

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА, УГЛЕРОДА И БЕНЗ(А)ПИРЕНА НА СУММАРНУЮ ТОКСИЧНОСТЬ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ КОТЛОВ ТЭЦ: ЧАСТЬ 2. КОТЛЫ МАЛОЙ ТЕПЛОВОЙ 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

Статья посвящена оценке влияния отдельных компонентов сгорания топлива на суммарную токсичность выброса. Определены предельные уровни токсичности уходящих газов для котлов малой тепловой мощности. Проведен анализ взаимного влияния компонентов сгорания для повышения точности определения общей агрессивности предельно допустимого выброса.

Предложенный подход позволяет более детально оценивать формирование общего фоновый уровня загрязненности воздушного бассейна городской застройки токсичными веществами в тех районах, где преобладающими источниками тепло-снабжения являются котельные установки малой тепловой мощности. Прогнозирование суммарной токсичности выбросов обусловлено необходимостью критической оценки оптимизации топочного режима конкретной энергоустановки.

Ключевые слова: корреляция, бенз(а)пирен, оксиды азота, монооксид углерода, токсичность выброса.

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 2. BOILERS OF SMALL THERMAL POWER

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 the assessment of the impact of individual components of the combustion fuel to the total toxicity of the emissions. Defined limits of toxicity of exhaust gases for boilers of low thermal capacity. The analysis of the mutual influence of the components of combustion to increase the accuracy of determining the overall aggressiveness of maximum permissible emissions.

The proposed approach allows more detail to assess the formation of a common background level of air pollution urban sprawl toxic substances, in areas where the predominant sources of heat are plants where the low thermal capacity. Forecasting the total toxicity of the emissions caused by the necessity of a critical assessment of the optimization of the combustion mode of a particular plant.

Keywords: correlation, benz(a)pyrene, nitrogen oxides, carbon monoxide, toxic emissions.



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

При горении органического топлива в топочной камере котельной установки генерируются токсичные вещества. Содержание вредных веществ в дымовых газах характеризует массовый выброс продуктов сгорания, но не является показателем суммарной токсичности. Для определения суммарной токсичности уходящих газов необходимо использовать частные показатели токсичности компонентов.

Частные показатели токсичности учитывают вредность конкретного компонента дымовых газов, например, частный показатель токсичности монооксида углерода – 1; оксида азота (VI) – 41,1; бенз(а)пирена – $12,6 \cdot 10^8$. Бенз(а)пирен обладает канцерогенным и мутагенным действием, вследствие этого характеризуется высоким значением токсичности. Содержание БП в дымовых газах является важной эксплуатационной характеристикой паровых и водогрейных котлов. Необходимо отметить, что пылеугольные котлы характеризуются более высоким содержанием БП в дымовых газах, чем котлы, сжигающие газ или мазут. Определение концентрации бенз(а)пирена в уходящих газах котлов инструментальными методами достаточно сложное и проводится с низкой степенью точности [1-6]. В данной работе проведен корреляционный анализ взаимного влияния выбросов на суммарную токсичность продуктов горения для котлов малой тепловой мощности (менее 25 МВт).

Экспериментальное и численное исследование

В качестве объекта исследования выбран газовый водогрейный котел Buderus S825L-7700 с инжекционной низкоэмиссионной горелкой LAMTEC (FBR) EN 267 CE. В котле поверхности нагрева расположены симметрично, в его конструкции использован принцип трехходового прохождения продуктов сгорания, имеется цилиндрическая жаровая труба и водоохлаждаемая камера с поворотом газового потока.

Основным топливом является природный газ со следующими рабочими характеристиками: $\text{CH}_4 = 94\%$, $\text{H}_2 = 2\%$, $\text{CO}_2 = 0,2\%$, $\text{C}_2\text{H}_4 = 1\%$, $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,5\%$, $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,7\%$, $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,6\%$. В качестве варьируемых режимных параметров используется коэффициент избытка воздуха в диапазоне 1,05-1,32. Нагрузка котла остается при этом постоянной ($K_d = 1$). Рециркуляция дымовых газов и ступенчатое сжигание топлива не производится ($K_p = 1$, $K_{ст} = 1$). Теплонапряжение топочного объема камеры $q_V = 460 \text{ кВт/м}^3$. Объемный расход уходящих газов в заданном диапазоне коэффициента избытка воздуха варьировался в пределах 2,96-3,21 м³/с.

Экспериментальное определение содержания оксидов азота, серы и углерода в дымовых газах проводилось при помощи переносного газоанализатора TESTO-330XL. Измерения O_2 , CO_2 выполнялись с погрешностью 0,2%. Погрешность измерения CO , NO , SO_2 – 5% от измеренного значения. Погрешность измерений температуры дымовых газов составляла 0,5% от измеренного значения.

В отношении снижения выбросов БП в воздушный бассейн при стороннем влиянии других компонентов продуктов сгорания сведения практически отсутствуют. Вероятно, что только при комплексном подходе к данной проблеме возможно оценить совместное воздействие отдельных веществ уходящих газов и прогнозировать уровень токсичности выбросов. При этом экологическую безопасность окружающей среды можно обеспечить, если определить оптимальные значения режимных параметров при работе котельной установки [4].

Концентрация БП в сухих дымовых газах водогрейных котлов при сжигании природного газа $C_{\text{Б(а)П}}^{\Gamma}$ в зависимости от диапазона значения коэффициента избытка воздуха и объемного теплонпряжения топочной камеры при $q_V = 250\text{-}500 \text{ кВт/м}^3$ рассчитывается по формулам [3]

$$C_{\text{Б(а)П}}^{\Gamma} = \frac{10^{-6} R (0,11 q_V - 7)}{e^{3,5(\alpha-1)}} \prod_{i=1}^N K_i \text{ при } 1,05 \leq \alpha \leq 1,25; (1)$$

$$C_{\text{Б(а)П}}^{\Gamma} = \frac{10^{-6} R (0,13 q_V - 5)}{1,3 e^{3,5(\alpha-1)}} \prod_{i=1}^N K_i \text{ при } \alpha \geq 1,25, \quad (2)$$

где q_V – теплонепрежение топочного объема, кВт/м³; R – коэффициент, учитывающий тип горелочного устройства (при сжигании газа $R = 1$); α – коэффициент избытка воздуха в дымовых газах на выходе из топки; $\prod_{i=1}^N K_i = K_p K_d K_{CT}$ – произведение коэффициентов для учета влияния рециркуляции, нагрузок котла, ступенчатого сжигания топлива. Погрешность данной методики составляет не более 20% [3].

Суммарный показатель токсичности дымовых газов определяется по формуле

$$\Pi = \sum_{i=1}^N \Pi_i, \quad (3)$$

здесь 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

$$r_{\text{БП-НО}} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}. \quad (4)$$

Подставляя значения параметров, получим $r_{\text{БП-НО}} = -0,986$. Связь обратная, достаточно тесная.

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	37	60	1369	3600	2220	7437
2	33	68	1089	4624	2244	8509
3	30	74	900	5476	2220	9330
4	27	82	729	6724	2214	10315
5	24	88	576	7744	2112	10940
6	22	96	484	9216	2112	12119
7	20	108	400	11664	2160	13616
8	17	114	289	12996	1938	14355
9	15	121	225	14641	1815	15525
10	14	131	196	17161	1834	17341
Σ	239	942	6257	93846	20869	-

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	37	10	1369	100	370	168
2	33	5	1089	25	165	140
3	30	5	900	25	150	131
4	27	2	729	4	54	111
5	24	0	576	0	0	93
6	22	0	484	0	0	85
7	20	0	400	0	0	78
8	17	0	289	0	0	66
9	15	0	225	0	0	59
10	14	0	196	0	0	57
Σ	239	22	6257	154	739	-

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	60	10	3600	100	600	7329
2	68	5	4624	25	340	8399
3	74	5	5476	25	370	9200
4	82	2	6724	4	164	10285
5	88	0	7744	0	0	11104
6	96	0	9216	0	0	12152
7	108	0	11664	0	0	13716
8	114	0	12996	0	0	14525
9	121	0	14641	0	0	15715
10	131	0	17161	0	0	17283
Σ	942	22	93846	154	1474	-

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 $n - 2 = 8$) с расчетными критериями t_r .

$$t_r = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (5)$$

Коэффициент Стьюдента $t_{0,95;8} = 2,31$, следовательно, фактические значения t_r превосходят табличное значение: $t_r = 16,73 > t_{0,95;8} = 2,31$ коэффициент $r_{\text{БП-NO}}$ значимый.

Линейный коэффициент парной корреляции для системы «бенз(а)пирен-монооксид углерода» определим по формуле (3), $r_{\text{БП-CO}} = 0,889$. 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 $\alpha = 0,05$ с расчетным критерием $t_r = 5,5$. Коэффициент Стьюдента $t_{0,95;8} = 2,31$, следовательно, фактические значения t_r превосходят табличное значение, поэтому коэффициент $r_{\text{БП-CO}}$ значимый.

Для системы «оксид азота-монооксид углерода» определим линейный коэффициент парной корреляции по (3), $r_{\text{NO-CO}} = -0,815$. Связь обратная, достаточно тесная. Оценим значимость коэффициентов регрессии и корреляции с помощью t -статистики Стьюдента, сравнивая табличное значение t -критерия для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $n - 2 = 8$ с расчетным критерием $t_r = 3,98$. Коэффициент Стьюдента $t_{0,95;8} = 2,31$, следовательно, фактические значения t_r превосходят табличное значение, поэтому коэффициент $r_{\text{NO-CO}}$ значимый.

Обсуждение результатов

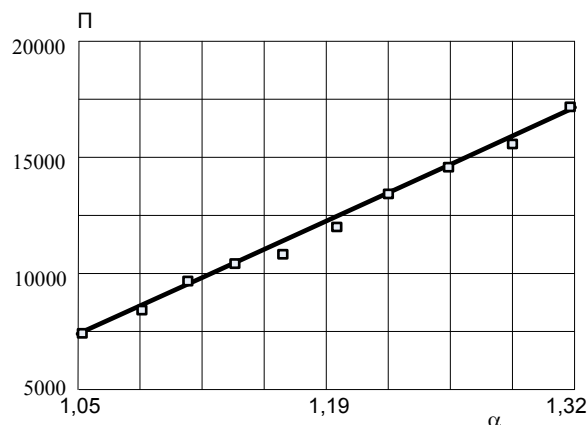
Анализ показал, что выбросы БП, оксидов азота и монооксида углерода тесно взаимосвязаны, что отражается линейными коэффициентами парной корреляции. В компонентной среде «бенз(а)пирен-оксид азота» достигается максимальная токсичность дымовых газов. При этом начальная концентрация БП в продуктах сгорания составляет 37 нг/м^3 , конечное значение 14 нг/м^3 . Высокая токсичность этой пары компонентов обусловлена значительным выходом и частной вредностью оксидов азота.

В системе планирования «бенз(а)пирен-монооксид углерода» суммарная токсичность уходящих газов принимает минимальные значения по сравнению с первой корреляционной парой. Для котлов малой тепловой мощности данная система планирования компонентов позволяет осуществлять более полное выгорание топлива в условиях обеспечения минимальной токсичности выбросов оптимизацией режимных мероприятий.

Коэффициенты парной корреляции для оценочных значений компонентов «бенз(а)пирен-оксид азота» и «оксид азота-монооксид углерода» отрицательны. Система «оксид азота-монооксид углерода» по уровню вредности в диапазоне изменения избытка воздуха соизмерима с корреляционной парой «бенз(а)пирен-оксид азота», что характеризует пря-

мую связь БП и монооксида углерода в заданных условиях. Суммарная вредность уходящих газов в приведенных условиях на 0,9-2,2% обуславливается частной токсичностью БП. Положительная сторона изложенного подхода состоит в том, что в перспективе его можно уточнить на базе новых опытных данных измерения концентрации БП в уходящих газах котлов малой мощности.

Построим графическую зависимость суммарной токсичности выбросов от коэффициента избытка воздуха, используя данные табл. 1 (рисунок).



Зависимость суммарной токсичности выбросов от коэффициента избытка воздуха для газового водогрейного котла Buderus S825L-7700
The dependence of the total toxicity of emissions from air excess factor for gas hot water boiler Buderus S825L-7700

Приведенная зависимость показывает, что при увеличении избытка воздуха в пределах от 1,05 до 1,32 суммарная токсичность выбросов увеличивается более чем в 2 раза. Это происходит за счет увеличения выхода оксидов азота в результате большей подачи воздуха для сжигания топлива и соответствующим снижением образования БП.

Выводы

Проведен анализ суммарной токсичности уходящих газов котлов малой тепловой мощности. Установлено, что суммарная вредность дымовых газов в приведенных диапазонах режимных характеристик на 0,9-2,2% обуславливается частной токсичностью БП. Прогнозирование суммарной токсичности выбросов обусловлено необходимостью критической оценки оптимизации топочного режима конкретной энергоустановки. Предложенный подход позволяет более детально оценивать формирование общего фоновое уровня загрязненности воздушного бассейна городской застройки токсичными веществами в тех районах, где преобладающими источниками теплоснабжения являются котельные установки малой тепловой мощности.

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. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. М., 1999.
4. Грига А.Д., Иваницкий М.С. Определение содержания бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок малой мощности // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. 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 вузов. Проблемы энергетика. 2013. № 11-12. С. 17-23.
6. 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.

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 // 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 sžiganiî uglevodorodnogo topliva // Vestnik VolgGASU. 2012. № 27(46). S. 28-33.
3. Metodika opredeleniâ vybrosov zagrâznâûših vešestv v atmosferu pri sžiganiî topliva v kotlah proizvoditel'nost'û menee 30 tonn para v čas ili menee 20 Gkal v čas. M., 1999.
4. 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. 2013. № 14(136). S. 67-70.
5. Ivanickij M.S., Griga A.D. Opredelenie predel'no dopustimyh koncentracij nitroprodukovnyh poli-aromatičeskih soedinenij, obrazuûšihâ v topkakh kotlov // Izvestiâ vuzov. Problemy ènergetiki. 2013. № 11-12. S. 17-23.
6. 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.

Транслитерация по ISO 9:1995

