

СУММАРНАЯ ТОКСИЧНОСТЬ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ РАБОТЕ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ ТЭЦ

А.Д. Грига, М.С. Иваницкий

Филиал НИУ «МЭИ» в г. Волжском
404110 г. Волжский, Волгоградская обл., пр. Ленина, д. 69
Тел.: (8443) 210160, e-mail: vfmei@vfmei.ru

Заключение совета рецензентов: 19.04.15 Заключение совета экспертов: 23.04.15 Принято к публикации: 27.04.15

Статья посвящена определению суммарной токсичности выбросов пылеугольных котлов. Показано, что при расчете суммарной токсичности выброса необходимо учитывать частные показатели токсичности компонентов уходящих газов, в частности, бенз(а)пирен и монооксид углерода. Общая токсичность выброса является показателем экологичности работы энергоблока. Для различного угольного топлива в зависимости от его рабочих характеристик приведен алгоритм определения уровня недожога по монооксиду углерода. Показана возможность расчета концентрации монооксида углерода по известной концентрации бенз(а)пирена и в обратном порядке.

Показатель суммарной вредности выбросов позволяет оценивать общий фоновый уровень загрязненности атмосферы канцерогенными и токсичными веществами, особенно в районах расположения крупных угольных энергообъектов. Знание концентрации фона в свою очередь позволит проводить мероприятия по оптимизации границ санитарно-защитной зоны и способствовать минимизации воздействия угольных кластеров в районе застройки.

Ключевые слова: оксид углерода, бенз(а)пирен, токсичность, оксиды азота, горение топлива.

THE TOTAL TOXICITY OF PRODUCTS OF COMBUSTION DURING OPERATION OF COAL-FIRED BOILERS CHP

A.D. Griga, M.S. Ivanitskii

Volzhsy Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
69 Lenin str., Volzhsky, Volgograd reg., 404110, Russia
Tel.: (8443) 210160, e-mail: vfmei@vfmei.ru

Referred: 19.04.15 Expertise: 23.04.15 Accepted: 27.04.15

The article is devoted to determination of total toxic emissions from coal-fired boilers. It is shown that when calculating total emissions must be considered private indicators of toxic components of exhaust gases, in particular, benz(a)pyrene and carbon monoxide. The general toxicity of emissions is an indicator of the ecological operation of the unit. For various coal fuel, depending on its operating characteristics of the algorithm determining the level of underburning on carbon monoxide. The possibility of calculating the concentration of carbon monoxide by known concentrations of benz(a)pyrene and in reverse order.

The total harmful emissions allows us to estimate the total background level of atmospheric pollution is carcinogenic and toxic substances, especially in areas of large coal-fired power. Knowledge of the concentration of background, in turn, will allow optimization of the boundaries of the sanitary protection zone and to help minimise the impact of carbon clusters in the area.

Keywords: carbon monoxide, benz(a)pyrene toxicity, nitrogen oxides, combustion of fuel.



Анатолий Данилович
Грига
A.D. Griga

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» ВФ МЭИ.

Образование: Харьковский авиационный институт (1961).

Область научных интересов: компрессоры, экология энергетики.

Публикации: более 200.

Author information: Ph.D., professor of "Heat and Heat Engineering".

Education: Kharkov Aviation Institute (1961).

Research area: compressors, ecology of energy.

Publications: more than 200.



Максим Сергеевич
Иваницкий
Maxim S. Ivanitskii

Сведения об авторе: канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» ВФ МЭИ.

Образование: Филиал МЭИ (технический университет) в г. Волжском (2011).

Область научных интересов: процессы горения топлива, экология энергетики.

Публикации: 40.

Author information: Ph.D., art. lecturer in "Heat and Heat Engineering".

Education: Volzhsky Branch of Moscow Power Engineering Institute (2011).

Research interests: fuel combustion processes, ecology of energy.

Publications: 40.

Введение

При сжигании ископаемого топлива на объектах энергетики в атмосферу выбрасываются вредные компоненты 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 токсичные компоненты. Ярким канцерогенным представителем ПАУ является бенз(а)пирен (БП). Показатель токсичности БП превышает токсичность оксидов азота на семь порядков. Несмотря на низкий уровень массового выброса БП, необходимо учитывать его вклад в общую токсичность продуктов сгорания. При горении угольного топлива влияние степени метаморфизма топлива на общий выход продуктов недожога оказывается более весомым по сравнению со сжиганием природного газа или мазута. Необходимо 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. Поэтому разработка прогнозных моделей для определения уровня загрязненности токсичными веществами прилегающих к объектам тепловых электростанций и районных котельных территорий носит актуальный характер [1-6].

Численное исследование

Концентрация БП в сухих дымовых газах котлов за золоуловителями при факельном сжигании углей $C_{\text{БП}}^T$, приведенная к избытку воздуха в газах $\alpha = 14$, рассчитывается по формуле

$$C_{\text{БП}}^T = \frac{AQ_H^P}{e^{1,5\alpha} \prod_{i=1}^N K_i}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, характеризующий конструкцию нижней части топки в зависимости от вида шлакоудаления (для топок с жидким шлакоудалением

$A = 0,378$, для котлов с твердым шлакоудалением $A = 0,521$); Q_H^P – теплотворная способность топлива, МДж/кг; α – коэффициент избытка воздуха в дымовых газах на выходе из топки; $\prod_{i=1}^N K_i = K_{\text{д}} K_{\text{зв}}$ – произведение коэффициентов для учета влияния нагрузки котла и степени улавливания БП золоуловителями. Погрешность методики составляет не более 20% [7].

Степень выгорания топлива $\beta_{\text{СТ}}$ зависит от величины химического и механического недожога и определяется по уравнению

$$\beta_{\text{СТ}} = 1 - q_3 - q_4. \quad (2)$$

Коэффициент избытка воздуха характеризует степень выгорания топлива и связан с ним соотношением

$$\alpha = C\beta_{\text{СТ}}^m, \quad (3)$$

где C – эмпирический коэффициент, определяемый по экспериментальным данным; m – показатель степени.

Химический недожог q_3 можно выразить через удельное содержание монооксида углерода СО в продуктах сгорания следующей зависимостью:

$$q_3 = \frac{1,013\text{CO}}{RQ_H^P}, \quad (4)$$

где R – коэффициент, зависящий от вида сжигаемого топлива и типа горелочного устройства; при сжигании твердого топлива $R = 0,5$.

Удельный выход СО с дымовыми газами определим по выражению

$$\text{CO} = C_{\text{СО}} \left[V_{\text{Г}}^0 + 1,0161(\alpha - 1)V_{\text{В}}^0 \right] \frac{t_{\text{yx}} + 273}{273}, \quad (5)$$

где $C_{\text{СО}}$ – содержание монооксида углерода в продуктах сгорания, мг/м³; $V_{\text{Г}}^0$, $V_{\text{В}}^0$ – теоретический объем дымовых газов и воздуха при сжигании 1 кг топлива, м³/кг; t_{yx} – температура уходящих газов, °С.

При этом концентрацию монооксида углерода (%) в продуктах сгорания можно вычислить по величине кислорода, содержанию трехатомных газов и характеристике твердого топлива β , она выражается следующей известной зависимостью:

$$C_{CO} = \frac{21 - O_2 - (1 + \beta)RO_2}{0,605 + \beta}, \quad (6)$$

где $RO_2 = CO_2 + SO_2 + H_2O$ – содержание трехатомных газов в продуктах сгорания топлива, %; O_2 – концентрация кислорода в дымовых газах, %.

Характеристика угля β зависит от его химического состава при рабочих параметрах и определяется выражением

$$\beta = 2,35 \frac{H^p - 0,126O^p + 0,038N^p}{C^p + 0,375S_{OP+K}^p}, \quad (7)$$

где $H^p, O^p, N^p, C^p, S_{OP+K}^p$ – содержание водорода, кислорода, азота, углерода и серы (органической и колчеданной) в топливе при рабочих условиях.

где Π_i – частный показатель токсичности i -го компонента выброса, например, частный показатель токсичности монооксида углерода – 1; бенз(а)пирена – $12,6 \cdot 10^8$.

В табл. 1-3 приведены расчетные данные, обуславливающие экологичность процесса сжигания угольного топлива на различных нагрузках котлов. Данные приведены с учетом 80%-го уровня задержки БП в электрофильтре.

В табл. 1 представлены данные расчета концентраций продуктов неполного сгорания и суммарной токсичности выбросов при работе пылеугольных котлов на нагрузке 25% от номинальной.

В табл. 2 представлены данные расчета концентраций продуктов неполного сгорания и суммарной токсичности выбросов при работе пылеугольных котлов на нагрузке 50% от номинальной при постоянных значениях коэффициента избытка воздуха.

В табл. 3 представлены данные расчета концентраций продуктов неполного сгорания и суммарной токсичности выбросов при работе пылеугольных котлов на полной нагрузке.

Таблица 1
Характеристики
пылеугольных котельных установок

Table 1
Characteristics of coal-fired boiler plants

Параметр	Тип котла				
	ТП-85	П-57	П-59	ПК-39-2	П-49
Паропроизводительность, т/ч	420	1650	860	950	1300
Тип системы шлакоудаления	ТШУ	ТШУ	ЖШУ	ТШУ	ЖШУ
Теплота сгорания топлива, МДж/кг	16,95	25,12	27,42	14,44	22,94
Концентрация монооксида углерода, мг/м ³	53	69	71	42	55
Потери теплоты с химическим недожогом, %	0,06	0,05	0,04	0,06	0,05
Коэффициент избытка воздуха в топке	1,2	1,15	1,23	1,27	1,21
Концентрация бенз(а)пирена в уходящих газах, мкг/м ³	0,141	0,224	0,157	0,107	0,136
Суммарная токсичность выброса, П	77110	311497	110389	164818	187661

Суммарный показатель токсичности дымовых газов определяется по формуле

$$\Pi = \sum_{i=1}^N \Pi_i, \quad (8)$$

Таблица 2
Соотношение выбросов бенз(а)пирена
и монооксида углерода

Table 2
The ratio of emissions of benz(a)pyrene
and carbon monoxide

Параметр	Тип котла				
	ТП-85	П-57	П-59	ПК-39-2	П-49
Удельный выброс монооксида углерода, г/кг	0,86	1,09	1,10	0,56	0,93
Концентрация бенз(а)пирена в уходящих газах, мкг/м ³	0,302	0,479	0,336	0,229	0,297
Суммарная токсичность выброса, П	143591	589346	200129	294465	350036

Таблица 3
Выбросы продуктов неполного сгорания топлива
Emissions of products of incomplete combustion

Параметр	Тип котла				
	ТП-85	П-57	П-59	ПК-39-2	П-49
Удельный выброс монооксида углерода, г/кг	0,53	0,81	0,94	0,38	0,68
Концентрация бенз(а)пирена в уходящих газах, мкг/м ³	0,647	1,027	0,720	0,491	0,637
Суммарная токсичность выброса, П	282562	1187507	395118	595310	694417

Обсуждение результатов

Бенз(а)пирен и монооксид углерода являются продуктами неполного сгорания топлива. При работе котла на пониженных нагрузках, отличных от номинального уровня, процесс смесеобразования ухудшается вследствие недостаточного перемешивания угольной пыли и воздуха, в результате чего увеличивается удельный выход монооксида углерода. При этом содержание БП в продуктах сгорания уменьшается. Это объясняется различием в механизмах генерации монооксида углерода и БП. Необходимо отметить, что БП является промежуточным соединением в механизме роста зародышей сажи при горении топлива и образуется на одной из стадий процесса. На данный процесс дополнительное влияние оказывают локальные области с недостатком кислорода в топочной камере, при этом углеводороды сгорают не полностью. При горении угольного топлива данная проблема в значительной степени может быть решена на улучшением аэродинамики топочной камеры.

Проведенный анализ показывает, что при увеличении нагрузки с 25 до 100% общая токсичность выбросов увеличивается в 3,5-4 раза для всех исследуемых пылеугольных блоков. Максимальная концентрация БП наблюдается на выходе из котла П-57 и составляет $1,027 \text{ мкг/м}^3$. Минимальное содержание БП, равное $0,107 \text{ мкг/м}^3$ отмечено при работе котла ПК-39-2 на нагрузке 25%. Наибольшее значение суммарной токсичности выброса определено при работе котла П-57.

Построим графическую зависимость суммарной токсичности выбросов от избытка воздуха при сжигании угольного топлива в котле П-57, аппроксимируя данные табл. 1 (рис. 1).

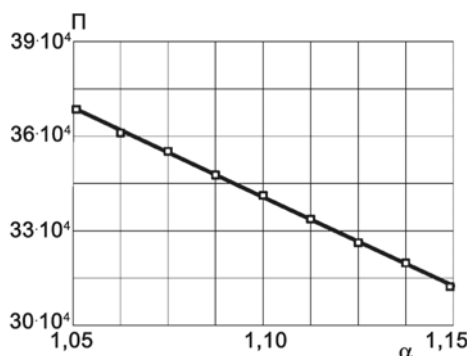


Рис. 1. Влияние коэффициента избытка воздуха в топочной камере на суммарную токсичность выбросов при работе пылеугольного энергоблока с котлом П-57

Fig. 1. The influence of the coefficient of excess air in the combustion chamber to the total toxicity of the emissions of coal-fired power boiler П-57

Приведенная на рис. 2 графическая зависимость характеризует линейный рост относительного содержания БП в уходящих газах при увеличении нагрузки котла. Данный характер роста является про-

типовым результатом, полученным при работе котлов на газовом топливе. Повышение паропроизводительности на энергоблоках, работающих на природном газе, приводит к снижению выхода БП. В некоторых случаях это можно объяснить степенью метаморфизма топлива и различными механизмами генерации БП. Уровень суммарной токсичности выбросов во многих случаях регулируется проведением внутритопочных мероприятий, в первую очередь оптимизацией соотношения «топливо-воздух» (рис. 1).

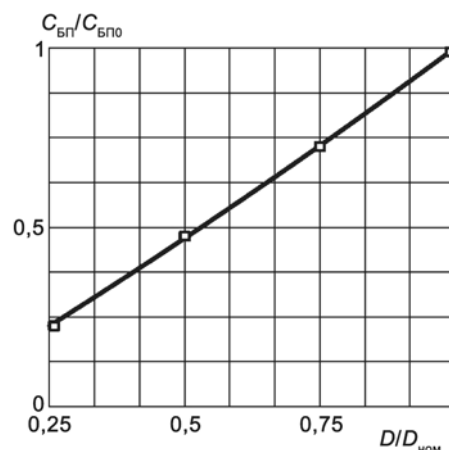


Рис. 2. Зависимость содержания БП от нагрузки пылеугольного котла ПК-39-2
Fig. 2. The dependence of the content unit from a load of coal-fired boiler ПК-39-2

Выводы

Определен уровень суммарной токсичности уходящих газов пылеугольных котлов большой тепловой мощности. Показано, что суммарная токсичность уходящих газов в заданных диапазонах технологических параметров на 76,2-96,6% обуславливается частной токсичностью БП.

Установлена связь между содержанием БП в продуктах сгорания угольной пыли и степенью выгорания топлива. Для различного угольного топлива в зависимости от его рабочих характеристик приведен алгоритм определения уровня недожога по монооксиду углерода. Показана возможность расчета концентрации монооксида углерода по известной концентрации БП и в обратном порядке.

Показатель суммарной вредности выбросов позволяет оценивать общий фоновый уровень загрязненности атмосферы канцерогенными и токсичными веществами, особенно в районах расположения крупных угольных энергокомплексов. Знание концентрации фона, в свою очередь, позволит проводить мероприятия по оптимизации границ санитарно-защитной зоны и способствовать минимизации воздействия угольных кластеров в районе застройки.

Список литературы

1. 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.
2. Иваницкий М.С., Грига А.Д., Фокин В.М., Грига С.А. Физико-химические процессы механизмов образования бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива // *Вестник ВолгГАСУ*. 2012. № 27 (46). С. 28-33.
3. Грига А.Д., Иваницкий М.С. Определение содержания бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок малой мощности // *Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ*. 2013. № 14 (136). С. 67-70.
4. Иваницкий М.С., Грига А.Д. Определение предельно допустимых концентраций нитропроизводных полиароматических соединений, образующихся в топках котлов // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2013. № 11-12. С. 17-23.
5. Грига А.Д., Иваницкий М.С. Определение содержания бенз(а)пирена в уходящих газах камеры сгорания газовой турбины // *Вестник ВГТУ. Серия «Энергетика»*. 2014. Т. 5, № 10. С. 86-88.
6. Иваницкий М.С., Грига А.Д., Фокин В.М., Грига С.А. Построение модели для определения концентрации бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива в котельных установках систем теплоснабжения // *Вестник ВолгГАСУ*. 2012. № 28 (47). С. 143-150.
7. РД 153-34. 1-02. 316-2003. Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций. Введ. 01.07.03. Москва, 2003.

References

1. Ivanickij M.S., Griga A.D. Opredelenie koncentracii benz(a)pirena v dymovyh gazah kotel'nyh us-tanovok i sposob avtomatičeskogo regulirovaniâ processa gorenîâ // *Ènergobereženie i vodopodgotovka*. 2013. № 3 (83). S. 52-56.
2. Ivanickij M.S., Griga A.D., Fokin V.M., Griga S.A. Fiziko-himičeskie processy mehanizmov obrazovaniâ benz(a)pirena pri sžiganii uglevodorodnogo topliva // *Vestnik VolgGASU*. 2012. № 27 (46). S. 28-33.
3. Griga A.D., Ivanickij M.S. Opredelenie soderžaniâ benz(a)pirena v dymovyh gazah kotel'nyh ustanovok maloj mošnosti // *Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAEЕ*. 2013. № 14 (136). S. 67-70.
4. Ivanickij M.S., Griga A.D. Opredelenie predel'no dopustimyh koncentracij nitroproduzvodnyh poli-aromatičeskih soedinenij, obrazuûšihâ v topkah kotlov // *Izvestiâ vuzov. Problemy ènergetiki*. 2013. № 11-12. S. 17-23.
5. Griga A.D., Ivanickij M.S. Opredelenie soderžaniâ benz(a)pirena v uhodâših gazah kamery sgoraniâ gazovoj turbiny // *Vestnik VGTU. Seriâ «Ènergetika»*. 2014. T. 5, № 10. S. 86-88.
6. Ivanickij M.S., Griga A.D., Fokin V.M., Griga S.A. Postroenie modeli dlâ opredeleniâ koncentracii benz(a)pirena pri sžiganii uglevodorodnogo topliva v kotel'nyh ustanovkah sistem teplosnabženiâ // *Vestnik VolgGASU*. 2012. № 28 (47). S. 143-150.
7. RD 153-34. 1-02. 316-2003. Metodika rasčeta vybrosov benz(a)pirena v atmosferu parovymi kotlami èlektrostancij. Vved. 01.07.03. Moskva, 2003.

Транслитерация по ISO 9:1995

