

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ СУММАРНОЙ АГРЕССИВНОСТИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННОГО СЕРОСОДЕРЖАЩИМИ КОМПОНЕНТАМИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

М.С. ИВАНИЦКИЙ

Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском

В работе приведены результаты прогнозирования показателя суммарной агрессивности газовых выбросов пылеугольных котлов, обусловленного серосодержащими компонентами в присутствии бенз(а)пирена, монооксида углерода при незначительном влиянии азотсодержащих компонентов топлива на основе корреляционного анализа. Для экологических систем «бенз(а)пирен-оксиды серы», «бенз(а)пирен-монооксид углерода», «оксиды серы-монооксид углерода» определены значения коэффициентов парной корреляции. Приведены данные для организации малотоксичных режимов работы пылеугольных котлов с учетом взаимного влияния серосодержащих компонентов дымовых газов и продуктов неполного горения, позволяющие в значительной степени обеспечить экологическую безопасность окружающей среды.

Ключевые слова: оксиды серы, бенз(а)пирен, токсичность, горение топлива.

Введение

При горении угольного топлива в топках энергетических котлов в воздушный бассейн выбрасывается значительное количество вредных компонентов дымовых газов (оксиды азота, серы, углерода, сажа, зола, монооксид углерода). Неполнота окисления топлива способствует образованию в продуктах сгорания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), включая бенз(а)пирен (БП), относящийся к 1 классу опасности. При этом массовый выброс не характеризует показатель суммарной токсичности дымовых газов. При расчетах общей токсичности уходящих газов необходимо использовать показатели частной агрессивности конкретных компонентов уходящих газов. Несмотря на относительно малый выход БП (микропримесь), показатель его токсичности значительно превышает уровни других компонентов сгорания. Следует отметить, что суммарная токсичность уходящих газов усиливается при взаимном влиянии отдельных компонентов, особый интерес представляет влияние серосодержащих продуктов сгорания. В данной работе выполнен анализ парной корреляции компонентов сгорания на суммарную агрессивность дымовых газов пылеугольного энергетического котла в условиях взаимного влияния оксидов серы, монооксида углерода и БП [1-7,9,10].

Численное исследование

Объект исследования – пылеугольный прямоточный котел П-67 (Пп-2650-25-545/542 БТ) на сверхкритические параметры пара с промежуточным перегревом пара, однокорпусный, выполненный по Т-образной компоновке с твердым шлакоудалением, газоплотный с разряжением. Топочные панели делятся на четыре хода. В нижней части топочной камеры на фронтальной и задней стенках топки в два яруса размещены 24 плоскофакельные горелки. Расстояние между ярусами составляет 5 м.

Основным топливом является уголь Донецкого месторождения, класс – концентрат энергетический. Рабочие характеристики угля: $W^P = 10,0\%$, $A^P = 14,4\%$,

$C^P = 63,5\%$, $H^P = 3,9\%$, $S^P = 3,2\%$, $O^P = 3,9\%$, $N^P = 1,1\%$. В качестве варьируемых режимных параметров используется коэффициент избытка воздуха в диапазоне $1,10 \div 1,30$. Нагрузка котла варьируется в пределах $K_D = 0,217 \div 1$. Рециркуляция дымовых газов, ступенчатое сжигание топлива и подача влаги в топочную камеру не производится. Поверхностное теплонапряжение зоны активного горения $q_{\text{ЛГ}} = 3,95$ МВт/м², объемное теплонапряжение топочной камеры $q_V = 43,1$ кВт/м³ приняты согласно паспортным данным котла П-67. Объемный расход дымовых газов при изменении коэффициента избытка воздуха в заданном диапазоне нагрузок варьировался в пределах $253 \div 1094$ м³/с, температура уходящих газов при номинальном режиме работы котла составляла 145 °С.

Экспериментальное определение содержания БП в эксплуатационных условиях осуществляется, в основном, аккредитованными лабораториями вследствие отсутствия на станциях доступных измерительных систем. Рассмотрим расчетные методы для определения концентрации БП на основе функциональных связей технологических параметров. Погрешность определения содержания БП при этом составляет не более 20% [2,3,5,7].

Концентрация БП в сухих дымовых газах котлов за золоуловителями при факельном сжигании углей $C_{\text{БП}}^T$, приведенная к избытку воздуха в газах $\alpha = 1,4$, рассчитывается по формуле

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

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; $\prod_{i=1}^N K_i = K_D \cdot K_{\text{ЗУ}}$ – произведение коэффициентов для учета влияния нагрузки котла и степени улавливания БП золоуловителями. Погрешность методики составляет не более 20% [8].

Содержание оксидов серы в дымовых газах при сжигании твердого топлива без учета задержки в установке сероочистки рассчитывается по уточненному выражению

$$C_{\text{SO}_2} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{S^P}{V_{\Gamma}}, \quad (2)$$

здесь S^P – содержание серы в топливе на рабочую массу, %; V_{Γ} – выход дымовых газов на 1 кг сгоревшего топлива, м³/кг.

Объем уходящих газов при сжигании 1 кг органического топлива и с учетом влияния температуры продуктов горения можно рассчитать по формуле

$$V_{\Gamma} = \left[V_{\Gamma}^0 + 1,0161(\alpha - 1)V_B^0 \right] \frac{t_{\text{yx}} + 273}{273}, \quad (3)$$

где α – коэффициент избытка воздуха в топочной камере; V_{Γ}^0 – теоретический объем дымовых газов, образующихся при сжигании 1 кг топлива, м³/кг; V_B^0 – теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания 1 кг топлива, м³/кг.

Суммарный показатель токсичности дымовых газов определяется по формуле

$$\Pi = \sum_{i=1}^N \Pi_i, \quad (4)$$

здесь Π_i – частный показатель токсичности i -го компонента выброса.

В таблицах 1–2 приведены технические характеристики и расчетные данные, обуславливающие экологичность процесса сжигания угольного топлива котла П-67. Данные приведены с учетом 70%-го уровня задержки БП в электрофильтре.

Таблица 1

Характеристики пылеугольного котла П-67

Тип котла и тип системы удаления золы и шлака	Паровая нагрузка, т/ч	Теплота сгорания топлива, МДж/кг	Потери теплоты с химическим недожогом, %	Коэффициент избытка воздуха в топке
Пылеугольный с ТШУ	2650	25,12	2,0	1,2

Таблица 2

Экологические показатели работы пылеугольного котла П-67

Концентрация монооксида углерода, мг/м ³	Концентрация оксидов серы, мг/м ³	Концентрация бенз(а)пирена в уходящих газах, мкг/м ³	Суммарная токсичность выброса, Π
502	4957	240	354693

В таблицах 3–5 представлены данные планирования систем «бенз(а)пирен-оксиды серы», «бенз(а)пирен–монооксид углерода» и «оксиды серы–монооксид углерода». Под обозначением величин x_i и y_i следует понимать соответствующие расчетные и экспериментальные значения концентраций компонентов корреляционных пар (экологических систем). Концентрации оксидов серы и монооксида углерода представлены в г/м³, бенз(а)пирена в мкг/м³. Численное исследование по определению значений концентраций продуктов сгорания и суммарной токсичности выбросов выполнено при работе пылеугольного котла на нагрузке 25% от номинальной. Коэффициент парной корреляции рассчитывался по формуле [9].

Таблица 3

Данные планирования системы «бенз(а)пирен–оксиды серы»

i	x_i	y_i	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$	Π
1	279	5,387	77841	29,019	1502,973	362702
2	271	5,295	73441	28,037	1434,945	359069
3	259	5,163	67081	26,656	1337,217	349722
4	251	5,079	63001	25,796	1274,829	345128
5	240	4,957	57600	24,572	1189,680	341569
6	233	4,880	54289	23,814	1137,040	337385
7	226	4,805	51076	23,088	1085,930	332895
8	220	4,731	48400	22,382	1040,820	329463
9	213	4,661	45369	21,725	992,793	324425
10	207	4,592	42849	21,086	950,544	320503
Σ	2399	49,550	580947	246,175	11946,771	-

Таблица 4

Данные планирования системы «бенз(а)пирен–монооксид углерода»

i	x_i	y_i	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$	Π
1	279	0,502	77841	0,252	140,058	328032
2	271	0,493	73441	0,243	133,603	324377
3	259	0,481	67081	0,231	124,579	315317
4	251	0,473	63001	0,223	118,723	310715
5	240	0,461	57600	0,212	110,640	306798
6	233	0,453	54289	0,205	105,549	302687
7	226	0,446	51076	0,199	100,796	298194
8	220	0,438	48400	0,192	96,360	294768
9	213	0,431	45369	0,185	91,803	289724
10	207	0,424	42849	0,179	87,768	285801
Σ	2399	4,602	580947	2,121	1109,879	-

Таблица 5

Данные планирования системы «оксиды серы–монооксид углерода»

i	x_i	y_i	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$	Π
1	5,387	0,502	29,019	0,252	2,704	35605
2	5,295	0,493	28,037	0,243	2,610	35628
3	5,163	0,481	26,656	0,231	2,483	35333
4	5,079	0,473	25,796	0,223	2,402	35342
5	4,957	0,461	24,572	0,212	2,285	35617
6	4,880	0,453	23,814	0,205	2,210	35632
7	4,805	0,446	23,088	0,199	2,143	35633
8	4,731	0,438	22,382	0,192	2,072	35625
9	4,661	0,431	21,725	0,185	2,008	35622
10	4,592	0,424	21,086	0,179	1,947	35629
Σ	49,550	4,602	246,175	2,121	22,864	-

Подставляя в формулу [9] значения параметров из табл. 3. получим, $r_{\text{БП-SO}} = 0,990$. Связь прямая, достаточно тесная. Оценим значимость коэффициентов регрессии и корреляции с помощью t-статистики Стьюдента. Для этого необходимо сравнить табличное значение t-критерия (для уровня значимости $\alpha=0,05$ и числа степеней свободы $n-2=10-2=8$) с расчетными критериями t_r . Коэффициент Стьюдента $t_{0,95;8} = 2,31$, следовательно, фактические значения t_r превосходят табличное значение $t_r = 19,85 > t_{0,95;8} = 2,31$, и коэффициент $r_{\text{БП-SO}}$ значимый.

Построим графическую зависимость суммарной токсичности выбросов от коэффициента избытка воздуха, используя данные табл. 3.

Повышение коэффициента избытка воздуха в пределах от 1,10 до 1,30 способствует снижению суммарной токсичности выбросов на 12,8 % (см. рисунок), что объясняется относительным приростом избытка воздуха, расходуемого на горение топлива, в соответствии с нестехиометрическим процессом сжигания. Максимальная токсичность выбросов рассматриваемой экологической системы «бенз(а)пирен-оксиды серы» равна $3,62 \cdot 10^6$. Минимальная агрессивность выброса для ведения

малотоксичного режима сжигания топлива соответствует значению коэффициента избытка воздуха 1,30.

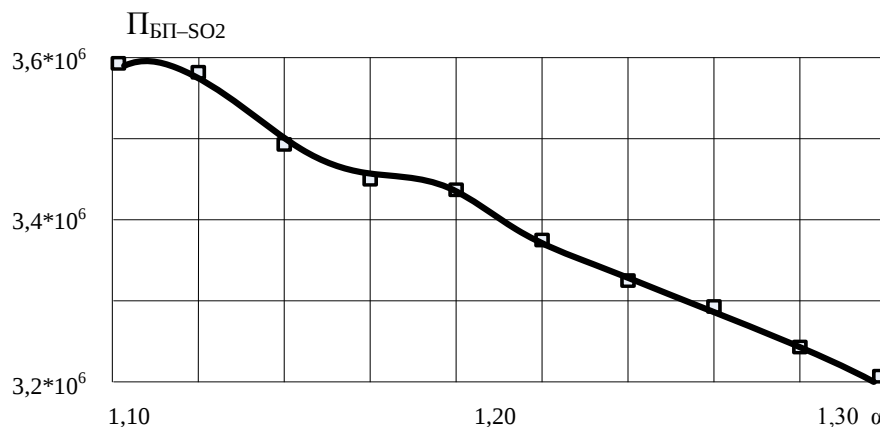


Рис. Влияние коэффициента избытка воздуха в топочной камере твердотопливного котла П-67 на суммарную токсичность газовых выбросов, обусловленную экологической системой «бенз(а)пирен-оксиды серы»

Для сформированной матрицы значений табл. 4 линейный коэффициент парной корреляции экологической системы «бенз(а)пирен–монооксид углерода» равен 0,987. Связь прямая, достаточно тесная. Табличное значение t-критерия равно $t_r = 17,37$. Коэффициент Стьюдента $t_{0,95;8} = 2,31$, следовательно, коэффициент $r_{\text{БП-СО}}$ значимый.

На основе полученных данных табл. 5 линейный коэффициент парной корреляции для корреляционной системы «оксиды серы - монооксид углерода» равен 0,997. Связь прямая, достаточно тесная. Табличное значение t-критерия равно $t_r = 36,62$. Коэффициент Стьюдента $t_{0,95;8} = 2,31$, следовательно, коэффициент $r_{\text{SO-CO}}$ значимый.

Необходимо отметить, что уровень концентрации БП в уходящих газах при работе пылеугольных котлов определяется в большей мере влиянием теплотворной способности топлива и действующей системой золошлакоудаления. При этом дополнительным важным фактором является избыток воздуха в топочной камере котла, определяющий интенсивность генерации продуктов полного и неполного сгорания для ведения малотоксичных режимов работы энергоблока.

Обсуждение результатов

Анализ корреляционных пар показал, что выбросы БП и оксидов серы тесно взаимосвязаны вследствие значительного влияния избытка воздуха на интенсивность образования этих продуктов сгорания. Суммарная токсичность выбросов при работе пылеугольных энергетических котлов большой мощности в рассматриваемых условиях практически полностью (более 92%) обуславливается присутствием в них БП. В системе планирования «бенз(а)пирен–оксиды серы» максимальная токсичность уходящих газов достигается при минимальном уровне БП в продуктах сгорания. При этом необходимо отметить, что в начальный момент уровень БП в продуктах сгорания составляет 279 мкг/м^3 , в конечный – 207 мкг/м^3 . В соответствии с этим при увеличении избытка воздуха в топочной камере процесс выгорания БП происходит достаточно интенсивно вследствие более полного окисления углеводородов топлива.

Система планирования «бенз(а)пирен–монооксид углерода» характеризует низкий суммарный уровень токсичности продуктов сгорания. Рассмотренная экологическая система описывает процессы неполной конверсии продуктов сгорания и позволяет находить решения по разработке новых режимов горения твердого топлива и регулированию топочного процесса.

Корреляционная пара «оксиды серы–монооксид углерода» по уровню токсичности в исследуемом диапазоне избытка воздуха сравнима с системной парой «бенз(а)пирен-оксиды серы». Коэффициенты парной корреляции для всех рассмотренных экологических систем положительны. Это указывает на непосредственную тесную связь БП и монооксида углерода, оксидов серы в условиях генерации токсичных соединений и формирования суммарной токсичности выбросов при сжигании угольного топлива. Следует отметить, что исследование взаимного влияния компонентов уходящих газов на суммарную токсичность выбросов при горении углеводородного топлива позволяет определить оптимальные нагрузочные режимы работы твердотопливного котлоагрегата при условии высокой экологической безопасности.

Выводы

Выполнен анализ взаимного влияния компонентов сгорания энергетического котла П-67 (Пп-2650-25-545/542 БТ) большой мощности на суммарную токсичность продуктов сгорания, обусловленную наличием в дымовых газах бенз(а)пирена, оксидов серы и монооксида углерода при незначительном влиянии азотсодержащих компонентов топлива. Вклад бенз(а)пирена в суммарную токсичность выбросов при работе котла П-67 на донецком концентрированном энергетическом угле при номинальной нагрузке составляет 92–97%; токсичность, обусловленная содержанием оксидов серы, составляет 2,0–7,5%; вклад монооксида углерода в общую агрессивность выбросов не превышает 0,5–1,0%.

Приведены данные для организации малотоксичных режимов работы пылеугольных котлов с учетом взаимного влияния серосодержащих компонентов дымовых газов и продуктов неполного горения, позволяющие в значительной степени обеспечить экологическую безопасность окружающей среды. Усиление токсичности выбросов при взаимном влиянии компонентов сгорания ограничено максимальной степенью выгорания всей группы ПАУ, включая бенз(а)пирен.

Summary

The paper presents the results of predicting total aggression of gas emissions of coal-fired boilers, due to sulfur-containing components in the presence of benz(a)pyrene, carbon monoxide, and a minor influence of the nitrogen-containing fuel components on the basis of correlation analysis. For ecological systems "benz(a)pyrene-oxide sulphur", "benz(a)pyrene-carbon monoxide", "sulfur oxide-carbon monoxide" is defined the coefficients of pair correlation. The data for the organization of small-toxic modes of coal-fired boilers taking into account the mutual influence of sulfur-containing components of the flue gases and products of incomplete combustion, allowing a significant degree to ensure environmental safety of the environment.

Keywords: sulfur oxides, benz(a)pyrene, toxicity, combustion of the fuel.

Литература

1. 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 Волгоградского архитектурно-строительного университета. 2012. №27(46). С.28–33.

2. Иваницкий М.С., Грига А.Д., Грига С.А., Фокин В.М. Построение модели для определения концентрации бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива в котельных установках систем теплоснабжения // Вестник Волгоградского архитектурно-строительного университета. 2012. №28(47). С.143–150.
3. 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.
4. 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.
5. Иваницкий М.С., Грига А.Д. Определение предельно допустимых концентраций нитропроизводных полиароматических соединений, образующихся в топках котлов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №11-12. С.17–23.
6. Иваницкий М.С., Грига А.Д., Васильева Ю.В. Построение модели расчета концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах энергетических котлов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. №5-6. С. 43–47.
7. Грига А.Д., Иваницкий М.С. Определение содержания бенз(а)пирена в уходящих газах камеры сгорания газовой турбины // Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия «Энергетика». 2014. №10. Т.5. С.86–88.
8. РД 153-34. 1-02. 316-2003. Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций. Введ. 01.07.03. Москва, 2003. 4 с.
9. Иваницкий М.С. Корреляционный анализ взаимного влияния оксидов азота, углерода и бенз(а)пирена на суммарную токсичность уходящих газов котлов. Часть 1. Энергетические котлы большой мощности // Альтернативная энергетика и экология. 2015. №17-18(181-182). С.138–142.
10. Иваницкий М.С. Суммарная токсичность продуктов сгорания при работе пылеугольных котлов ТЭЦ // Альтернативная энергетика и экология. 2015. №17-18(181-182). С.148–152.

Поступила в редакцию

14 октября 2015 г.

Иваницкий Максим Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» «Национального исследовательского университета (МЭИ) в г. Волжском. Тел: 8(844)321-01-60, 8(937)7259111. E-mail: mseiv@yandex.ru.