

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ВОДО-МАЗУТНОЙ ЭМУЛЬСИИ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Черниченко В.Е.,

Кременчугский государственный политехнический университет

Сергеева Ю. Н.,

Днепродзержинский государственный технический университет

**Введение.** При температурах ниже 2000 К, наблюдающихся в ядре факела мазута, считалось, что вредные примеси в виде оксидов азота либо вообще не образуются, либо образуются в таких количествах, что ими можно пренебрегать.

Последующие исследования показали, что концентрации оксидов азота в уходящих газах котлов могут быть существенными. При значительной массе продуктов сгорания, выбрасываемых на современных электростанциях, уменьшение вредных выбросов является актуальной задачей [1].

Основным источником оксидов азота служит молекулярный азот окислителя (воздуха), реагирующий с атомарным кислородом, который образуется в процессе горения (механизм Зельдовича) в области относительно высоких температур. Принято называть эти оксиды термическими.

Зарубежными и отечественными исследователями установлено, что в зоне сравнительно низких температур (менее 1800 К) помимо термических могут образовываться быстрые оксиды азота, возникающие в результате реакции радикалов  $\text{CH}_2$  с молекулой азота при последующем взаимодействии атомарного азота с гидроксидом  $\text{OH}$ .

При горении мазута и других топлив, имеющих в своем составе азотсодержащие компоненты, непосредственно из этих соединений образуются топливные оксиды азота. Этот процесс протекает в корневой зоне факела при температуре около 1000 К и при сильном влиянии концентрации кислорода. Образовавшиеся оксиды азота могут реагировать с продуктами химической неполноты горения.

Обобщая результаты многочисленных исследований, И.Я. Сигал [1], Л.М. Цирульников [2] предложили зональные схемы образования оксидов азота в факеле, соответствующие высказанным ими представлениям.

Продукты сгорания топлив содержат следующие оксиды азота: диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ), монооксид азота ( $\text{NO}$ ) и гемоксид азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Принято считать, что технологические методы снижения количества первых двух оксидов  $\text{NO}_2 + \text{NO} = \text{NO}_x$  обеспечивают также подавление третьего оксида - ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

Пагубное воздействие  $\text{NO}$  на здоровье человека связано со снижением концентрации

атмосферного озона, приводящим к истощению озонового слоя биосферы. Кроме того,  $\text{NO}$  поглощает радиацию в инфракрасной области спектра, снижая тем самым охлаждение земной коры в точные часы суток (т. е. создавая парниковый эффект). Этот эффект приписывают главным образом некоторому увеличению концентрации диоксида углерода в атмосфере [3, 4].

В настоящее время природоохранные мероприятия, проводимые на действующих ТЭС и котельных, направлены на снижение выбросов оксидов азота, оксида углерода, а также оксидов серы. Многие широко применяемые сейчас методы организации процесса сжигания топлив преследуют цель подавления образования  $\text{NO}_x$ : ступенчатое сжигание, рециркуляция дымовых газов, сжигание топлива при пониженных избытках воздуха.

Выполненные нами исследования показывают, что одной из таких технологий для теплоэнергетики, направленной на защиту атмосферного воздуха от выбросов различных ингредиентов  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , сажи, многоядерных углеводородов и других вредных веществ является сжигание мазута в виде водомазутных эмульсий (ВМЭ).

**Цель работы.** В данной работе исследуется комплексное влияние на величину теплоты сгорания водо-мазутных эмульсий ("у"):

- отношения содержания мазута к содержанию воды ( $x_1$ );
- содержания дизельного топлива ( $x_2$ );
- выдержки эмульсии ( $x_3$ );
- коэффициенты избытка воздуха ( $x_4$ ).

**Материалы и результаты исследований.** Для построения квадратичной модели зависимости "у" от факторов  $x_k$  ( $k=1, \dots, 4$ ) методами планирования эксперимента выбран ортогональный центральный композиционный план  $2^4$  [5]. Условия экспериментов представлены в таблице 1. Матрица планирования экспериментов и результаты опытов по определению теплоты сгорания водо-мазутной эмульсии приведены в таблице 2.

После обработки результатов эксперимента получена квадратичная модель зависимости в виде  $\bar{y} = 1,39 - 0,005X_1 - 0,004X_2 + 0,005X_3 - 0,041X_4 + 0,004(X_1^2 - 0,8) + 0,001(X_2^2 - 0,8) + 0,008(X_3^2 - 0,8) + 0,001(X_4^2 - 0,8) - 0,022X_1 \cdot X_2 - 0,019X_1 \cdot X_3 + 0,022X_2 \cdot X_4 + 0,002X_2 \cdot X_3 - 0,012X_2 \cdot X_4 - 0,002X_3 \cdot X_4$ ,

где  $x_k$  ( $k=1, \dots, 4$ ) – кодированные значения факторов.

Таблиця 1–  
Умовля експериментів

Фактор	Код	Уровни варьирования					Интервал варьирования, Δ
		-1,414	1	0	1	+1,414	
Отношение содержания мазута к содержанию воды, %	X <sub>1</sub>	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,1
Содержание дизельного топлива, %	X <sub>2</sub>	0	5	15	25	30	10
Выдержка эмульсии, час	X <sub>3</sub>	0	1	6	11	12	5
Коэффициент избытка воздуха	X <sub>4</sub>	1	1,1	1,25	1,4	1,5	0,15

Таблиця 2 –  
Матрица планирования экспериментов

№	Фактор				Y
	X1	X2	X3	X4	
1	+	+	+	+	1,38
2	-	+	+	+	1,52
3	+	-	+	+	1,4
4	-	-	+	+	1,48
5	+	+	-	+	1,4
6	-	+	-	+	1,5
7	+	-	-	+	1,39
8	-	-	-	+	1,45
9	+	+	+	-	1,3
10	-	+	+	-	1,4
11	+	-	+	-	1,34
12	-	-	+	-	1,38
13	+	+	-	-	1,31
14	-	+	-	-	1,35
15	+	-	-	-	1,45
16	-	-	-	-	1,3
17	-1,414	0	0	0	1,28
18	+1,414	0	0	0	1,5
19	0	-1,414	0	0	1,4
20	0	+1,414	0	0	1,37
21	0	0	-1,414	0	1,38
22	0	0	+1,414	0	1,42
23	0	0	0	-1,414	1,43
24	0	0	0	+1,414	1,34
25	0	0	0	0	1,38

Влияние исследуемых факторов показано на диаграмме (рисунок1).

Для проверки значимости отличия от нуля полученных коэффициентов в модели по результатам четырех повторных опытов в нулевой точке (X<sub>1</sub>=X<sub>2</sub>=X<sub>3</sub>=X<sub>4</sub>=0), результаты  $\bar{y}$ : 1,36; 1,41; 1,39; 1,36, была найдена дисперсия ошибок опытов S<sup>2</sup>[6, 7]. После вычислений по формуле

$$S^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (y_i - \bar{y})$$

получено S<sup>2</sup>=0,0006.

Проверка значимости коэффициентов модели определена по “порогам” значимости различных эффектов факторов h<sub>к</sub>S, где h<sub>к</sub>=t<sub>табл</sub>√C<sub>к</sub> (κ=1; 2; 3), t<sub>табл</sub> – это табличное значение статистики Стьюдента, найденное для уровня значимости α=0,05 и числа степеней свободы φ=3, t<sub>табл</sub>(0,05; 3)=3,18 [5]. В результате получили для линейных эффектов факторов h<sub>1</sub>=3,18·√0,05=0,712, для квадратичных эффектов h<sub>2</sub>=3,18·√0,125=1,125, для эффектов взаимодействия факторов h<sub>3</sub>=3,18·√0,0625=0,796.

После проверки коэффициентов модели на значимость отличия от нуля для кодированных значений факторов получена следующая модель для значимо влияющих эффектов факторов

$$\bar{y} = 1,39 - 0,041X_1 - 0,022X_1 \cdot X_2 - 0,019X_1 \cdot X_3 + 0,022X_1 \cdot X_4$$

Для проверки адекватности этой модели по формуле

$$S_{ост}^2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

была найдена остаточная дисперсия, где y<sub>i</sub> – это фактические, а  $\bar{y}_i$  – расчетные значения показателя y, полученные по модели i=1, ..., n, n=25; k – число коэффициентов в модели, k=5. В результате S<sub>ост</sub><sup>2</sup>=0,00231.

Проверка адекватности проводилась по критерию Фишера. Расчетное значение статистики Фишера

$$F_p = \frac{S_{ост}^2}{S^2} = \frac{0,00231}{0,0006} = 3,85,$$

что меньше табличного значения  $F_{\text{табл}}(0,05; 20; 3)=8,66$ . Поэтому полученная модель адекватна

истинной зависимости и с достоверностью 0,95 может использоваться для анализа и прогноза.

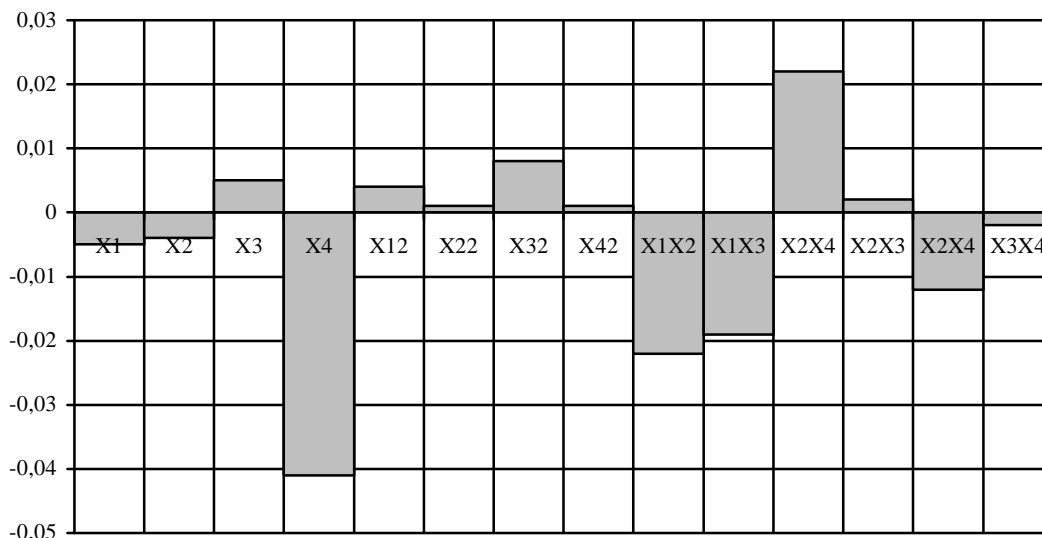


Рисунок 1- Диаграмма значимости факторов модели

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее влияние на содержание  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания оказывает отношение содержания мазута к содержанию воды ( $X_1$ ), причем это влияние проявляется и во взаимодействии с  $X_2$  (содержание дизельного топлива) и  $X_4$  (коэффициент избытка воздуха).

Очевидно, что с увеличением количества воды содержание  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания уменьшается. Сравнительный анализ процесса горения мазута и водо-мазутной эмульсии показал, что диспергированная влага оказывает как физическое, так и химическое воздействие на топочные процессы [8]. Физическое воздействие заключается в явлении микровзрывов мельчайших капелек воды, находящихся внутри топливной оболочки. При этом происходит дополнительное перемешивание топлива с воздухом. Диссоциация водяных паров, высвободившихся в результате микровзрывов, приводит к увеличению концентрации активных центров реакции. Значительные концентрации гидроксильного радикала увеличивает скорость выгорания окиси углерода. Дополнительно улучшает выгорание водо-мазутной эмульсии реакция водяного пара- реакция между паром и раскаленным углеродом. Улучшение перемешивания частиц топлива и воздуха за счет «микровзрывов» позволяет снизить избыток воздуха до критического значения и таким образом повысить КПД котла. Сжигание эмульсий приводит к уменьшению окислов

азота в продуктах сгорания, так как снижается температура пламени. Кроме того, увеличение количества активных центров реакции активизирует горение и соответственно снижает концентрацию атомарного кислорода. В результате снижается скорость окисления азота. Быстрое и полное выгорания топлива способствует уменьшению количества сажи.

Что касается влияния фактора  $X_4$  - коэффициента избытка воздуха, отметим следующее. По степени влияния на  $Y$  он доминирует и проявляется прямопропорциональная зависимость. Экспериментально установлено, что она имеет экстремальный характер. Увеличение выхода  $\text{NO}_x$  до критического значения объясняется повышением концентрации свободного кислорода. При дальнейшем повышении  $\alpha$  на выход  $\text{NO}_x$  оказывает влияние температура горения. При изменении  $\alpha$  изменяется также и теоретическая температура горения.

Зависимость  $Y$  от выдержки эмульсии  $X_3$  имеет нелинейный характер, обусловленный скорее всего кинетикой коагуляции частиц дискретной фазы. Но нами установлено, что при значительной устойчивости ЭТС это влияние практически не значимо.

В эффектах взаимодействий проявляется влияние доминирующего фактора. Исключение составляет  $X_1 \cdot X_4$ . Видимо увеличение концентрации воды способствует образованию дополнительного атомарного кислорода в реакции горения при диссоциации воды или снижению температуры. В результате чего уменьшается и

выход окислов азота. Таким образом, чем больше значения принимает соотношение  $X_1$ · $X_4$ , тем меньше  $Y$ .

**Выводы.**

1. Сжигание ВМЭ приводит к интенсификации выгорания топлива, уменьшению длины факела и увеличению надежности работы пароперегревателя. Температура уходящих газов при переходе на ВМЭ практически не изменилась. Расчетные оценки [9] показали, что экономические показатели работы котла для традиционного и рекомендуемого вариантов практически одинаковы.

2. Следует особо подчеркнуть, что высокий уровень влажности ВМЭ целесообразно устанавливать только в целях огневого обезвреживания большего количества сточных вод. Если такой необходимости нет, то для значительного снижения газообразных вредных выбросов вполне достаточно поддерживать соотношение объемов воды и топлива на уровне 3-5% при соответствующей организации процесса сжигания топлива. В этом случае увеличение потери теплоты с уходящими газами (из-за испарения добавляемой влаги) незначительно и вполне компенсируется интенсификацией процесса сжигания топлива и возможностью перехода на более, низкие значения коэффициента избытка воздуха.

3. При соблюдении описанных выше условий увеличения интенсивности низкотемпературной коррозии не наблюдается.

Все эти выводы верны в условиях проведения эксперимента.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Сигал И. Я. Развитие и задачи исследований по изучению условий образования окислов азота в топочных процессах.– Теплоэнергетика, 1983, №9. С.5-10.
2. Котлер В. Р. Специальные топки энергетических котлов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Котлер В. Р. Новый аспект проблемы загрязнения атмосферы выбросами ТЭС.– Теплоэнергетика, 1989, №3. С.70-71.
4. Кормилицын В.И. Оптимизация сочетания технологических методов снижения выбросов вредных веществ в окружающую среду. — Теплоэнергетика, 1989, №3. С.15-18.
5. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. и др. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов. –М: Мир, 1977.
6. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 279с., ил.
7. Бондарь А. Г., Статюха Г. А. Планирование эксперимента в химической технологии. – Киев: Вища школа, головное изд-во, 1976. – 184 с., ил.
8. Хзмалян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства. Под ред. Д. М. Хзмаляна. Учеб. Пособие для студентов высш. учеб. заведений. М., «Энергия», 1976 – 488 с., ил.
9. Спейшер В. А. Обезвреживание промышленных выбросов дожиганием. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.

Статья поступила 10.03.06.  
Рекомендовано к печати д.т.н. проф.  
Яловой Н.И.