

ЛИТЕРАТУРА

1. Фаворский О. Н., Курзинер Р. И. Развитие воздушно-реактивных двигателей для авиации высоких скоростей полета – синтез достижений различных отраслей науки и техники // ТВТ. – 1990. – Т. 28, № 4. – С. 793–803.
2. Теплообмен при пузырьковом кипении реактивных топлив / В. В. Ягов, Л. С. Яновский, Ф. М. Галимов, А. В. Тимошенко // ТВТ. – 1994. – Т. 32, № 6. – С. 867–872.
3. Кутателадзе С. С. Основы теории теплопередачи при изменении агрегатного состояния вещества. – Л.: Машгиз, 1939. – 136 с.
4. О некоторых особенностях теплоотдачи при кипении углеводородных топлив в большом объеме / С. В. Головин, И. Х. Хайруллин, Т. Н. Шигабиев, Л. С. Яновский // ИФЖ. – 1990. – Т. 59, № 4. – С. 583–586.
5. Галимов Ф. М. Теплоотдача при кипении реактивных топлив в условиях естественной конвекции: Дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 1991. – 174 с.
6. Особенности теплоотдачи к жидким углеводородным охладителям в условиях естественной конвекции при до- и сверхкритических давлениях / В. А. Алтунин, О. Х. Ягофаров, М. Е. Зарифуллин, Ш. Я. Замалтдинов // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1998. – № 1. – С. 59–67.
7. Алемасов В. Е., Дрегаллин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей / Под ред. В. П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.
8. Обухов С. Г. Теплообмен при кипении в условиях «наброса» тепловой мощности // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1992. – № 4. – С. 74–77.

Представлена кафедрой
электротехники и электроники

Поступила 20.04.2005

УДК 614.715.621.311.22

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОТЕЛЬНОМИ АГРЕГАТАМИ

Канд. техн. наук, доц. НАЗАРОВ В. И.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время разработан ряд технических мероприятий, направленных на снижение выбросов токсичных веществ, но все они приводят к снижению экономичности работы котельных агрегатов, что не способствует их широкому внедрению, особенно в условиях повышения цен на топливо. Поэтому поиск решений, направленных на наиболее эффективное применение мероприятий по снижению токсичных выбросов от котельных агрегатов, является первоочередной и актуальной задачей.

При горении углеводородных топлив в продуктах сгорания содержатся, помимо нетоксичных диоксида углерода CO_2 и водяного пара H_2O , токсичные вещества: оксид углерода CO , оксиды серы SO_2 и SO_3 , оксиды азота NO и NO_2 , летучая зола, сажеобразные вещества, а также канцерогенные углеводороды. На данном этапе наибольшие усилия в практике энергетики направлены на уменьшение в основном двух компонент: CO и NO_x . Это объясняется тем, что указанные компоненты могут успешно подавляться посредством режимных мероприятий, а значит, не требуют существенных

капитальных вложений и обладают мобильностью внедрения. К режимным мероприятиям по снижению выбросов относятся:

- изменение коэффициента избытка воздуха в топке котла;
- подача в факел пара или распыленной воды;
- рециркуляция дымовых газов;
- изменение температуры горячего воздуха.

Названные режимные мероприятия оказывают влияние как на экономичность работы котла, так и на его экологические характеристики. В общем случае это можно представить так

$$\Phi = C_r \sum_{i=1}^n \Delta B_i \Delta X_i + \sum_{i=1}^n \Delta X_i \sum_{j=1}^m \Delta V_{ij} \Pi_j. \quad (1)$$

Здесь Φ – целевая функция; X_i – изменение i -го режимного мероприятия; ΔB_i – изменение экономичности котла при единичном изменении i -го режимного мероприятия; C_r – стоимость топлива; ΔV_{ij} – изменение объема выбросов j -го компонента при единичном изменении i -го режимного мероприятия; Π_j – плата за выбросы j -го компонента.

Тогда, минимизируя целевую функцию Φ по ΔX_i , определяем то оптимальное режимное воздействие, которое позволит при минимальном снижении экономичности работы котельного агрегата получить максимальное снижение выбросов вредных веществ, т. е.:

для i -го режимного мероприятия

$$\frac{d\Phi}{d\Delta X_i} = C_r \sum_{i=1}^n \frac{d\Delta B_i}{d\Delta X_i} + \sum_{j=1}^m \frac{\Delta V_{ij}}{d\Delta X_i} \Pi_j \Rightarrow \min; \quad (2)$$

для n -х режимных мероприятий

$$\sum_{i=1}^n \frac{d\Phi}{d\Delta X_i} = C_r \sum_{i=1}^n \frac{d\Delta B_i}{d\Delta X_i} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\Delta V_{ij}}{d\Delta X_i} \Pi_j \Rightarrow \min. \quad (3)$$

Рассмотрим частный случай использования целевой функции для некоторого режимного мероприятия, направленного на снижение выбросов вредных веществ, например изменение коэффициента избытка воздуха в топке котла.

Изменение коэффициента избытка воздуха в топке котельного агрегата вызывает изменение потерь теплоты с уходящими газами; потерь теплоты с химическим недожогом, а также изменение выбросов NO_x и CO . В этом случае будем иметь

$$\Phi = B_r \left\{ C_r (q_2 + q_3) \cdot 10^{-2} \left[\text{NO}_x \Pi_{\text{NO}_x} + \text{CO} \Pi_{\text{CO}} \right] \cdot 10^{-6} V_{\text{пр}} \right\} \quad (4)$$

Здесь B_r – расход топлива, т у. т./ч; C_r – стоимость топлива, руб/т у. т.; q_2 – потеря теплоты с уходящими газами, %; q_3 – потеря теплоты с химнедожогом, %; NO_x – концентрация оксидов азота в уходящих газах, зависящая от коэффициента избытка воздуха α_r в топке котла, г/м³; Π_{NO_x} – плата за выбросы NO_x , руб/т; CO – концентрация оксида углерода в уходящих газах, зависящая от коэффициента избытка воздуха α_r в топке котла, г/м³; Π_{CO} – плата за выбросы CO , руб/т; $V_{\text{пр}}$ – объем продуктов горения, образующихся при сжигании 1 т у. т., м³/т у. т.

Тогда, минимизируя функционал Φ по α_τ , получаем

$$\frac{d\Phi}{d\alpha_\tau} = 10^{-2} \Pi_\tau \left[\frac{dq_2}{d\alpha_\tau} + \frac{dq_3}{d\alpha_\tau} \right] + \left[\frac{dNO_x}{d\alpha_\tau} V_{III} + \frac{dV_{III}}{d\alpha_\tau} NO_x \right] \Pi_{NO_x} \cdot 10^{-6} + \left[\frac{dCO}{d\alpha_\tau} V_{III} + \frac{dV_{III}}{d\alpha_\tau} CO \right] \Pi_{CO} \cdot 10^{-6} = 0. \quad (5)$$

Отсюда рассчитывается значение α_τ , соответствующее минимальным вредным выбросам при максимальной экономичности котла. Найдем отдельные составляющие функционала Φ , входящие в приведенное выше выражение, а также их частные производные по α_τ [1]:

$$q_2 = (a\alpha_{yx} + b) \left(t_{yx} - \frac{\alpha_{yx}}{\alpha_{yx} + c} t_{вх} \right) A_t \cdot 10^{-2};$$

$$q_3 = 0,139(\alpha_{yx} - d)CO;$$

$$V_{III} = \alpha_{yx}e + f;$$

$$a = \begin{cases} 3,53 - \text{газ;} \\ 3,5 - \text{мазут;} \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} 0,6 - \text{газ;} \\ 0,45 - \text{мазут;} \end{cases}$$

$$c = \begin{cases} 0,18 - \text{газ;} \\ 0,13 - \text{мазут;} \end{cases}$$

$$d = \begin{cases} 0,05 - \text{газ;} \\ 0,1 - \text{мазут;} \end{cases}$$

$$e = \begin{cases} \frac{7000}{Q_H^p} (1,105Q_H^p + 20) - \text{газ;} \\ \frac{7000}{Q_H^p} (1,097Q_H^p + 6,6W^p - 40) - \text{мазут;} \end{cases}$$

$$f = \begin{cases} \frac{7000}{Q_H^p} (380 + 0,075Q_H^p) - \text{газ;} \\ \frac{7000}{Q_H^p} (0,17Q_H^p + 12,4W^p - 980) - \text{мазут.} \end{cases}$$

где α_{yx} – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах, однозначно связанных с α_τ как $\alpha_{yx} = \alpha_\tau + \Delta\alpha_\tau$ ($\Delta\alpha_\tau$ – присосы воздуха по тракту котла); t_{yx} – температура уходящих газов, °С, связанная с α_τ как $t_{yx} = a_1 + b_1\alpha_\tau + c_1\alpha_\tau^2$; $t_{вх}$ – температура воздуха; a, b, c, d, e, f – коэффициенты, определяемые ви-

дом сжигаемого топлива газ/мазут; A_t – температурный коэффициент; CO – концентрация оксида углерода, $г/м^3$, $CO = a_2 + b_2\alpha_t + c_2\alpha_t^3$; Q_H^p – теплота сгорания топлива, $МДж/кг(м^3)$; W^p – содержание влаги в топливе (мазуте), %.

Частные производные по α_t , входящие в (5):

$$\frac{dq_2}{d\alpha_t} = \left\{ a \left(t_{yx} - \frac{\alpha_t + \Delta\alpha_n}{\alpha_t + \Delta\alpha_n + c} t_{вх} \right) + (a\alpha_{yx} + b \left[b_1 + 2c_1\alpha_t - \frac{c}{(\alpha_t + \Delta\alpha_n + c)^2} t_{вх} \right]) \right\} A_t \cdot 10^{-2};$$

$$\frac{dq_3}{d\alpha_t} = 0,139 \left[(\alpha_t + \Delta\alpha_n - d)(b_2 + 3c_2\alpha_t^2) + (a_2 + b_2\alpha_t + c_2\alpha_t^3) \right];$$

$$\frac{dNO_x}{d\alpha_t} = b_3 + 3c_3\alpha_t^2;$$

$$\frac{dCO}{d\alpha_t} = b_2 + 3c_2\alpha_t^2;$$

$$\frac{dV_{III}}{d\alpha_t} = e.$$

В табл. 1 приведен расчет оптимального значения управляющего воздействия α_t для котла ГМ-50-14.

Таблица 1

Наименование показателя	Обозн.	Разм.	Коэффициент избытка воздуха в топке						
			1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,1
Концентрация O_2 в режимном сечении	O_2^p	% об	0,21	0,41	0,61	0,81	1,0	1,19	1,91
Концентрация CO в режимном сечении	CO^p	% об $г/м^3$	0,25 3,25	0,083 1,08	0,065 0,845	0,04 0,52	0,018 0,364	0,015 0,195	0,007 0,091
Концентрация CO в балансовом сечении	CO^b	% об $г/м^3$	0,10 1,3	0,025 0,325	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
Концентрация NO_x в балансовом сечении	NO_x^b	р/м $г/м^3$	110 0,14	120 0,55	125 0,162	138 0,18	148 0,192	154 0,2	177 0,23
Потеря теплоты с уходящими газами	q_2	%	5,65	5,68	5,72	5,75	5,78	5,82	5,95
Потеря теплоты с химнедожогом	q_3	%	0,3	0,08	0	0	0	0	0
Расход топлива	Вт	$\frac{т.у.т.}{ч}$	4,667	4,643	4,639	4,639	4,64	4,642	4,648
Объем продуктов горения	V_{III}	$\frac{м^3}{т.у.т.}$	1200 0	12007 7	12155	12238	12310	12388	12698
Температура уходящих газов	t_{yx}	$^{\circ}C$	124,6	125,2	126	126,6	127,2	128	130,6
Функционал	Φ	–	2,25	0,66	0,3	0,32	0,39	0,53	0,98

Расчет проводился для номинальной нагрузки котла при $\Pi_{\tau} = \tau$ у. т.; $\Pi_{\text{NO}_x} = \text{руб/т}$; $\Pi_{\text{CO}} = \text{руб/т}$.

Полученное оптимальное значение $\alpha_{\tau} = 1,03$. Фактическое же значение по режимной карте $\alpha_{\tau} = 1,07$.

При практической реализации экологической системы управления котельным агрегатом функционал (4) можем описать как

$$\begin{aligned} \Phi &= \Pi_{\tau}(q_2 + q_3) \cdot 10^{-2} [\text{NO}_x \Pi_{\text{NO}_x} + \text{CO} \Pi_{\text{CO}}] \cdot 10^{-6} (\alpha_{yx} e + f) = \\ &= 10^{-2} \Pi_{\tau} \left[(a(\alpha_{\tau} + \Delta\alpha_n) + b) \left(t_{yx} - \frac{\alpha_{\tau} + \Delta\alpha_n}{\alpha_{\tau} + \Delta\alpha_n + c} t_{\text{вх}} \right) A_t \cdot 10^{-2} + 0,139(\alpha_{\tau} + \Delta\alpha_n - d) \text{CO} \right] + \\ &\quad + [\text{NO}_x \Pi_{\text{NO}_x} + \text{CO} \Pi_{\text{CO}}] \alpha_{yx} e + f \cdot 10^{-6} = \\ &= \Pi_{\tau} \cdot 10^{-2} \left[(\alpha_{\tau} a + a) t_{yx} A_t \cdot 10^{-2} + 0,139(\alpha_{\tau} + d) \text{CO} \right] + \\ &\quad + [\text{NO}_x \Pi_{\text{NO}_x} + \text{CO} \Pi_{\text{CO}}] (\alpha_{\tau} + F) \cdot 10^{-6} = \\ &= 10^{-2} \Pi_{\tau} \left[\alpha_{\tau} (a t_{yx} A_t \cdot 10^{-2} + 0,139 \text{CO}) + a t_{yx} A_t \cdot 10^{-2} + 0,139 d \text{CO} \right] + \\ &\quad + [\text{NO}_x \Pi_{\text{NO}_x} + \text{CO} \Pi_{\text{CO}}] (\alpha_{\tau} + f) \cdot 10^{-6} = 10^{-2} \Pi_{\tau} [\alpha_{\tau} (A t_{yx} + B \text{CO}) + C t_{yx} + D \text{CO}] + \\ &\quad + [\text{NO}_x \Pi_{\text{NO}_x} + \text{CO} \Pi_{\text{CO}}] (\alpha_{\tau} + F) \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что для построения экологической системы достаточно осуществить измерение четырех параметров, т. е. O_2 (α_{τ}) за топкой в режимном сечении, CO , NO_x и t_{yx} в уходящих газах в балансовом сечении. Управляемым фактором для данной системы является расход общего воздуха. В качестве структуры, осуществляющей поиск $\Phi \rightarrow \min$, могут использоваться широко применяемые цифровые регуляторы «Ремиконт».

Аналогичные выкладки справедливы и для остальных режимных мероприятий, направленных на снижение выбросов вредных веществ, но уже с другими управляющими факторами. Например, для режимного мероприятия в виде подачи в факел распыленной воды регулируемым параметром является расход впрыскиваемой воды.

ВЫВОДЫ

1. Предложена математическая модель по экологическому управлению котельным агрегатом, позволяющая при минимальном снижении экономичности работы котельного агрегата получать максимальное снижение выбросов вредных веществ, в частности NO_x .

2. На основе разрабатываемой математической модели предложена экологическая система управления, реализация которой возможна на микропроцессорной регулирующей аппаратуре типа «Ремиконт».

ЛИТЕРАТУРА

1. Пеккер Я. Л. Теплотехнические расчеты по приведенным характеристикам топлива: Обобщенные методы. – М.: Энергия, 1977.