешь выбросов» и привел к предложению режима энергосбережения для обеспечения уменьшения объемов выбросов CO_2 .

С другой стороны, количество выбросов связано с массой потребления топлива через выражение

$$V = C_m \cdot M \quad (1)$$

где V – объем выбросов, м^3 ; M – масса сжигаемого топлива, кг; C_m – коэффициент пропорциональности, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Если показатель M является экстенсивным параметром, связанным с размерами, количеством, то величина C_m является мерой интенсивности, показывающей удельную, т.е. приходящуюся на единицу величину. Она более представительна и объективна, т.к. является показателем процесса, а не его размеров, масштабов. Очевидно, что величина $C_m = V/M$ должна быть постоянной мерой в этом соотношении.

Но так как сжигание топлива производится с целью обеспечения какой-то тепловой мощности, то более показательным будет величина

$$C_q = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

В свою очередь $Q = Q_H^p M$, где Q_H^p – теплота сгорания единицы топлива ($\text{ккал}/\text{кг}$, $\text{ккал}/\text{м}^3$).

Окончательно после подстановки имеем

$$C_q = C_m M / (Q_H^p M) = C_m / Q_H^p, \text{ м}^3/\text{ккал}, \text{ м}^3/\text{кДж}. \quad (3)$$

Полученная величина является показателем эмиссии диоксида углерода CO_2 , м^3 на 1 ккал (кДж), содержащихся в топливе, она служит мерой интенсивности. Считаем, что эта величина является принципиально новой характеристикой топлива, которая как и известные

теплотехнические показатели – теплота сгорания Q_H^p и стоимость единицы топлива, определяет экологическое качество.

Для получения сравнительных характеристик различных топлив по эмиссии CO_2 лучше всего использовать этот показатель. Сравнивая топлива по этому параметру, можно к стоимостной и термохимической их оценке топлива добавить экологическую. При этом можно сравнивать топлива различных агрегатных состояний: и газ, и мазут, и уголь, которые используются, например, в металлургии, являющейся наиболее энергоемкой и распространенной.

В отечественной металлургии используются доменный, коксовый и природный газы, а также их смеси – коксо-доменный, природно-доменный и коксо-природный.

Для получения величины C_q , которая показывает количество CO_2 в м^3 на 1 ккал исследуемых топлив, была проведена обработка литературных данных по расчету горения этих топлив [12]. Данные расчетов содержали все необходимые величины для выполнения контрольных расчетов: состав топлива, теплоту сгорания, состав и объем продуктов сгорания, включая CO_2 . Все параметры были рассчитаны при коэффициенте расхода воздуха $\alpha_r = 1$, хотя для подтверждения правильности обсуждаемого подхода для оценки экологического качества топлива это не имеет значения.

Результаты расчетов представлены на рисунке сплошной линией, где можно видеть несколько зон для различных топлив:

I – коксо-доменная смесь, зона, в которой существует гиперболическая функция $C_q = f(Q)$, в эту зону входят газы со следующими значениями Q_H^p : доменный газ с $Q_H^p = 800 - 1000 \text{ ккал}/\text{м}^3$, коксо-доменный с $Q_H^p = 1200 - 3500 \text{ ккал}/\text{м}^3$, коксовый с $Q_H^p = 4100 \text{ ккал}/\text{м}^3$;

II – природно-доменный (обозначено «звездочкой»);

III – природный газ (чистый газ и смесь с коксовым: природно-коксый с $Q_H^p = 6400 - 7200 \text{ ккал}/\text{м}^3$, природный с $Q_H^p = 8400 - 9100 \text{ ккал}/\text{м}^3$);

IV – попутный нефтяной газ.

Для проверки результатов, основанных на литературных данных, были проведены собственные расчеты для доменного и коксового газов ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». Результаты этих расчетов приведены в табл. 1 и 2.

Для того, чтобы найти вводимый параметр C_q , расчеты были проведены для составов кок-

со-доменной смеси при шести различных значениях теплоты сгорания.

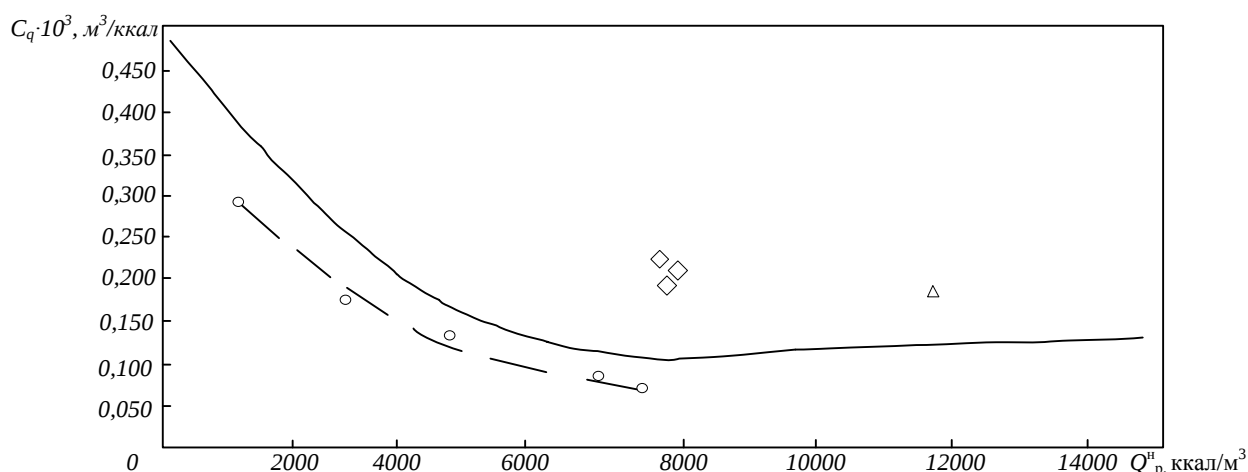
Эти результаты представлены штриховой линией на рисунке. Как видно, точки хорошо повторяют кривую, построенную по литературным данным, что подтверждает предлагаемую модель оценки эмиссии CO_2 как функции теплоты сгорания Q_{H}^{P} .

Проверка этой модели для жидкого (мазута) и твердого (угля) топлива представлена на рисунке (точки обозначены «ромбами»). Для $Q = 10038$ ккал/кг определена точка («треугольник») для мазута по данным [10], в качестве

твердого топлива были рассмотрены энергетические угли Кузнецкого бассейна [14].

Исходные составы углей представлены в табл. 3, а результаты расчетов в табл. 4.

Расчеты показывают сходимость результатов, что указывает на общность модели эмиссии CO_2 для различных марок углей, а проверка статистической гипотезы об однородности дисперсии на основе критерия Кохрена [15] подтвердила правильность этой гипотезы. Расчеты еще девяти различных случаев (по трем месторождениям для трех марок углей) тоже не выявили расхождений для разных марок угля.



Сравнение полученных данных

Т а б л и ц а 1

Состав газов АО «ЕВРАЗ ЗММК» [13]

Газ	Содержание, %							
	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	Σ
Коксовый	58,2	8,4	24,3	2,0	2,4	0,4	4,3	100,0
Доменный	2,3	29,0	0,2	–	13,1	–	55,4	100,0

Т а б л и ц а 2

Параметры горения газов АО «ЕВРАЗ ЗММК»

Газ	Параметр					
	L ₀ , м ³ /м ³	V ₀ , м ³ /м ³	V _{CO2} , м ³	CO ₂ , %	C _q	Q _H ^P , ккал/м ³
Доменный	76,43	161,18	42,3	26,24	0,422	951
Коксовый	418,56	551,86	47,5	8,618	0,473	4109

П р и м е ч а н и е. L₀ – расход воздуха на горение, V₀ – объем продуктов сгорания; V_{CO2} – объем CO₂ в продуктах сгорания; CO₂ – процентное содержание CO₂ в продуктах сгорания; C_q – количество CO₂, м³ на 1 ккал исследуемого топлива; Q_H^P – теплота сгорания топлива.

Таким образом, доказана возможность и целесообразность использовать показатель эмиссии CO₂, отнесенный к экологической

ценности топлива наряду с натуральными (Q_H^P) и стоимостными (цена) показателями. Причем такой подход, когда оценка качества

относится к единице энергии (ведь покупают ее, а не топливо) может быть использована для любого составляющего компонента продуктов сгорания и, прежде всего вредных, таких как NO_x , SO_2 , бенз(а)пирен и другие.

Ценность предложенного подхода увеличивается, если перейти к стоимостной форме

этой удельной характеристики. Для эмиссии CO_2 это может быть получено в соответствии со следующим выражением:

$$C_{\text{CO}_2} = \rho C_q P \cdot 10^{-3}, \text{ руб/кДж.}$$

Т а б л и ц а 3

Состав энергетических углей

Наименование шахты	Содержание, %						
	C ^p	H ^p	S ^p	O ^p	N ^p	W ^p	A ^p
Уголь марки «Д»							
Им. Ярославского (ДСШ)	58,79	4,19	0,37	9,57	1,87	12,00	13,20
Инское шахтоуправление (ДКМ)	66,25	4,80	0,22	9,50	1,94	8,50	7,32
Им. Ярославского (ДР)	61,01	4,39	0,30	10,10	1,94	11,00	10,68
Уголь марки «Г»							
Полысаевская (ГКОМ)	70,05	5,10	0,30	7,55	1,94	6,00	7,52
Октябрьская (ГР)	61,82	4,48	0,37	8,23	2,02	8,00	14,72
Им. Кирова (Г+ГР)	59,05	4,30	0,82	6,88	2,09	10,00	17,10
Уголь марки «Т»							
Листвянская (ТОМСШ)	69,55	3,32	0,45	2,24	1,50	7,00	15,81
Шушлулепская (ТОМСШ)	66,68	2,72	0,67	2,24	1,35	8,00	18,40
Михайловский участок (ТРОК)	64,47	2,61	0,45	5,46	1,72	10,00	15,30

Т а б л и ц а 4

Результаты расчетов горения угля (усредненные значения при коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 1$)

Марка угля	CO_2		N	$Q_{\text{н}}^{\text{p}}$	C_q
	м ³	кг	моль	ккал/кг	м ³ /ккал
«Д»	1,15	2,28	190	4816,23	0,238
«Г»	1,18	2,34	195	6066,47	0,194
«Т»	1,24	2,45	204,6	6010,41	0,206

Умножая величину C_q , м³/кДж, на плотность ρ , кг/м³, получим массу выбрасываемого CO_2 , кг/кДж, поскольку плата P за выбросы устанавливается за массу (конкретно руб/т). Показатель 10^{-3} указывает перевод массы из килограммов в тонны.

Но точно так же можно определить стоимость 1 кДж в топливе по выражению

$$C_Q = \frac{C_Q \cdot 10^{-3}}{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}, \text{ руб/кДж,}$$

где C_Q – цена топлива (угля), руб/т; $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ – теплота сгорания, кДж/кг.

Аналогично можно определить удельные затраты на транспортировку топлива, его хранение и переработку, сжигание и т.д.

В результате получим аддитивную совокупность характеристик, имеющих стоимост-

ный характер, что позволяет их складывать. Это создает возможность формальной оценки для разных топлив по величине общей стоимости единицы энергии в соответствии с выражением

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n C_i,$$

где C_i – удельная стоимость затрат по отдельным признакам, руб/кДж.

Таким образом станет возможным формировать сравнение качеств топлива, переводя всю процедуру на компьютерное определение отдельных видов затрат. В этом случае можно сравнивать различные топлива с детальной оценкой затрат по их реализации. При таком подходе, вероятно, наиболее приемлемым бу-

дет топливо с минимальной величиной общих затрат.

Выводы. Доказана рациональность введения удельных оценок параметров топлива, т.е. отнесенных к единице энергии. На основе этого подхода предложена методика получения комплексного стоимостного показателя энергоэкологической стоимости топлива, позволяющая компьютеризировать оценку качества топлива по минимальным удельным затратам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кокорин А.О., Сафонов Г.В. Что будет после Киотского соглашения. – WWF России: GOF, 2007. – 24 с.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплотеплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
3. Информационный портал Grandars.ru. Электронный ресурс. – [Режим доступа]: <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/sostav-atmosfery.html> (Дата обращения 15 марта 2017 г.).
4. Информационный портал Wonderful Planet. Электронный ресурс. – [Режим доступа]: <http://wonderful-planet.ru/atmosfera/97-atmosfera-zemli.html?start=7> (Дата обращения 15 марта 2017 г.).
5. Экобаланс. Независимая экологическая экспертиза. Электронный ресурс. – [Режим доступа]: <http://ekobalans.ru/investigations/uglekislyiy-gaz> (Дата обращения 15 марта 2017 г.).
6. Проценко А.Н. Энергетика сегодня и завтра. – М.: Молодая гвардия, 1987. – 220 с.
7. Интернет-сайт для консультант по практическому исследованию механизмов Киотского протокола. Электронный ресурс. – [Режим доступа]: www.carbonmarketsolutions.com (Дата обращения 15 марта 2017 г.).
8. Рамочная конвенция ООН об изменении климата. Нью-Йорк. 9 мая 1992 г.
9. Парижское соглашение об изменении климата, 15.12.2015 г. Париж. Интернет-сайт. Электронный ресурс. – [Режим доступа]: www.ipcc.ch (Дата обращения 15 марта 2017 г.).
10. Лисиенко В.Г. Хрестоматия энергосбережения. В 2-х кн. – М.: Теплоэнергетик, 2003. – 688 с.
11. Государственная Программа РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» (утверждена распоряжением Правительства РФ от 27.12.2010 г. «2446-р).
12. Справочник конструктора печей прокатного производства. Т. 1 / Под ред. В.М. Тымчака. – М.: Металлургия, 1970. – 575 с.
13. Самохвалов Г.В. Учебно-методическое пособие по проектированию металлургических печей. – Новокузнецк: изд. СМИ, 1991. – 107 с.
14. Энергетическое топливо СССР: (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий газ). Справочник / Матвеева И.И., Новицкий Н.В., Вдовченко В.С. и др. – М.: Энергия, 1979. – 128 с.
15. Вентцев Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1973. – 364 с.

© 2017 г. В.В. Стерлигов, Н.Е. Козлова,
Т.Е. Абдыкалык

Поступила 23 марта 2017 г.