

УДК 621.311.22:574

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ВОДОТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ С УЧЕТОМ ФАКТОРА ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

¹Ростунцова И.А., ²Шевченко Н.Ю.

¹ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет
им. Ю.А. Гагарина», Саратов;

²Камышинский технологический институт, филиал ФГБОУ ВПО «Волгоградский
государственный технический университет», Камышин, e-mail: kti@kti.ru

В статье представлена математическая модель исследования образования вредных выбросов, действующего теплоэнергетического оборудования тепловых электрических станций с учетом ввода влаги в зону горения. При проектировании нового и модернизации действующего теплоэнергетического оборудования ТЭС необходима теоретическая оценка его экологического воздействия на окружающую среду. Проведено теоретическое исследование возможности образования топливных оксидов азота на различных уровнях прохождения дымовых газов по тракту энергетической установки. Получены зависимости адиабатической температуры горения, критерия Больцмана и максимальной температуры дымовых газов в ядре факела от условий теплообмена и с учетом влияния ввода влаги. Проведены опытные исследования влияния ввода влаги на изменение концентраций оксидов азота для котла БКЗ-320-140. Максимальная величина отклонений расчетной величины концентрации оксида азота от экспериментальных значений, не превышает 1,5%.

Ключевые слова: теплоэнергетическое оборудование, экологическое воздействие на окружающую среду, концентрация оксидов азота, ввод влаги в топочные процессы, вредные выбросы, природоохранные технологии

MODELING OF COMBUSTION OF FUEL MIXES IN THE ENERGY INDUSTRY, TAKING INTO ACCOUNT THE FACTOR OF ENVIRONMENT PROTECTION

¹Rostunova I.A., ²Shevchenko N.J.

¹Saratov State Technical University, Saratov;

²Kamyshin Institute of Technology, branch of Volgograd State Technical University, Kamyshin,
e-mail: kti@kti.ru

The authors of the article gave a mathematical model for the study of education of emissions of thermal power stations. The model was considered entry of moisture into the zone of burning boiler. At designing of new and modernization of existing power equipment electric power stations need theoretical evaluation of its environmental impact on the environment. The theoretical study of an opportunity of formation of fuel and nitrogen oxides at various levels in the flue gases pass through the line power plant. The authors obtained according to the adiabatic temperature of combustion, criterion Boltzmann and maximum temperature of flue gases in the nucleus of the torch from the conditions of heat exchange with the influence of the entry of moisture. Experimental study of the effect of the entry of moisture on changing concentrations of nitrogen oxides for the boiler BKZ-320-140. Maximum deviations of the calculated values for the concentration of nitric oxide from the experimental values do not exceed 1.5%.

Keywords: the heat power equipment, ecological impact on the environment, the concentration of nitrogen oxides, the entry of moisture into the combustion processes, emissions, environmental technology

При проектировании нового и модернизации действующего теплоэнергетического оборудования тепловой электрической станции (ТЭС) необходима теоретическая оценка его экологического воздействия на окружающую среду, позволяющая быстро и с достаточной точностью определять допустимое загрязнение атмосферного воздуха и степень снижения вредных выбросов при внедрении природоохранных технологий.

Первым этапом в разработке аналитической модели образования вредных выбросов в факеле энергетической установки является исследование физико-химических механизмов образования вредных выбросов, в частности одного из наиболее токсичных

компонентов в составе дымовых газов – оксидов азота (NO_x) при сжигании различных видов топлива.

В рамках данной разработки проведено теоретическое исследование возможности образования термических, «быстрых» и топливных оксидов азота на различных уровнях прохождения дымовых газов по тракту энергетической установки, а также факторов, влияющих на количественную характеристику выхода оксида азота при сжигании топлива.

Из проведенного анализа установлено, что преобладающее влияние на формирование концентраций NO_x в зоне активного горения оказывают термические оксиды азота, для снижения, образования которых

целесообразно регулировать температурный уровень и концентрацию свободного кислорода, что, возможно, осуществлять путем ввода влаги в топочные процессы.

Разработана аналитическая модель исследования образования вредных выбросов с учетом ввода влаги в зону горения. В основу данной модели положен макрокинетический закон протекания брутто-реакции образования оксидов азота в зоне высоких температур. Методика отражает закономерности образования NO_x в основном по термическому механизму Я.Б.Зельдовича, исходя из избирательного воздействия дополнительно вводимой влаги преимущественно на термические оксиды азота. В методике определено влияние, оказываемое на образование оксидов азота температурного уровня, концентрации реагирующих веществ и время нахождения их в зоне высоких температур.

При разработке модели образования оксидов азота с учетом ввода влаги использовались известные положения, изложенные в работах Я.Б. Зельдовича [1], И.Я. Сигала [6], Т.Б. Эфендиева [8] и ряда других авторов [4, 5].

Для определения концентраций оксидов азота, образующихся в процессе горения в использовался метод разложения экспоненты, согласно которому концентрация NO находится из выражения:

$$C_{\text{NO}} = \left(\frac{dC_{\text{NO}}}{d\tau} \right) \tau_{\text{NO}}, \quad (1)$$

где $\frac{dC_{\text{NO}}}{d\tau}$ – скорость реакции образования оксидов азота при максимальной темпера-

туре факела T_m , % об./с; τ_{NO} – условное время реакции, с.

С учетом макрокинетического закона выход оксидов азота будет описываться уравнением:

$$\frac{dC_{\text{NO}}}{d\tau} = 2K_{\text{II}} C_{\text{O}_2} C_{\text{N}_2}, \quad (2)$$

где K_{II} – константа скорости реакции, (% об./с)⁻¹; C_{O_2} и C_{N_2} – объемные концентрации соответственно атомарного кислорода и молекулярного азота в зоне максимальной температуры T_m , % об.

Концентрация атомарного кислорода зависит от максимальной температуры в зоне горения. При температурах выше 1800–2000К ее можно найти из условия равновесия при горении с избытком окислителя по формуле

$$C_{\text{O}} = [K] \sqrt{C_{\text{O}_2}}, \quad (3)$$

где $[K]$ – константа равновесия, (% об./с)^{-0.5}; C_{O_2} – концентрация кислорода в продуктах сгорания, % об.

Константы K_{II} и $[K]$ могут быть определены по выражениям:

$$K_{\text{II}} = 6,1 \cdot 10^7 \cdot \exp \left[-\frac{75400}{R \cdot T_m} \right], \quad (4)$$

$$[K] = 0,75 \cdot 10^4 \cdot \exp \left[\frac{59300}{K \cdot T_m} \right], \quad (5)$$

где R – универсальная газовая постоянная ($R=8,326$ Дж/моль · К); T_m – максимальная температура факела, К.

Подставив выражения (3) – (5) в формулу (2), получим следующее соотношение для определения скорости образования оксидов азота:

$$\left(\frac{dC_{\text{NO}}}{d\tau} \right) = 2K_{\text{II}} \sqrt{C_{\text{O}_2}} C_{\text{N}_2} = 9,15 \cdot 10^{11} \sqrt{C_{\text{O}_2}} C_{\text{N}_2} \exp \left(-\frac{134700}{RT_m} \right), \quad (6)$$

Концентрации кислорода и азота в зоне реакции определяются согласно принятому в методике допущению при окислении азота воздуха. При этом указанные concentra-

ции зависят от параметров, характеризующих режимы работы горелок и топки котла, а также от возможного их изменения за счет ввода добавочной влаги.

$$C_{\text{O}_2} = \frac{21 \cdot V_{\text{гор}}^0 \cdot (\alpha_{\text{гор}} + 0,5 \cdot \Delta \alpha_{\text{T}} - 1)}{[V_{\text{T}}^0 + (\alpha_{\text{гор}} + 0,5 \cdot \Delta \alpha_{\text{T}} - 1) \cdot V_{\text{T}}^0 + \vartheta_{\text{II}} \cdot g_{\text{впр}}]}, \quad (7)$$

$$C_{N_2} = \frac{79 \cdot V^0 \cdot (\alpha_{гор} + 0,5 \cdot \Delta\alpha_m - 1)}{[V_2^0 + (\alpha_{гор} + 0,5 \cdot \Delta\alpha_m - 1) \cdot V^0 + \vartheta_n \cdot g_{впр}]}, \quad (8)$$

где $\alpha_{гор}$ – коэффициент избытка воздуха в горелках; $\Delta\alpha_T$ – присосы воздуха в топке; V_T^0 и V^0 – теоретические объемы соответственно продуктов сгорания и воздуха, m^3/m^3 (m^3/kg); ϑ_n – удельный объем пара

m^3/kg ; $g_{впр}$ – водотопливное отношение $kg_{воды}/m^3_{топлива}$ ($kg_{воды}/kg_{топлива}$).

Подставляя (7) – (8) в (6) и сделав ряд преобразований, получим зависимость изменения скорости образования оксидов азота от количества вводимой влаги:

$$\left(\frac{dC_{NO}}{d\tau}\right)_g = 9,15 \cdot 10^{11} \frac{L_1}{\sqrt{(L_2 + \vartheta_{II} \cdot g_{впр})^3}} \cdot \exp\left[-\frac{L_3}{T_m}\right], \quad (9)$$

$$\text{где } L_1 = \sqrt{21 \cdot V^0 \cdot (\alpha_{гор} + 0,5 \cdot \Delta\alpha_T - 1)} \cdot [79 \cdot V_T^0 \cdot (\alpha_{гор} + 0,5 \cdot \Delta\alpha - 1)] \quad (10)$$

$$L_2 = V_T^0 + (\alpha_{гор} + 0,5 \cdot \Delta\alpha_T - 1) \cdot V^0, \quad (11)$$

$$L_3 = \frac{134700}{R}, \quad (12)$$

При расчете уровня максимальных температур T_m с учетом ввода влаги в зону горения использовалась методика, в основу которой положено определение адиабатической температуры в топке и критерия Больцмана.

Адиабатическая температура горения рассчитывается по известной зависимости, когда все тепловыделение в топке воспринимается продуктами сгорания с учетом поправки на дополнительно вводимую влагу.

Получены зависимости адиабатической температуры горения T_a , критерия Больцмана и максимальной температуры дымовых газов в ядре факела T_m от условий теплообмена и с учетом влияния ввода влаги.

В итоге получены аналитические зависимости для определения концентраций оксидов азота $C_{NO_2}^g$ ($г/м^3$), учитывающая ввод дополнительной влаги в топку котла и коэффициента выхода оксидов азота при сжигании топлива также с учетом ввода влаги.

$$C_{NO_2}^g = 286,99 \cdot 10^{11} \cdot \frac{L_1 \cdot A_T}{\sqrt{(L_2 + \vartheta_{II} \cdot g_{впр})^3}} \cdot \exp\left[-\frac{L_3}{T_m}\right] \cdot \frac{T_m^4 - (T_m - \Delta T)^4}{T_m^4 \cdot (T_m - \Delta T)^4}, \quad (13)$$

Используя зависимость (13) можно оценить коэффициент выхода оксидов азота при сжигании топлива с вводом влаги:

$$K_{NO_2}^{вых} = \frac{286,99 \cdot 10^{11}}{C_{NO_2}^{g=0}} \cdot \frac{L_1 \cdot A_T}{\sqrt{(L_2 + \vartheta_{II} \cdot g_{впр})^3}} \cdot \exp\left[-\frac{L_3}{T_m}\right] \cdot \frac{T_m^4 - (T_m - \Delta T)^4}{T_m^4 \cdot (T_m - \Delta T)^4} \\ \frac{L_1 \cdot A_T}{\sqrt{(L_2 + \vartheta_{II} \cdot g_{впр})^3}} \cdot \exp\left[-\frac{L_3}{T_m}\right] \cdot \frac{T_m^4 - (T_m - \Delta T)^4}{T_m^4 \cdot (T_m - \Delta T)^4}, \quad (14)$$

Расчетная оценка аналитических зависимостей (13) и (14) выполнена для энергетического котла БКЗ-320-140 ГМ, для которого также проводились опытные замеры концентраций оксидов азота с впрыском влаги в тракт горячего воздуха. Опытные исследования влияния ввода влаги на изменение концентраций оксидов азота

выполнены сотрудниками Саратовского технического университета в рамках хозяйственного договора на выполнение научно-технических исследований [2, 3, 7].

Результаты расчета теоретической зависимости образования оксидов азота от количества вводимой влаги в топку котла представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет теоретической зависимости образования оксидов азота от количества вводимой влаги в топку котла

Расчетные параметры	Водотопливное отношение $g_{\text{ввп}}, \%$					
	0	10	20	30	40	50
Максимальная температура факела $T_m, ^\circ\text{K}$	2010	1997	1983	1969	1956	1942
Объемная концентрация атомарного кислорода $C_{\text{O}_2}, \%$ об.	1,3170	1,3030	1,2890	1,2750	1,2639	1,2470
Объемная концентрация молекулярного азота $C_{\text{N}_2}, \%$ об.	71,602	70,575	69,547	68,520	68,150	66,465
Скорость образования оксидов азота (dC_{NO_2}/dt), $\%$ об.	0,1577	0,1272	0,0966	0,0661	0,0585	0,0049
Концентрация оксидов азота в топке $C_{\text{NO}_2}, \text{г/м}^3$	0,2500	0,2040	0,1580	0,1392	0,1204	0,1114

Экспериментальная зависимость изменения концентраций оксидов азота в зависимости от количества вводимой влаги в топку котла приведена в табл. 2 (по данным [8]).

Таблица 2

Экспериментальная зависимость изменения концентраций оксидов азота в зависимости от вводимой влаги в топку

Расчетные параметры	Водотопливное отношение $g_{\text{ввп}}, \%$					
	0	10	20	30	40	50
Концентрация оксидов азота в топке $C_{\text{NO}_2}, \text{г/м}^3$	0,2530	0,2065	0,1600	0,1410	0,1220	0,1130

Как видно из анализа табл. 1-2, получена достаточная сходимость экспериментальных результатов и теоретических данных, рассчитанных по предлагаемой методике. Максимальная величина отклонений расчетной величины концентрации NO_2 от экспериментальных значений не превышает 1,5%.

Для учета реальных условий эксплуатации котлов аналитическая модель дополнена математической моделью расчета процесса горения и расчета топочной камеры.

В математической модели представлен сложный комплекс процессов, происходящих при факельном горении, включая аэродинамику топочной камеры и теплообмен с поверхностями нагрева. В данной модели производится позонный расчет максимальной температуры горения, скорости изменения температуры горения с учетом всех возможных режимов работы топочной камеры, что позволяет проследить влияние темпов охлаждения, начального и конечного состава продуктов сгорания, регулируемых путем ввода активных добавок (воды) с целью снижения концентраций вредных выбросов.

Разработан программный комплекс макрокинетической модели снижения образования выбросов при проектировании природоохранных мероприятий, учитывающий совместно аналитическую (кинетическую) модель расчета образования вредных выбросов в топке котла и математическую модель расчета процесса горения и расчета топоч-

ной камеры. С помощью программы можно оперативно произвести определение выбросов оксидов азота котельными установками.

Выводы

Предложена аналитическая модель исследования образования выбросов с учетом ввода влаги в зону горения.

Максимальная величина отклонений расчетной величины концентрации NO_2 от экспериментальных значений не превышает 1,5%.

Список литературы

1. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. – М.: 1946. – 245 с.
2. Исследование повышения эффективности паротурбинных блоков сверхкритических параметров введением многоступенчатого промежуточного перегрева пара / И.А. Ростунцова, Н.Ю. Шевченко // Энергетика: Эффективность, надёжность, безопасность: матер. трудов XIX всерос. науч.-техн. конф., Томск, 4-6 дек. 2013 г.: Т. 1 / ГОУ ВПО «Нац. исследовательский Томский политехн. ун-т». – Томск, 2013. – С. 297-300.
3. Методика расчета топливной составляющей природоохраных затрат при сжигании водотопливных смесей / И.А. Ростунцова, Н.Ю. Шевченко, Ю.В. Лебедева // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №5; URL: www.science-education.ru/111-10047 (дата обращения: 23.04.2014).
4. Рейсиг В.А., Сигал И.Я. Кинетические особенности образования оксидов азота в теплоэнергетических установках // Теплоэнергетика. – 1993. – №1. С.28 – 31.
5. Росляков Л.П. Механизм влияния добавок воды и влагосодержания топлива на образование термических и топливных оксидов азота // Изв. вузов Энергетика. – 1988. – №7. С.59–63.
6. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.
7. Эфендиев Т.Б. Образование оксидов азота в парогенераторах // Теплоэнергетика. – 1975. – №9. С.20-23.
8. Снижение выбросов оксидов азота при вводе воды в воздуховоды котлов / А.И. Шупарский, Н.В. Голубь, В.И. Ерофеева, И.А. Ростунцова // Теплоэнергетика. – 1991. – № 8. С.104–117.