

УДК 621.311.22

Построение монооксидауглеродной модели для расчета содержания бенз(а)пирена в уходящих газах пылеугольных котлов

М. С. Иваницкий*

Представлена расчетная методика определения содержания бенз(а)пирена в продуктах сгорания пылеугольных котлов на основе монооксидауглеродной модели. Повышение интенсивности смесеобразования и выгорания топлива способствует сокращению выхода всей группы полициклических ароматических углеводородов, в том числе бенз(а)пирена. Настройка малоэмиссионных режимов работы котла возможна лишь при наличии достоверных методов определения его концентрации в дымовых газах. Несмотря на низкий уровень массового выброса бенз(а)пирена следует учитывать его вклад в общую токсичность. При горении угольного топлива влияние степени метаморфизма топлива на общий выход продуктов недожога оказывается более весомым, чем при сжигании природного газа или мазута. Температура в зоне активного горения является интегральным показателем процесса горения и влияет на интенсивность и механизм образования полициклических ароматических углеводородов в продуктах сгорания. Так как наряду с концентрацией монооксида углерода содержание бенз(а)пирена в продуктах сгорания является показателем, характеризующим химическую неполноту сгорания углеводородного топлива. Монооксид углерода косвенно характеризует содержание бенз(а)пирена в уходящих газах. В работе показано, что образование трехатомных газов в топочной камере пылеугольного котла приводит к повышению содержания монооксида углерода в продуктах сгорания и созданию благоприятных условий для интенсивной генерации бенз(а)пирена. Учет исходного рабочего состава топлива позволяет более достоверно оценивать его содержание в уходящих газах твердотопливных котлов. Выявлено, что степень процесса конверсии группы полиароматических углеводородов, включая бенз(а)пирен, при горении угольного топлива в рассматриваемом случае незначительна, поскольку концентрация бенз(а)пирен изменяется в достаточно узком диапазоне. В данных условиях содержание монооксида углерода варьируется в широком интервале значений. Численный анализ полученных результатов показал, что в случае использования расчетных зависимостей для определения концентрации бенз(а)пирена в продуктах сгорания преобладающий вклад в оценку вносят механизм и начальные параметры образования и роста зародышей сажистых частиц и бенз(а)пирена в рассматриваемом диапазоне значений монооксида углерода. Установлено, что более слабое воздействие оказывают режимные параметры горения, при этом необходимо отметить важную роль уровня концентрации кислорода в начальный и конечный моменты сжигания пылеугольной смеси. В начале процесса горения кислород участвует в формировании топливовоздушной смеси, а при завершении способствует дожиганию продуктов неполного сгорания. Выявлено, что наибольшая степень конверсии полициклических ароматических соединений в рассматриваемом случае соответствует минимальному содержанию бенз(а)пирена или максимальной концентрации монооксида углерода в продуктах сгорания.

Ключевые слова: бенз(а)пирен, токсичность, монооксид углерода, горение.

* mseiv@yandex.ru

При сжигании ископаемого топлива на объектах теплоэнергетики в атмосферу выбрасываются вредные компоненты продуктов сгорания. Наиболее активными источниками выбросов являются котельные установки, сжигающие угольное топливо. При этом в атмосферу вносятся оксиды азота, углерода, серы, полиароматические углеводороды (ПАУ), парниковые газы и другие агрессивные компоненты. Канцерогенным представителем ПАУ является бенз(а)пирен (БП). Показатель агрессивности БП превышает токсичность оксидов азота на семь порядков. Несмотря на низкий уровень массового выброса БП необходимо учитывать его вклад в общую токсичность дымовых газов. При горении угольного топлива влияние степени метаморфизма топлива на общий выход продуктов недожога оказывается более весомым, чем при сжигании природного газа или жидкого топлива (мазута). Следует отметить, что в последние годы внимание специалистов-экологов к загрязнению воздушного бассейна канцерогенными веществами повышается. Воздействие полиароматических соединений на окружающую среду и человека носит глобальный характер.

Температура в зоне активного горения (ЗАГ) является интегральным показателем процесса горения и влияет на интенсивность и механизм образования ПАУ в продуктах сгорания. Основные механизмы образования БП и способы определения его концентрации при горении органического топлива рассмотрены в работах [1 — 8, 10].

Технологии по сокращению образования канцерогенных полициклических ароматических соединений должны быть направлены в первую очередь на разработку режимных мероприятий работы котлов. Повышение интенсивности смесеобразования и выгорания топлива способствует сокращению выхода всей группы ПАУ, в том числе БП. При этом наладка малоэмиссионных режимов работы котла возможна лишь при наличии достоверных методов определения концентрации БП в дымовых газах. Так как наряду с концентрацией монооксида углерода (СО) содержание БП в продуктах сгорания является показателем, характеризующим химическую неполноту сгорания углеводородного топлива. Для более значимого снижения выбросов БП при сжигании угольного топлива нужно повышать эффективность работы систем золошлакоудаления и газоочистки. Повышение степени золоулавливания способствует уменьшению попадания частиц БП в атмосферу, абсорбированных поверхностью золы и сажи.

Концентрация БП в сухих дымовых газах котлов за золоуловителями при факельном сжигании углей (мкг/м^3) рассчитывается по формуле [2]:

$$C_{\text{БП}} = A Q^r K_{\alpha} K_{\text{Д}} K_{\text{ЗУ}}, \quad (1)$$

где A — коэффициент, характеризующий конструкцию нижней части топки: при жидком шлакоудалении $A = 0,378$, при твердом — $A = 0,521$; Q^r — низшая теп-

лота сгорания топлива, МДж/кг ; K_{α} , $K_{\text{Д}}$, $K_{\text{ЗУ}}$ — коэффициенты, учитывающие избыток воздуха в продуктах сгорания на выходе из топки, нагрузку котла и степень улавливания БП золоуловителями.

Анализ (1) показывает, что при повышении теплоты сгорания топлива уровень образования БП увеличивается линейно. Однако, при повышении температуры в зоне активного горения интенсивность генерации БП должна снижаться, вследствие более полного выгорания топлива.

Уравнение (1) не учитывает теплоту, вносимую в зону горения с топливом, воздухом и газами рециркуляции. Для учета приведенных факторов значение эксплуатационной теплоты, вносимой в топочную камеру на единицу химической энергии топлива, предлагается рассчитывать следующим образом:

$$Q_{\text{эксп}}^r = \beta_{\text{СТ}} Q_i^r + Q_{\text{ТЛ}} + Q_{\text{В}} + Q_{\text{ГР}}, \quad (2)$$

где $\beta_{\text{СТ}}$ — степень выгорания топлива, зависящая от коэффициента избытка воздуха α в зоне активного горения; Q_i^r — теплота сгорания топлива на рабочую массу, МДж/кг ; $Q_{\text{ТЛ}}$ — теплота, вносимая в зону активного горения с топливом (при наличии предварительного подогрева), МДж/кг ; $Q_{\text{В}}$ — теплота, вносимая в зону активного горения с воздухом, МДж/кг ; $Q_{\text{ГР}}$ — теплота, вносимая в зону активного горения с газами рециркуляции, МДж/кг .

Скорректированное выражение для расчета концентрации бенз(а)пирена в уходящих газах пылеугольных котлов принимает вид:

$$C_{\text{БП}} = A Q_{\text{эксп}}^r K_{\text{ЗУ}}.$$

В выражении (2) степень выгорания топлива $\beta_{\text{СТ}}$ зависит от величины химического и механического недожога и определяется как:

$$\beta_{\text{СТ}} = (1 - q_3)(1 - q_4).$$

Величину химического недожога q_3 можно выразить через удельный выход монооксида углерода СО в продуктах сгорания следующей зависимостью:

$$q_3 = \frac{1,013 \text{СО}}{R Q_{\text{эксп}}^r},$$

где R — коэффициент, зависящий от вида сжигаемого топлива и типа горелочного устройства, при сжигании угольного топлива $R = 1$.

Удельный выход СО с дымовыми газами равен:

$$\text{СО} = C_{\text{СО}}^{\text{Р}} \left[V_{\text{Г}}^0 + 1,0161(\alpha - 1) V_{\text{В}}^0 \right] \frac{t_{\text{УХ}} + 273}{273},$$

здесь $C_{\text{СО}}^{\text{Р}}$ — расчетная концентрация монооксида углерода в продуктах сгорания, мг/м^3 ; $V_{\text{Г}}^0$, $V_{\text{В}}^0$ — теоретический объем дымовых газов и воздуха при сжигании

1 кг топлива, $m^3/\text{кг}$; t_{yx} — температура уходящих газов, $^{\circ}\text{C}$.

Расчетное значение концентрации монооксида углерода в уходящих газах выглядит следующим образом:

$$C_{\text{CO}}^{\text{P}} = 1,25 \cdot 10^4 C_{\text{CO}}.$$

Здесь C_{CO} — содержание монооксида углерода (%) в продуктах сгорания, вычисленное на основе данных концентрации кислорода, содержания трехатомных газов и характеристики твердого топлива по следующей известной зависимости:

$$C_{\text{CO}} = \frac{21 - O_2 - (1 + \beta)RO_2}{0,605 + \beta},$$

где RO_2 — содержание трехатомных газов в продуктах сгорания топлива.

Характеристика твердого топлива зависит от его химического состава при рабочих параметрах и определяется выражением [9]:

$$\beta = 2,35 \frac{H^{\text{P}} - 0,126O^{\text{P}} + 0,038N^{\text{P}}}{C^{\text{P}} + 0,375S_{\text{OP+K}}^{\text{P}}},$$

здесь H^{P} , O^{P} , N^{P} , C^{P} , $S_{\text{OP+K}}^{\text{P}}$ — содержание водорода, кислорода, азота, углерода и серы (органическая и колчеданная) в топливе при рабочих условиях.

Величина механического недожога q_4 характеризуется потерями теплоты с уносом, провалом и шлаком. Конструкция топочной камеры и колосниковой решетки, минеральный состав угольного топлива и теплофизические характеристики шлака являются важными факторами, влияющими на величину потерь теплоты с механическим недожогом.

Потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива определим по уточненной формуле [9]:

$$q_4 = \frac{32,65 A^{\text{P}}}{Q_{\text{экср}}^{\text{r}}} \left(\frac{a_{\text{шл+пр}} \Gamma_{\text{шл+пр}}}{100 - \Gamma_{\text{шл+пр}}} + \frac{a_{\text{ун}} \Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} \right),$$

где 32,65 — условная теплота сгорания углерода, МДж/кг ; A^{P} — зольность топлива на рабочую массу, %; $\Gamma_{\text{шл+пр}}$, $\Gamma_{\text{ун}}$ — содержания горючих в шлаке, провале и уносе, %; $a_{\text{шл+пр}}$, $a_{\text{ун}}$ — доли золы топлива в шлаке, провале и уносе.

Варианты компонентного состава угольного топлива и расчетные характеристики продуктов сгорания при горении угольного топлива приведены в табл. 1, 2. Характеристики пылеугольных котлов и расчетные концентрации БП в уходящих газах без учета задержки твердых частиц в электрофильтре представлены в табл. 3.

Отметим, что образование трехатомных газов в топочной камере пылеугольного котла приводит к повышению содержания монооксида углерода в продуктах сгорания и созданию благоприятных условий для интенсивной генерации БП. При этом учет исходного рабочего состава топлива позволяет более достоверно оценивать содержание БП в уходящих газах твердоугольных котлов. Расчетные исследования в работе проведены при номинальном режиме работы пылеугольных котлов.

Анализ зависимости, показанной на рис. 1, позволяет заключить, что при увеличении подачи газов рециркуляции с горячим воздухом в топочную камеру котла в диапазоне от 0 до 20% выход БП с продуктами сгорания повышается на 80%, что объясняется сниже-

Таблица 1

Компонентный состав угольного топлива

Состав угольного топлива на рабочую массу, %/месторождение/марка						
W	A	S	C	H	O	N
Челябинское БЗ ($Q_i^{\text{r}} = 13,44 \text{ МДж/кг}$)						
17,0	32,4	0,9	35,9	2,6	10,2	1,0
Ангренское Б2 ($Q_i^{\text{r}} = 13,44 \text{ МДж/кг}$)						
34,5	14,4	1,3	39,1	1,9	8,6	0,2
Воркутинское Ж ($Q_i^{\text{r}} = 22,02 \text{ МДж/кг}$)						
5,5	28,4	0,9	55,5	3,6	4,4	1,7
Донецкое Д ($Q_i^{\text{r}} = 18,50 \text{ МДж/кг}$)						
13,0	24,4	3,1	47,0	3,4	8,1	1,0
Минусинское Д ($Q_i^{\text{r}} = 20,10 \text{ МДж/кг}$)						
14,0	17,2	0,5	52,9	3,5	10,5	1,4
Кузнецкий Г ($Q_i^{\text{r}} = 20,01 \text{ МДж/кг}$)						
12,0	23,8	0,5	51,4	3,8	6,6	1,9

Таблица 2

Расчетные характеристики продуктов сгорания при горении угольного топлива

Марка угля	Параметр β	Содержание кислорода, %	Максимальный выход RO_2 , %	Содержание монооксида углерода ($\times 10^4$), %
Челябинский БЗ	0,088	3,3	19,30	150
Ангренский Б2	0,049	3,8	20,02	170
Воркутинский Ж	0,125	5,1	18,67	210
Донецкий Д	0,118	3,7	18,78	185
Минусинский Д	0,099	3,9	19,10	165
Кузнецкий Г	0,139	4,4	18,44	140

Таблица 3

Энергетические параметры и характеристики пылеугольных котлов

Тип котла/ параметр	ТП-85	П-57	П-59	ПК-39-2	П-49	П-67
Паропроизводительность, кг/с	117	458	239	264	361	611
Тип системы шлакоудаления	ТШУ	ТШУ	ЖШУ	ТШУ	ЖШУ	ТШУ
Месторождение/ марка угля	Челябинское БЗ	Ангренское Б2	Воркутинское Ж	Донецкое Д	Минусинское Д	Кузнецкое Г
Теплота сгорания топлива, МДж/кг	13,44	13,44	22,02	18,50	20,10	20,01
Удельный выброс монооксида углерода, г/кг	1,41	1,71	3,19	2,48	2,78	2,21
Потери теплоты с химическим недожогом, %	0,11	0,13	0,15	0,14	0,14	0,11
Доля золы топлива в шлаке и провале	0,25	0,20	0,25	0,15	0,20	0,20
Доля золы топлива в уносе	0,75	0,80	0,75	0,85	0,80	0,80
Содержание горючих в шлаке и провале, %	1,5	1,5	0,5	1,0	1,5	1,5
Содержание горючих в уносе, %	2,0	2,5	1,5	1,7	2,5	3,0
Потери теплоты с механическим недожогом, %	1,50	0,82	0,53	0,70	0,66	1,08
Температура уходящих газов, °С	145	160	155	147	175	152
Доля газов рециркуляции	0	0	5	7	0	0,15
Коэффициент избытка воздуха	1,23	1,18	1,27	1,31	1,44	1,41
Концентрация бенз(а)пирена в уходящих газах, мкг/м ³	1,074	1,193	1,239	1,340	0,876	1,258

нием средней концентрации кислорода (избытка воздуха) в топочной камере котла. Оптимальную величину рециркулирующих газов при этом следует определять в соответствии с уровнем химического недожога (содержанием монооксида углерода в продуктах сгорания) в допустимых пределах, регламентированных нормативными документами. Контроль выбросов БП с дымовыми газами с использованием рециркуляции позволяет оценивать степень выгорания топлива и конверсии других полиароматических соединений в газозоудном тракте котла, находить пути оптимизации процесса горения и создавать более совершенные системы непрерывного или периодического мониторинга выбросов вредных компонентов дымовых газов в окружающую среду. Использование рециркуляции для всех типов пылеугольных котлов невозможно из-за ограничения температуры шлакования и зависит от типа используемой системы золошлакоудаления и котла [10].

Уровень механического недожога характеризует количественную составляющую минеральной части топлива и степень его метаморфизма. По результатам численного анализа содержание БП в дымовых газах котла ПК-39-2 при увеличении механического недожога топлива от 0,5 до 2,5% сокращается не более чем на 2% (рис. 2). Поддержание механического недожога на минимальном уровне в рассматриваемом варианте соответствует содержанию БП в дымовых газах, равному 1343 нг/м³.

Монооксид углерода является продуктом неполного сгорания и косвенно характеризует содержание БП в уходящих газах. Для пылеугольного котла ТП-85 при увеличении химического недожога по СО в пределах от 100 до 500 мг/м³ выход БП монотонно уменьшается на 1,85% (рис. 3). Степень процесса конверсии группы полиароматических углеводородов, включая БП при горении угольного топлива в рассматриваемом случае, незначительна, поскольку концентрация БП меняется в достаточно узком диапазоне. При этом содержание монооксида углерода варьируется в широком интервале значений.

Численный анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что при использовании расчетных зависимостей определения концентрации БП в продуктах сгорания преобладающий вклад в оценку вносят механизм и начальные параметры образования и роста зародышевой сажи и БП в рассматриваемом диапазоне значений СО [11]. Более слабое воздействие оказывают режимные параметры горения, при этом важную роль играет уровень концентрации кислорода в начальной и конечной моменты сжигания пылеугольной смеси. В начале процесса горения кислород участвует в формировании топливозоудной смеси, а при завершении способствует дожиганию продуктов неполного сгорания. Максимальная степень конверсии полициклических ароматических соединений в рассматриваемом

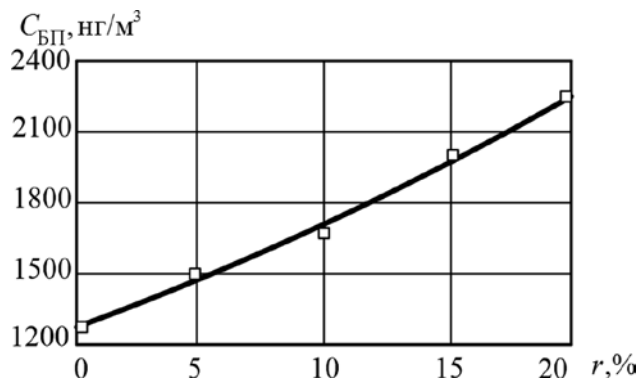


Рис. 1. Влияние доли газов рециркуляции, вводимых с горячим воздухом на изменение концентрации БП в уходящих газах котла П-67 при номинальной нагрузке

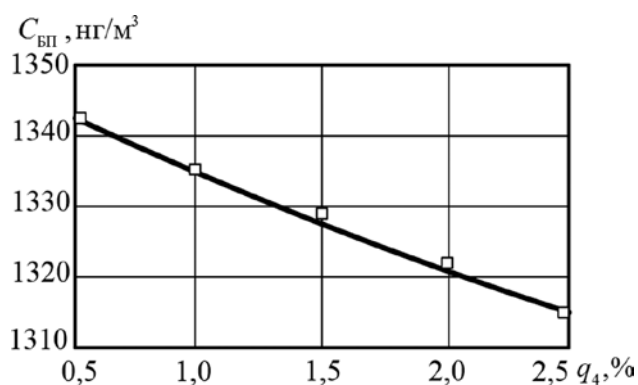


Рис. 2. Зависимость содержания БП в уходящих газах котла ПК-39-2 от величины механического недожога

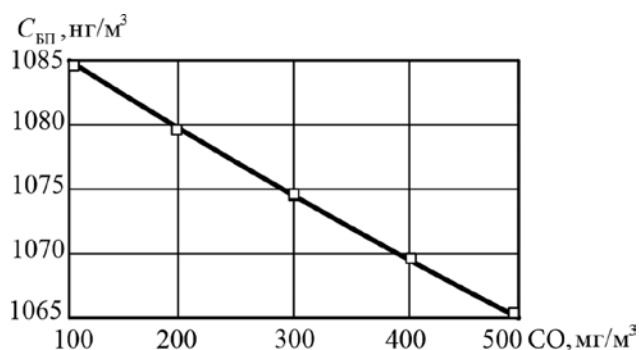


Рис. 3. Выход БП в продуктах сгорания пылеугольного котла ТП-85 в зависимости от концентрации монооксида углерода

случае соответствует минимальному значению БП или максимальному уровню СО в уходящих газах.

Литература

- Иваницкий М.С. и др. Физико-химические процессы механизмов образования бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива // Вестник Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. 2012. № 27(46). С. 28—33.
- РД 153-34. 1-02. 316—2003. Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций. М.: ОАО «ВТИ», 2003.

3. **Иваницкий М.С. и др.** Построение модели для определения концентрации бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива в котельных установках систем теплоснабжения // Вестник Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. 2012. № 28(47). С. 143 — 150.

4. **Иваницкий М.С., Грига А.Д.** Определение концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок и способ автоматического регулирования процесса горения // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 3 (83). С. 52 — 56.

5. **Иваницкий М.С., Грига А.Д.** Оценка мощности выбросов бенз(а)пирена при сжигании пылеугольного топлива в топках котлов // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. Серия «Энергетика». 2013. № 5-1. Т. 9. С. 62 — 67.

6. **Грига А.Д., Иваницкий М.С.** Определение содержания бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок малой мощности // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 14 (136). С. 67 — 70.

7. **Иваницкий М.С., Грига А.Д.** Определение предельно допустимых концентраций нитропроизводных

полиароматических соединений, образующихся в топках котлов // Изв. высших учеб. заведений. Сер. Проблемы энергетики. 2013. № 11 — 12. С. 17 — 23.

8. **Чугаева А.Н. и др.** Нормирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для предприятий тепловой энергетики // Электрические станции. 2014. № 1. С. 50 — 55.

9. **Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н.** Котельные установки промышленных предприятий: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1988.

10. **Иваницкий М.С., Грига А.Д.** Перевод пылеугольных котлов на сжигание природного газа для сокращения выбросов бенз(а)пирена в воздушный бассейн // Вестник МЭИ. 2015. № 2. С. 79 — 82.

11. **Бакиров Ф.Г., Захаров В.М., Полищук Н., Шайхутдинов З.Г.** Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. М.: Машиностроение, 1989.

Статья поступила в редакцию 27.08.2015