

В.В. Стерлигов, Е.С. Татаринова, И.В. Чикурова**Сибирский государственный индустриальный университет****ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НА ОСНОВЕ
УГЛЕРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТОПЛИВА**

В существующих оценках экологической ситуации в мире все чаще начинают доминировать пессимистические прогнозы. И это относится не только к зарубежным средствам медиа. В России, и что еще важнее для нас – в Кузбассе, появляются материалы, предрекающие бедственную экологию угольного Кузбасса. Написанные непрофессионалами, такие публикации могут возбудить негативную реакцию у неподготовленных читателей.

Между тем, дело не обстоит так трагически и в этот период нужна объективная наилучшая информация, которая, признавая ситуацию нелегкой, искала бы и предлагала пути решения этой проблемы. В базовом документе, созданном международным сообществом по проблеме потепления климата, так называемой «Рамочной конвенции по изменению климата» (РКИК) [1], в п. 2 записано положение о предосторожности, которое призывает человечество изыскивать средства, даже если они еще научно и не представлены. Это определяют сверхактуальности любой работы, направленной на решение глобальной проблемы парникового эффекта.

В другом документе, созданном для реализации РКИК, так называемом «Киотском протоколе» [2], в ст. 5 содержится определение основной меры борьбы с потеплением, вызванным парниковым эффектом, – это энергосбережение, приводящее к снижению выбросов парниковых газов, которое может быть достигнуто за счет прямого уменьшения потребления топлива и особенно угля. На наш взгляд, – это примитивное и даже вульгарное решение за счет экстенсивного фактора. Но поскольку обществу для функционирования во всех своих областях необходима энергия, то более рациональным является разработка и внедрение новых способов использования топлива, которые бы давали пониженную эмиссию диоксида углерода – основного представителя парниковых газов.

Активность международного общества по этим энергоэкологическим проблемам до Рос-

сии еще не дошла. Достаточно сказать, что не все специалисты по защите атмосферы знают, что в России, как давно уже во всем мире, введена плата за выбросы диоксида углерода. Но если посмотреть один из наиболее авторитетных источников по энергоэкологическим проблемам [3], то в нем указана плата за выбросы SO_2 , NO_x и др., а за CO_2 ее нет.

В том же Киотском протоколе отмечена необходимость вести учет выбросов CO_2 , но пока в России в этом направлении практически ничего не делается. Поскольку страна взяла на себя обязательство продолжить работу по уменьшению выбросов CO_2 , подписав в декабре 2015 г. Парижское соглашение [4], то необходимо готовиться к выполнению этих обязательств.

В настоящей работе представлена попытка упростить определение объемов эмиссии CO_2 на основе элементарного состава (то есть по содержанию отдельных химических элементов) в противоположность расчету по химическому составу, определение которого трудоемко и не всегда доступно на любом предприятии.

Расчет теплоты сгорания газообразного топлива по содержанию элементов***Расчетные зависимости для определения теплоты сгорания Q_n^p топлива***

Для газообразного топлива из теории горения [5] известно уравнение для определения теплоты сгорания:

$$Q_n^p = 39,847\text{CH}_4 + 107,43\text{H}_2 + 122,63\text{CO} + \\ + 63,790\text{C}_2\text{H}_4 + 590,59\text{C}_2\text{H}_4 + \\ + 942,81\text{C}_3\text{H}_8, \text{ кДж/м}^3, \quad (1)$$

где CH_4 , H_2 , CO , C_2H_4 , C_3H_8 – процентное содержание компонентов топлива.

Следует отметить, что это уравнение является детерминированным, т.е. определенным на строгом соответствии законам физики и

химии. Аддитивная структура его определена отсутствием взаимодействия при горении различных компонентов. Численные коэффициенты учитывают тепловой эффект полного окисления.

Для твердых и жидких топлив в источнике [5] можно найти разные формулы, но наиболее употребляемой является так называемая «формула Менделеева»:

$$Q_H^p = 339C^p + 1030H^p - 109(O^p - S^p) - 25W^p, \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

где C^p , H^p , O^p , S^p , W^p – содержание на рабочую массу отдельных химических элементов.

Это уравнение регрессии, устанавливающее связь на основе статистических материалов. Аддитивный характер объясняется также независимостью горения отдельных элементов. Численные коэффициенты получены путем статистически обработанных результатов наблюдений.

В отличие от первой модели, где четко известно, какой элемент в комбинации с другим составляет то или иное вещество, количество которого нужно точно знать, как и тепловой эффект его окисления, вторая модель не предполагает знания комбинаций элементов, в ней нет сведений об их тепловых реакциях и т.д. Для этой модели нет необходимости в химическом анализе газа.

Нами была предложена идея об использовании удельной величины выбросов на единицу энергии (c). Этот подход позволяет подобрать не просто богатое топливо, а такое, которое будет давать при этом меньше выбросов. Величина c определяется так:

$$c = \frac{m_{CO_2}}{Q_H^p}, \text{ кг/кДж}. \quad (3)$$

Поэтому важно быстро и оперативно определять значения Q_H^p . Очевидно, что вторая модель для твердого и жидкого топлива имеет преимущества. В дальнейшем твердое топливо будем называть уголь, а газообразное – газ.

Выдвигается гипотеза о том, что теплоту сгорания газообразного топлива и эмиссию углекислоты можно рассчитывать по более простой модели, используемой для угля. Для ее доказательства рассмотрим расчеты отдельных видов топлива.

Расчет горения чистого метана (100 % CH_4)

Как следует из второй модели, необходимо знать процентное содержание в метане углерода. Из формулы метана (CH_4) видно, что масса С составляет 12 кг/кмоль, масса H_2 – 4 кг/кмоль, или в процентном соотношении 75 % С и 25 % H_2 .

Подставляя эти значения в формулу (2), найдем

$$(Q_H^p)_1 = 339 \cdot 75 + 1030 \cdot 25 = 51775 \text{ кДж/кг}.$$

Если рассчитать теплоту сгорания по формуле (1), получим

$$(Q_H^p)'_1 = 35847 \cdot 100 = 35847 \text{ кДж/м}^3.$$

Чтобы привести расчет этой величины к 1 кг, необходимо поделить результат на плотность метана $\rho = 16/22,4 = 0,714 \text{ кг/м}^3$, откуда получим

$$(Q_H^p)_2 = \frac{(Q_H^p)'}{\rho} = \frac{35847}{0,714} = 50206 \text{ кДж/кг}.$$

Расчет горения чистого пропана (100 % C_3H_8)

Из химической формулы C_3H_8 имеем 81,81 % С и 18,19 % H_2 . Плотность пропана $\rho = 44/22,4 = 1,96 \text{ кг/м}^3$.

По второй модели получим

$$(Q_H^p)_2 = 339 \cdot 81,81 + 1030 \cdot 18,19 = 46469 \text{ кДж/кг} = 46,469 \text{ МДж/кг}.$$

Если рассчитать эту же величину по химическому составу, то получим

$$(Q_H^p)'_1 = 91,981 \cdot 100 = 91981 \text{ кДж/м}^3 = 91,981 \text{ МДж/м}^3.$$

Пересчитаем эту величину на 1 кг газа, в результате имеем

$$(Q_H^p)_1 = \frac{(Q_H^p)'}{\rho} = \frac{91981}{1,96} = 46929 \text{ кДж/кг} = 46,929 \text{ МДж/кг}.$$

Расчет газовой смеси

Состав топлива представлен 85 % CH_4 , 10 % C_2H_4 , 3 % N_2 , 2 % CO .

Теплота сгорания этого топлива (по первой модели) определяется как

$$\begin{aligned} (Q_{\text{H}}^{\text{p}})'_1 &= 35,847 \cdot 85 + 63,790 \cdot 10 + 2,263 \cdot 2 = \\ &= 37094 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Представим аппроксимирующий расчет (на 1 кг):
плотность газа составит

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ан}} &= \frac{\sum m_i r_i}{22,4} = \\ &= \frac{\% \text{CH}_4 \cdot 16 + \% \text{C}_2\text{H}_4 \cdot 30 + \% \text{N}_2 \cdot 28 + \% \text{CO} \cdot 28}{22,4} = \\ &= 0,7585 \text{ кг/м}^3; \end{aligned}$$

масса водорода

$$m_{\text{H}} = m_{\text{C}_2\text{H}_4} + m_{\text{C}_2\text{H}_2} = 0,183, \text{ кг};$$

масса углерода

$$m_{\text{C}} = m_{\text{C}_2\text{H}_4} \cdot m_{\text{C}_2\text{H}_2} + m_{\text{CO}} = 0,5384, \text{ кг};$$

массовая доля углерода в топливе

$$\% \text{C} = \frac{m_{\text{C}}}{\rho_{\text{Г}}} \cdot 100 = 71,65 \%;$$

доля водорода в газовом топливе

$$\% \text{H} = \frac{m_{\text{H}_2}}{\rho_{\text{Г}}} \cdot 100 = 24,12 \%;$$

доля азота в газовом топливе

$$\% \text{N}_2 = \frac{m_{\text{N}_2}}{\rho_{\text{Г}}} \cdot 100 = 4,34 \%;$$

доля кислорода в газовом топливе

$$\% \text{O}_2 = \frac{m_{\text{O}_2}}{\rho_{\text{Г}}} \cdot 100 = 0,49 \%,$$

что в сумме составит

$$\Sigma = 71,65 + 24,12 + 4,34 + 0,49 = 100 \%.$$

В пересчете на 1 кг газа имеем

$$\begin{aligned} (Q_{\text{H}}^{\text{p}})_1 &= \frac{Q_{\text{H}}^{\text{p}}}{\rho_{\text{Г}}} = \frac{37084}{0,7585} = 48904 \text{ кДж/кг} = \\ &= 48,9 \text{ МДж/кг}. \end{aligned}$$

При аппроксимирующем расчете теплоты сгорания газа по формуле Менделеева получим

$$\begin{aligned} (Q_{\text{H}}^{\text{p}})_2 &= 39 \cdot 71,05 + 1030 \cdot 24,12 = 24085 + 24843 = \\ &= 48928 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Для всех трех случаев была определена погрешность аппроксимации по формуле:

$$\Delta Q = \frac{(Q_{\text{H}}^{\text{p}})_1 - (Q_{\text{H}}^{\text{p}})_2}{(Q_{\text{H}}^{\text{p}})_1} = 100 \%.$$

За базовую взяли величину Q_{H}^{p} , рассчитанную по формуле (1).

Для всех трех случаев ошибка составила: $\Delta Q_{\text{CH}_4} = -1,93 \%$, $\Delta Q_{\text{C}_3\text{H}_8} = +1,4 \%$, для смеси газов $-0,7 \%$, что является приемлемым уровнем ошибки для предлагаемой упрощенной методики расчета величины Q_{H}^{p} .

Алгоритм расчета удельной оценки топлива

Поскольку гипотеза о применимости элементарного состава для расчета теплоты сгорания принята для газообразных топлив, то ее можно использовать для оценки потенциала эмиссии углекислоты и определения удельной величины выбросов m_{CO_2} , отнесенной к единице выделенной энергии, т.е.

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{Q_{\text{H}}^{\text{p}}}.$$

Это выражение является ключевым, и предлагается следующий алгоритм для действующего теплотехнического агрегата.

1. Определяется тепловая мощность агрегата N , кВт. Как правило она известна даже на стадии проектирования, поэтому предлагаемая методика выбросов CO_2 может использоваться как для прогнозирования эмиссии, так и при исследовании действующих агрегатов;

2. Рассчитывается потребное количество энергии на основе нормативных или практических данных по работе агрегата:

$$E = eN, \text{ кВт},$$

где e – нормативный удельный показатель расхода энергии на единицу продукции;

3. Осуществляется выбор топлива, если существует возможность разных вариантов, и определяется его расход G , кг/с (т/ч):

$$G = \frac{E}{Q_{\text{H}}^{\text{p}}}, \text{ кг/с (м}^3\text{/с)};$$

здесь Q_{H}^{p} – теплота сгорания топлива, кДж/кг (кДж/м³);

4. По составу топлива (угля) определяется масса углерода M_C

$$M_C = G \cdot \%C, \text{ кг/с};$$

5. По формуле (2) определяют величину Q_H^p .

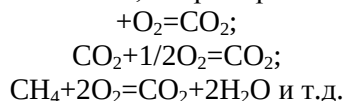
В случае использования газового топлива массу углерода рассчитывают суммированием вкладов всех углеродсодержащих компонентов топлива, т.е.

$$M_C = \sum_{i=1}^n M_{C_i},$$

что возможно при знании состава топлива.

Определение массовой эмиссии CO_2

В основе расчета лежит материальный баланс горения любого углеродсодержащего компонента топлива, например



Из этих уравнений реакций следует, что для любого углеводорода при полном горении (а в действующем теплотехническом агрегате конечно необходимо добиваться полного сжигания топлива) 1 атом С генерирует 1 молекулу

CO_2 ; соотношение масс $\frac{m_{CO_2}}{m_C} = 44/12 = 3,67 =$

const. Это дает возможность определить прогнозируемый выброс углекислоты:

$$M_{CO_2} = 3,67 \cdot M_C, \text{ кг/с},$$

и наоборот

$$M_C = \frac{M_{CO_2}}{3,67}.$$

Для определения содержания углерода (% по массе в топливе) достаточно произвести сжигание топлива и по содержанию CO_2 в продуктах сгорания определить содержание углерода в топливе и его массу.

Если предполагается выбор топлива, то эти расчеты необходимо провести для каждого из них.

В настоящее время топливо оценивается по трем позициям:

- энергетическая ценность Q_H^p , кДж/кг;
- финансовая стоимость (угля) Π , руб/кг;
- экологическое качество Σm_C , кг/кг.

Сравнивать эти различные по природе показатели сложно, тем более, что тут возможны

разногласия: топливо ценное, но дорогое, много выбросов; топливо богатое, цена удовлетворительная, много выбросов и др. Поэтому следует найти такой способ оценки ценности топлива, чтобы получать однородные показатели для оценки разных сторон качества топлива. Давно известен единый эквивалент разных товаров и показателей – это цена, стоимость. При использовании топлива в качестве основной учетной единицы нужно принять стоимость, те или иные затраты и эффекты, отнесенные к единице поставленной энергии. Это значит, что все затраты оценки должны иметь размерности руб/кДж.

Выводы. Концепция комплексной стоимостной оценки может быть использована для многих других случаев. При этом в качестве удельной единицы, по отношению к которой оценивается вклад того или иного фактора, может быть выбрана любая характеристика (параметр), который служит для оценки результатов работы агрегатов. По сути дела этот принцип лежит в основе калькуляции основной продукции. Все виды затрат (сырье, труд, транспорт и многое другое) приводятся к стоимостной форме. Рациональность и необходимость таких расчетов ни у кого не вызывает сомнения и так поступают всегда по отношению к продукции. В работе предлагается такой подход перенести на другие процессы и ситуации, как было показано при приобретении (покупке) топлива, где никогда оценка «себестоимости покупки» не проводилась. Другим таким же прогнозным планированием может быть ситуация с вторичным продуктом или энергией. При улавливании пыли промышленных газов приложение предлагаемой концепции позволит выбрать наиболее рациональный вариант. То, что в качестве основного примера в настоящей работе рассматривалось топливо, является далеко не случайным. Активная работа по противостоянию возможного изменения глобального климата выражается в постоянном участии заинтересованных сторон в решении этого вопроса. В ноябре 2016 г. в Марракеше состоялась 22 конференция сторон 22 КС (в русскоязычном варианте), или COP 22 (conference of parties), неформальный девиз которых звучал так: «Choice of Fuel» (выбор топлива), что отражает особо остро стоящий вопрос об использовании углеводородного топлива в будущем. Для Кузбасса это является сверхважным вопросом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рамочная конвенция ООН об изменении климата. – Нью-Йорк. 9 мая 1992 г.
2. Интернет-сайт для консультации по практическому исследованию механизмов Киотского протокола. Электронный ресурс. – [Режим доступа]: www.carbonmarketsoptions.com. (Дата обращения 23.01.17 г.).
3. Лисиенко В.Г. Хрестоматия энергосбережения. – М.: Теплоэнергетик, 2003. – 688 с.
4. Парижское соглашение об изменении климата, 15.12.2015 г. Париж. Интернет-сайт. Электронный ресурс. – [Режим доступа]: www.ipcc.ch. (Дата обращения 23.01.17 г.).
5. Семикин И.Д., Аверин С.Н. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. Учебное пособие для студентов металлургических специальностей вузов. – М.: Металлургия, 1965. – 392 с.

© 2017 г. В.В. Стерлигов, Е.С. Татаринова,
И.В. Чикурова
Поступила 2 марта 2017 г.