

# Оптимизация работы котлоагрегатов при снижении выбросов загрязняющих веществ

Сегодня основными производителями тепловой энергии являются ТЭЦ и котельные, использующие для получения теплоносителя жидкое, газообразное и твердое топливо. Наиболее эффективным и экологически чистым видом топлива является природный газ, состоящий из молекул метана  $\text{CH}_4$  (95–98 %) с небольшим количеством более тяжелых углеводородов (пропан, бутан и др.). Казалось бы, при горении такого чистого топлива не должно образовываться вредных веществ, как это происходит при сжигании мазута и каменного угля, содержащих в своем составе компоненты от сернистых соединений до ванадия и свинца. Однако все не так просто.

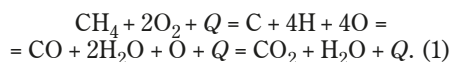
В действительности горение является сложным процессом, в котором участвуют топливо, окислитель, посторонние вещества (балласт) и материалы самой топливосжигающей установки. Окислителем в процессе сжигания природного газа является кислород, однако в топку он подает не в чистом виде, а в смеси с азотом  $\text{N}_2$ , аргоном Ar, гелием He и другими веществами, присутствующими в воздухе, состав которого можно представить следующим образом:  $\text{O}_2$  – 21 %,  $\text{N}_2$  – 78 %,  $\text{CO}_2$  – 0,03 % и остальные газы – 0,97 %.

Попав в топку в качестве балласта, азот при достаточно высокой температуре и наличии атомов кислорода начинает образовывать окислы азота с поглощением большого количества тепловой энергии. Для первичного подавления образования окислов азота с выхода на вход котла вводится рециркуляция дымовых газов, что снижает температуру плазмы в топке, однако при наличии свободных атомов кислорода не решает проблему полностью. Для образования одного моля молекул окислов азота (1 моль содержит  $6,02 \cdot 10^{23}$  молекул и имеет объем 22,4  $\text{дм}^3$ /моль) необходимо затратить следующее количество тепловой энергии:

- $\text{N}_2\text{O}$  – 113 кДж/моль (26,6 ккал/моль);
- $\text{N}_2\text{O}_3$  – 93 кДж/моль (22,6 ккал/моль);
- $\text{NO}$  – 90,5 кДж/моль (21,6 ккал/моль);
- $\text{NO}_2$  – 34,1 кДж/моль (8,13 ккал/моль);
- $\text{N}_2\text{O}_5$  – 5,04 кДж/моль (1,2 ккал/моль).

В топках котлов без присутствия катализаторов происходит в основном образование окислов азота  $\text{NO}$  (95–97 %) и  $\text{NO}_2$  (3–5 %). Окислы азота  $\text{NO}$  в воде не растворяются и кислот не образуют, лишь неблагоприятно воздействуют на растения и другие живые организмы. Окислы азота  $\text{NO}_2$  растворяются в воде с образованием азотной кислоты  $\text{HNO}_3$ , что приводит не только к гибели живых существ, но и к разрушению зданий и сооружений в результате кислотных дождей.

Основное топливо – метан – горит в следующей последовательности:



На первой стадии горения происходит разложение молекул метана на атомы углерода и водорода и окисление их кислородом до  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$  с выделением теплоты. На второй стадии горения при наличии свободных атомов кислорода угарный газ  $\text{CO}$  окисляется до углекислого газа  $\text{CO}_2$ . Однако при недостатке кислорода недоокисленные молекулы  $\text{CO}$  уносятся с дымовыми газами, загрязняя атмосферу угарным газом и унося часть дорогостоящего топлива. На рис. 1 показан процесс горения избытка кислорода в дымовых газах. Как видно из приведенных графиков, чем меньше кислорода в дымовых газах – тем ниже полнота сгорания топлива и больше выделение угарного газа. Однако при этом образование молекул  $\text{NO}$  идет не так интенсивно и остается на уровне 10–20  $\text{мг/м}^3$ .

При удельном объеме воздуха 12  $\text{м}^3$  на 1  $\text{м}^3$  природного газа в 1  $\text{м}^3$  дымовых газов в процессе горения выделится теплота в соответствии с выражением:

$$Q_{\text{т}} = \frac{q}{V_{\text{в}} + V_{\text{пр}}} = \frac{34\,000}{12 + 1} = 2\,615 \text{ кДж/м}^3, \quad (2)$$

где  $q = 34\,000 \text{ кДж/м}^3$  – средняя теплотворная способность 1  $\text{м}^3$  природного газа;

$V_{\text{в}} = 12 \text{ м}^3$  – объем воздуха для сжигания 1  $\text{м}^3$  природного газа;

$V_{\text{пр}} = 1 \text{ м}^3$  – объем природного газа.

Химическое количество окисла азота в 1  $\text{м}^3$  дымовых газов –  $\text{NO}$  – при концентрации  $m = 0,4 \text{ г/м}^3$  в молярных единицах равно:

$$n_{\text{NO}} = \frac{m}{M(\text{NO})} = \frac{m}{M(\text{N}) + M(\text{O})} = \frac{0,4}{7 + 8} = 0,0267 \text{ моль}, \quad (3)$$

где  $M(\text{NO})$  – молярная масса молекул  $\text{NO}$ , равная сумме молярных масс молекул азота  $M(\text{N}) = 7$  и кислорода  $M(\text{O}) = 8$ .

На образование 1 моль окисла азота  $\text{NO}$  требуется затратить  $Q_{\text{NO}} = 90,5 \text{ кДж}$  тепловой энергии. В 1  $\text{м}^3$  дымовых газов

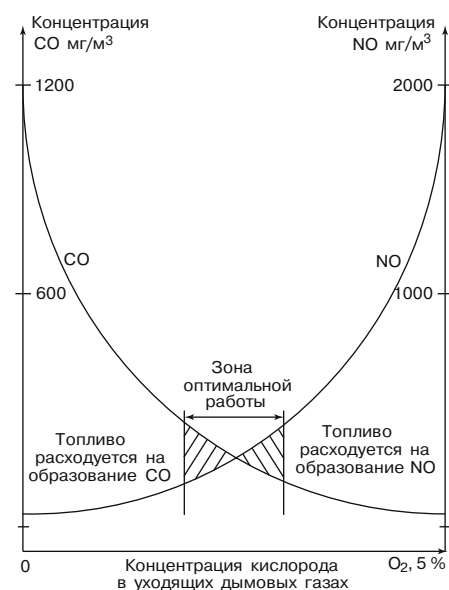


Рис. 1. Графики зависимости угарного газа ( $\text{CO}$ ) и окиси азота ( $\text{NO}$ ) от избытка кислорода в уходящих дымовых газах

потребление тепловой энергии для окисления азота до NO с химическим количеством 0,0267 моль составит:

$$Q_{\text{потерь}_{\text{NO}}} = n_{\text{NO}} Q_{\text{NO}} = 0,0267 \times 90,5 = 2,41 \text{ кДж/м}^3. \quad (4)$$

Процент потерь тепловой энергии на создание окислов азота NO будет равным:

$$K_{n_{\text{NO}}} = \frac{Q_{\text{потерь}_{\text{NO}}}}{Q_{\text{T}}} 100 \% = \frac{2,41}{2\,610} 100 \% = 0,1 \%. \quad (5)$$

При избытке воздуха  $\alpha = 1,4$  в топку в качестве балласта дополнительно подается большое количество азота (31 %), который должен быть нагрет от температуры наружного воздуха до температуры отходящих дымовых газов. В связи с этим происходит потеря (вынос) части тепловой энергии сгоревшего топлива, определяемая в соответствии с выражением:

$$Q_{\text{потерь}_{\text{N}}} = C_{\text{N}} m_{\text{N}} (T_{\text{дг}} - T_{\text{хв}}) = 1,0 \cdot 10^3 \times 0,39 \times (160 - 10) = 58,5 \text{ кДж/м}^3, \quad (6)$$

где  $C_{\text{N}} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг} \cdot \text{}^\circ\text{C}$  – удельная теплоемкость азота;

$m_{\text{N}} = 0,39 \text{ кг}$  – масса избыточного азота с плотностью  $1,25 \text{ кг/м}^3$  в  $1 \text{ м}^3$  дымовых газов;

$T_{\text{дг}} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура уходящих дымовых газов;

$T_{\text{хв}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  – средняя температура холодного воздуха.

Процент потерь тепловой энергии на нагрев дополнительного балластного азота  $N_2$  составит:

$$K_{n_{\text{N}}} = \frac{Q_{\text{потерь}_{\text{N}}}}{Q_{\text{T}}} 100 \% = \frac{58,5}{2\,610} 100 \% = 2,2 \%. \quad (7)$$

Общий процент потерь тепловой энергии из-за ее расхода на образование окислов азота NO и нагрева балластного азота из-за избытка дутьевого воздуха следующий:

$$K_{\text{общ. потерь}} = K_{n_{\text{NO}}} + K_{n_{\text{N}}} = 0,1 + 2,2 = 2,3 \%. \quad (8)$$

В настоящее время оптимизация процесса горения по критерию минимума выбросов загрязняющих веществ NO – CO не ведется. Организации ведут наладку регуляторов соотношения топливо/воздух по критерию минимума выбросов CO. При этом достигается максимальная полнота сгорания топлива, но его перерасход на образование окислов азота NO и нагрев балластного азота в дымовых газах не учитывается, а это, как показывают расчеты, около 2,3 % от сгоревшего топлива. Кроме того, плата за выбросы NO в атмосферный воздух составляет значительную часть затрат

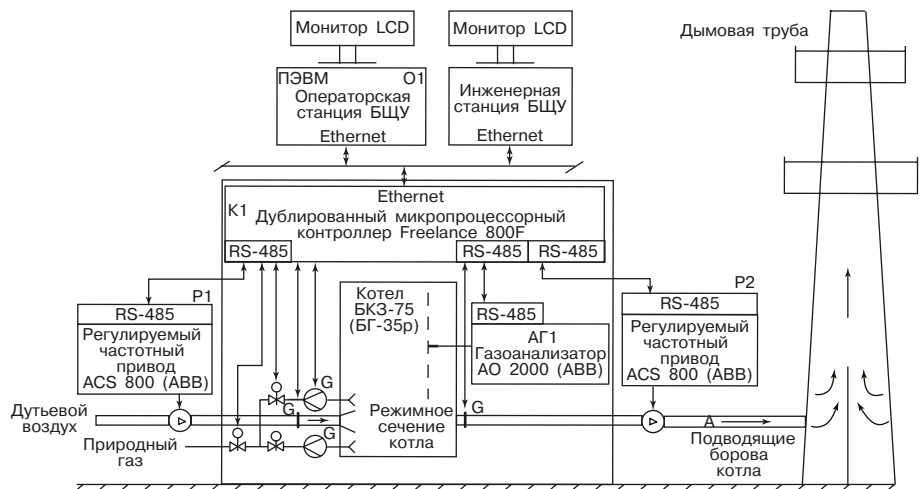


Рис. 2. Структурная схема автоматизированной системы оптимизации процесса горения по критерию минимума выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух

на эксплуатацию топливосжигающих установок.

При разработке проекта АСУ ТП ТЭЦ была предусмотрена возможность оптимизации процесса горения по критерию минимума выбросов NO – CO с достижением целевой функции повышения коэффициента полезного действия паровых котлов.

Структурная схема подсистемы оптимизации процесса горения представлена на рис. 2.

Электродвигатели дутьевых вентиляторов и дымососов котлоагрегатов оборудованы регулируемыми частотными приводами (РЭП) ACS 800 – P1 и P2, рассчитанными на мощности соответствующих двигателей. В режимном сечении котлов установлены газоанализаторы АО 2000 – АГ1, выполняющие измерения концентрации  $O_2$ , NO, CO и  $CH_4$ . Причем последний компонент измеряется для реального контроля загазованности метаном  $CH_4$  топки котла в предпусковых и пусковых режимах, а также для организации дополнительного контура защиты при погасании факелов горелок котла. Входы РЭП, выходы газоанализатора, клапанов и датчиков подключены к контроллеру К1, выполняющему функции контроля, защиты, управления и регулирования мощности котла по заданному графику работы.

Результаты измерений концентраций  $O_2$ , NO, CO и  $CH_4$  в дымовых газах по интерфейсу Ethernet передаются в ПЭВМ операторской станции О1, обеспечивающей по соответствующей программе, разработанной с использованием методов нелинейного программирования, оптимизацию процесса горения в соответствии с рис. 1. Из ПЭВМ О1 результаты расчетов передаются обратно в микропроцессорный контроллер К1, выполняющий изменения частоты сигнала на

выходе РЭП P1 с целью подачи такого объема дутьевого воздуха, которое необходимо для наиболее оптимального режима горения. Регулируемый частотный привод P2 обеспечивает создание необходимого разрежения в топке котла в зависимости от расхода природного газа и дутьевого воздуха в различных режимах работы.

Таким образом, система связанных регуляторов в зависимости от корректирующих воздействий от ПЭВМ О1 в реальном масштабе времени обеспечивает поддержание оптимального режима горения в зависимости от результатов измерения концентрации NO – CO в дымовых газах газоанализатором АГ1.

**Владимир ЖУК,**  
кандидат технических наук,  
начальник отдела АСУ  
ООО «Энергопромис»

