

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА, УГЛЕРОДА И БЕНЗ(А)ПИРЕНА НА СУММАРНУЮ ТОКСИЧНОСТЬ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ КОТЛОВ ТЭЦ: ЧАСТЬ 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОТЛЫ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

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

В статье приведен корреляционный анализ взаимного влияния компонентов дымовых газов на суммарную токсичность продуктов сгорания. Определены коэффициенты парной корреляции бенз(а)пирена и оксидов азота, бенз(а)пирена и оксидов углерода, оксидов азота и углерода для энергетических котлов большой мощности.

В условиях обеспечения заданного режима работы котла в зависимости от технологических факторов предложен подход для осуществления минимального уровня токсичности выбросов в периоды неблагоприятных метеорологических условий рассеивания или нарушений в работе газоочистных установок.

Показана роль взаимного воздействия компонентов сгорания на формирование общей токсичности выбросов в атмосферу воздуха.

Ключевые слова: бенз(а)пирен, горение, суммарная токсичность, продукты сгорания.

CORRELATION ANALYSIS OF THE MUTUAL INFLUENCE OF OXIDES OF NITROGEN, CARBON AND BENZ(A)PYRENE IN THE TOTAL TOXICITY OF EXHAUST GASES OF BOILERS CHP: PART 1. ENERGY GREAT POWER BOILERS

M.S. Ivanitskii

Volzhsky 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 presents the correlation analysis of the mutual influence of the components of the flue gases to the total toxicity of combustion products. Determined the coefficients of pair correlation benz(a)pyrene and oxides of nitrogen, benz(a)pyrene and oxides of carbon, oxides of nitrogen and carbon for energy large capacity boilers.

Providing a given mode of operation of the boiler depending on technological factors, the proposed approach is to implement a minimum level of toxic emissions during periods of adverse meteorological conditions for dispersion or disruption to the gas cleaning units.

The role of mutual influence of the components of the combustion in the formation of the overall toxicity of emissions of air.

Keywords: benz(a)pyrene, the burning, the total toxicity of the combustion products.



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.

Information about the author: Ph.D., art. lecturer in "Heat and Heat Engineering".

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

Research area: fuel combustion processes, ecology of energy.

Publications: 40.

Введение

Сжигание топлива в энергетических котельных установках сопровождается образованием токсичных компонентов. В состав дымовых газов входят оксиды азота, углерода, серы, полиароматические углеводороды (ПАУ), в том числе бенз(а)пирен (БП), зола, шлак и другие вредные вещества. Выход токсичных компонентов характеризует экологичность процесса горения топлива. При этом массовый выброс веществ не является показателем, указывающим на суммарную токсичность. При определении суммарной токсичности выбросов необходимо учитывать показатели частной токсичности компонентов горения. Необходимо отметить, что отдельные компоненты уходящих газов усиливают свою токсичность в присутствии других, например, оксиды азота и бенз(а)пирен. В результате такого взаимодействия образуются новые соединения более высокой токсичности – суперэкоотоксиканты. Определение взаимного влияния компонентов уходящих газов позволяет прогнозировать токсическое действие выбросов. В данной работе проведен анализ взаимного влияния компонентов дымовых газов для энергетических котлов большой мощности (свыше 25 МВт) [1-5].

Экспериментальное и численное исследование

В качестве объекта исследования выбран газомазутный котел ТГМ-84 с двухсветным экраном и шестью горелками. Основным топливом является природный газ Саушкинского месторождения. В качестве варьируемых режимных параметров используется коэффициент избытка воздуха в диапазоне 1,01-1,10. Нагрузка котла остается при этом постоянной ($K_D = 1$). Рециркуляция дымовых газов, ступенчатое сжигание топлива и подача влаги в топочную камеру не производится ($K_P = 1$, $K_{CT} = 1$, $K_{ВЛ} = 1$). Теплонапряжение поверхности зоны активного горения топочной камеры $q_{ЛГ} = 0,609$ МВт/м². Теплонапряжение топочно-го объема камеры $q_V = 209,3$ кВт/м³. Объемный расход дымовых газов при изменении коэффициента избытка воздуха в заданном диапазоне варьировался в пределах 91,8-100,3 м³/с.

Для анализа содержания в уходящих газах оксидов азота, серы и углерода применялся переносной газоанализатор TESTO-330XL. В комплект газоанализатора входит никель-хром-никель термopара, погрешность измерений которой 0,5% от измеренного значения температуры. Погрешность измерения давления (разрежения) находится в пределах 1,5% от измеренного значения давления. Потери тепла, измерения КПД котла определялись с погрешностью 0,1%. Измерения O₂, CO₂ выполнялись с погрешностью 0,2% и с быстродействием менее 20 с. Погрешность измерения CO, NO, SO₂ – 5% от измеренного значения при быстродействии менее 30 с [4].

Рассмотрим методы для определения концентрации БП на основе функциональных связей технологических параметров, характеризующих сжигание топлива. Определение концентрации БП в дымовых газах сопряжено с большими трудностями вследствие отсутствия доступных измерительных систем. В настоящее время определение содержания БП в уходящих газах производится в основном аккредитованными лабораториями.

Методика расчетного определения БП в уходящих газах котельных установок основана на обобщении большого количества экспериментальных данных. Погрешность определения содержания БП при этом составляет не более 20%.

Концентрация БП в дымовых газах энергетических котлов при сжигании природного газа $C_{БП}$, приведенная к избытку воздуха в газах $\alpha = 1,4$, рассчитывается по формуле

$$C_{БП} = q_{ЛГ}^{-1,26} (0,0536 + 0,163 \cdot 10^{-3} q_V) \prod_{i=1}^N K_i, \quad (1)$$

где $q_{ЛГ}$ – теплонапряжение поверхности зоны активного горения, МВт/м²; q_V – теплонапряжение топочно-го объема, кВт/м³; $\prod_{i=1}^N K_i = K_\alpha K_P K_D K_{CT} K_{ВЛ}$ – произведение коэффициентов для учета влияния коэффициента избытка воздуха, рециркуляции, нагрузки котла, ступенчатого сжигания топлива, подачи влаги [6].

Суммарный показатель токсичности дымовых газов определяется по формуле

$$\Pi = \sum_{i=1}^N \Pi_i, \quad (2)$$

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

В табл. 1-3 под обозначением величин x_i и y_i следует понимать соответствующие значения компонентов корреляционных пар.

Рассчитаем линейный коэффициент парной корреляции по формуле

$$r_{xy} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}. \quad (3)$$

Подставляя значения параметров из табл. 1, получим, $r_{xy} = -0,904$. Связь обратная, 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 :

$$t_r = \frac{r \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}. \quad (4)$$

Коэффициент Стьюдента $t_{0,95;8} = 2,31$, следовательно, фактические значения t_r превосходят табличные значения $t_r = 8,11 > t_{0,95;8} = 2,31$ и коэффициент $r_{\text{БП-НО}}$ значимый.

Таблица 1
Данные планирования системы
«бенз(а)пирен-оксид азота»

Table 1

Planning data system
«benz(a)pyrene-nitric oxide»

i	x_i	y_i	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$	Π
1	127	113	16129	12769	14351	441035
2	99	119	9801	14161	11781	464950
3	77	127	5929	16129	9779	497643
4	60	139	3600	19321	8340	547592
5	47	146	2209	21316	6862	578711
6	37	150	1369	22500	5550	598798
7	28	154	784	23716	4312	619256
8	22	164	484	26896	3608	646656
9	22	176	484	30976	3872	719637
10	22	191	484	36481	4202	790173
Σ	541	1479	41273	224265	72657	-

Таблица 2
Данные планирования системы
«бенз(а)пирен-монооксид углерода»

Table 2

Planning data system
«benz(a)pyrene-carbon monoxide»

i	x_i	y_i	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$	Π
1	127	100	16129	10000	12700	23868
2	99	87	9801	7569	8613	19652
3	77	79	5929	6241	6083	16474
4	60	68	3600	4624	4080	13622
5	47	55	2209	3025	2585	10887
6	37	45	1369	2025	1665	8869
7	28	34	784	1156	952	6714
8	22	20	484	400	440	4714
9	22	13	484	169	286	4063
10	22	10	484	100	220	3811
Σ	541	511	41273	35309	37624	-

Таблица 3
Данные планирования системы
«оксид азота-монооксид углерода»

Table 3

Planning data system
«nitric oxide-carbon monoxide»

i	x_i	y_i	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$	Π
1	113	100	12769	10000	11300	434489
2	119	87	14161	7569	10353	460348
3	127	79	16129	6241	10033	494770
4	139	68	19321	4624	9452	545558
5	146	55	21316	3025	8030	576916
6	150	45	22500	2025	6750	597198
7	154	34	23716	1156	5236	617660
8	164	20	26896	400	3280	662261
9	176	13	30976	169	2288	716394
10	191	10	36481	100	1910	786452
Σ	1479	511	224265	35309	68632	-

Для сформированной матрицы значений из табл. 2 рассчитаем линейный коэффициент парной корреляции для системы «бенз(а)пирен-монооксид углерода» по (3), $r_{xy} = 0,949$. Связь прямая, достаточно тесная.

Значимость коэффициентов регрессии и корреляции определим с помощью t -статистики Стьюдента. Для этого сравним табличное значение t -критерия для

уровня значимости с расчетными критериями $t_r = 8,51$. Коэффициент Стьюдента $t_{0,95;8} = 2,31$, следовательно, фактические значения t_r превосходят табличные значения, поэтому коэффициент $r_{\text{БП-СО}}$ значимый.

На основе полученных из табл. 3 данных рассчитаем линейный коэффициент парной корреляции для системы «оксиды азота-монооксид углерода» по (3), $r_{xy} = -0,975$. Связь обратная, достаточно тесная.

Оценим значимость коэффициентов регрессии и корреляции с помощью t -статистики Стьюдента, применяя сравнение табличного значения t -критерия (для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $n - 2 = 10 - 2 = 8$) с расчетными критериями $t_r = 12,42$. Коэффициент Стьюдента $t_{0,95;8} = 2,31$, следовательно, фактические значения t_r превосходят табличные значения, поэтому коэффициент $r_{\text{NO-CO}}$ значимый.

Анализ показывает, что концентрация БП в дымовых газах при работе газовых котлов определяется в значительной степени параллельно идущими процессами генерации других токсичных соединений. На выходе из топочной камеры процессы конверсии БП в полной мере не завершены. В свою очередь, содержание оксидов азота в уходящих газах полностью обеспечивается в топочной камере. Это характеризует достаточно сильное различие в условиях и механизмах генерации БП и оксидов азота.

Обсуждение результатов

Проведенный корреляционный анализ показал, что выбросы БП и оксидов азота достаточно тесно взаимосвязаны вследствие значительного влияния избытка воздуха в топочной камере котла в начальной стадии генерации продуктов сгорания. В системе планирования «бенз(а)пирен-оксид азота» максимальная токсичность уходящих газов достигается при минимальном уровне БП в продуктах сгорания. При этом необходимо отметить, что начальный уровень БП в продуктах сгорания составляет 127 нг/м^3 , в конечный момент 22 нг/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. В целом данная корреляционная пара отражает процессы неполной конверсии и в значительной степени может характеризовать недостатки топочного режима и пути его совершенствования.

Корреляционная пара «оксид азота-монооксид углерода» по уровню токсичности в исследуемом диапазоне избытка воздуха сравнима с системной парой «бенз(а)пирен-оксид азота». Коэффициенты парной корреляции для оценок систем «бенз(а)пирен-оксид азота» и «оксид азота-монооксид углерода» отрицательны. Это указывает на непосредственную тесную связь БП и монооксида углерода в условиях генерации токсичных соединений при сжигании природного газа. Следует отметить, что исследования взаимного влияния компонентов уходящих газов на суммарную токсичность выбросов при горении углеводородного топлива позволяют сократить границы санитарно-защитной зоны станции посредством проведения оптимизационных работ топочного процесса. Суммарная токсичность выбросов при работе газовых энергетических котлов большой мощности на 2-7% обуславливается присутствием в них БП.

Выводы

Проведен анализ взаимного влияния компонентов сгорания энергетических котлов большой мощности на суммарную токсичность дымовых газов для обеспечения предельно допустимых выбросов и концентраций в зоне расположения теплоэлектростанции.

Для заданного режима работы котла в зависимости от технологических факторов с использованием предлагаемого подхода возможно обеспечение минимального уровня токсичности выбросов в периоды неблагоприятных метеорологических условий рассеивания или нарушений в работе газоочистных установок. Вклад бенз(а)пирена в суммарную токсичность выбросов при работе энергетических котлов на природном газе составляет 2-7%.

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.

References

1. Ivanickij M.S., Griga A.D. Opredelenie koncentracii benz(a)pirena v dymovyh gazah kotel'nyh ustanovok i sposob avtomatičeskogo regulirovaniâ processa gorenîâ // Ënergobereženie i vodopodgotovka. 2013. № 3 (83). S. 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 – ISJAE. №14 (136). 2013. 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. РД 153-34. 1-02. 316-2003. Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций. Введ. 01.07.03. Москва, 2003.

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 – ISJAE. №14 (136). 2013. S. 67-70.

4. Ivanickij M.S., Griga A.D. Opredelenie predel'no dopustimyh koncentracij nitroproduzvodnyh poli-aromatičeskih soedinenij, obrazuûšihâ v topkakh 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. 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

