

Контроль эффективности и качества промышленного сжигания топлива

Control of the efficiency and quality of industrial fuel combustion

Олег Новиков
Генеральный Директор
АО НПФ «Уран-СПб», К. Т. Н.
E-Mail: Onnovikov1941@Mail.ru

Oleg NOVIKOV
General director, JSC NPF «URAN-SPb»,
candidate of technical sciences
E-mail: onnovikov1941@mail.ru

Игорь Ананченко
Ведущий Научный Сотрудник
АО НПФ «Уран-СПб», К. Т. Н.
E-Mail: Anantchenko@Yandex.ru

Igor ANANCHENKO
Leading researcher, candidate of technical
sciences, JSC NPF «URAN-SPb»
E-mail: anantchenko@yandex.ru

Никадим Минчев
Заведующий Лабораторией
Метрологии АО НПФ «Уран-СПб»
E-Mail: Minivik@Mail.ru

Nikodim MINCHEV
Head of the metrology laboratory,
JSC NPF «URAN-SPb»
E-mail: minivik@mail.ru

Беловская угольная ГРЭС

Источник: rtelecom.ru



Аннотация. В статье рассмотрены различные виды показателей эффективности сжигания топлива и выделены главные – энергетические. Проанализированы нормативные и упрощенные методы, алгоритмы расчета основных показателей эффективности и качества сжигания различного топлива. Представлена информация по разработанным и используемым на практике приборам контроля эффективности, качества сжигания топлива и оптимизации управления топливосжигающими установками.

Ключевые слова: топливо, эффективность сжигания, контроль.

Abstract. The article considers various types of fuel combustion efficiency indicators and highlights the main ones – energy. Normative and simplified methods, algorithms for calculating the main indicators of efficiency and quality of combustion of various fuels are analyzed. Information is provided on the devices developed and used in practice for monitoring the efficiency, quality of fuel combustion and optimization of fuel combustion plant management.

Keywords: fuel, combustion efficiency, control.



Уменьшение коэффициента избытка воздуха является эффективным методом снижения потерь теплоты с уходящими газами и подавления оксидов азота

Специалисты по энергетике, экономике, автоматизации, приборостроению, метрологии, экологии и др., связанные со сжиганием разнообразных видов топлива в различных теплоэнергетических агрегатах (котлах, печах, сушилах и др.) пользуются терминами: «энергетическая эффективность», «энергосбережение», «качество и экономичность горения», «оптимальность использования топлива» и др. Вся эта терминология описывается общим понятием «энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива», которая предусматривает инструментальный контроль процессов и внедрение прогрессивных технических решений [1, 2], для по-



Паровой котёл ТЭС ТГМ-966
Источник: stroiteh-msk.ru

вышения экономической эффективности использования топлива и для снижения вредного воздействия продуктов сгорания на окружающую среду.

Для оценки экономической эффективности, технического уровня и качества эксплуатации теплоэнергетических агрегатов (на примере котлоагрегатов) служит система энергетических, экономических и режимных показателей [3].

1. Энергетические показатели, связанные с технологией сжигания топлива, характеризуют степень использования тепла топлива или тепла другого источника – тепловую экономичность различных агрегатов. Энергетические показатели:



Дымоходы современной котельной

Источник: Depositphotos / depositphotos.com

коэффициенты полезного действия (КПД) брутто ($\eta_k^{бр}$) и нетто (η_k^H) любых устройств, сжигающих топливо; доля расхода тепла на собственные нужды ($q_k^{с.н.}$); коэффициент теплового потока ($\eta_{т.п.}$); удельный расход топлива на отпущенную тепловую энергию ($b_k^{отп.}$); коэффициент избытка воздуха, расходуемого на горение (α_r), и др.

2. К системе экономических показателей, которыми пользуются обычно экономисты при проектировании топливосжигающих установок, относятся: суммарные (К) и удельные капитальные вложения (к); ежегодные издержки производства (ΣS); себестоимость единицы продукции (тепловой энергии S_r); приведенные затраты (З).

3. Режимные показатели, не связанные напрямую с технологией сжигания топлива, характеризуют степень использования оборудования, условия работы топливосжигающих установок. К ним относятся показатели: коэффициенты рабочего времени (k_r), средней нагрузки ($k_{ср.}$), использования максимума нагрузки (k_m), использования установленной мощности ($k_{уст.}$); годовое число часов использования установленной мощности ($h_{год}$) и максимума тепловой нагрузки (h_{ρ}).

Большая часть показателей используется при проектировании и режимно-наладочных испытаниях агрегатов для

периодических технико-экономических расчетов по известным формулам с помощью электронных калькуляторов или компьютеров. Другая часть показателей, в основном энергетических, которая интересует авторов данной статьи, используется непрерывно автоматическими устройствами для отображения результатов работы теплоэнергетического оборудования и корректирующего регулирования, с целью повышения эффективности.

Исходные величины для расчетов показателей эффективности работы в основном поступают от штатных контрольно-измерительных приборов (КИП) агрегатов и дополнительно от специальных, стационарных или переносных теплотехнических (газоаналитических) приборов в процессе эксплуатации или режимно-наладочных испытаний.

Для определения энергетической экономичности различных теплоагрегатов (например, котлов) в отечественной и зарубежной практике имеются различные стандарты [4, 5], которые устанавливают нормативные методы расчета (формулы), проведения испытаний, измерений и наилучшие доступные технологии (НДТ) сжигания топлива в технологическом оборудовании в стационарных режимах.

Важным показателем, характеризующим экономичность работы теплоагрегата, является коэффициент полезного действия брутто, который определяется прямым или обратным методом из уравнения теплового баланса по формулам:

$$\eta_k^{бр} = \frac{Q_1}{Q_p^p}; \quad Q_1 = \frac{Q_k^{бр}}{B_k}, \quad (1)$$

где Q_1 – полезно использованное тепло теплоагрегатом;

Q_p^p – располагаемое тепло, содержащееся в расходуемом топливе, с учетом физического тепла, внесенного воздухом и топливом при горении;

$Q_k^{бр}$ – выработанное тепло и B_k – расход топлива теплоагрегатом.

Прямой метод определения КПД брутто является сложным и трудоемким, так как сопряжен с использованием большого количества параметров, измеренных с высокой точностью. Он применяется для камеральных расчетов при проектировании теплоэнергетических установок и их испытаниях. Результаты расчетов этим методом можно использовать как «эталонные».

Обратный метод определения КПД брутто теплоагрегатов является предпочтительным. Он пригоден для оперативного

Нормативный (классический) метод расчета не применим для цели оперативного контроля и регулирования процессов сжигания топлива, так как требует громоздких вычислений удельных объемов

использования при эксплуатации существующего оборудования и заключается в определении величин всех потерь теплового баланса по формуле:

$$\eta_k^{бр} = q_1 = 100 - \sum_{j=2}^{j=6} q_j \quad (2)$$

где q_j – удельные потери тепла в теплоагрегате в %.

При этом сумма потерь зависит от вида сжигаемого топлива:

- для твердого топлива, равна ($q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$);
- для жидкого и газообразного топлива, равна ($q_2 + q_3 + q_5$).

Гусиноозерская угольная ГРЭС

Источник: Маллаева Елена / konkurs.interra.ru



| Вид топлива | A ₁ | B | A ₂ | CO _{2MAX} |
|-------------------|----------------|-------|----------------|--------------------|
| Природный газ | 0,37 | 0,009 | 32 | 11,7 |
| Сжиженный газ | 0,42 | 0,008 | 32 | 13,7 |
| Мазут | 0,52 | 0,007 | 52 | 15,4 |
| Дизельное топливо | 0,5 | 0,007 | 52 | 15,7 |
| Каменный уголь | 0,68 | 0 | 69 | 18,8 |
| Бурый уголь | 0,98 | 0 | 69 | 19,1 |

Таблица 1. Эмпирические топливные параметры

В свою очередь, каждый вид потерь определяется уравнениями.

1. Потери тепла с уходящими дымовыми газами q₂ (в %) – по формулам:

По «классической» формуле [4]:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p} 100 = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} I_{xb}^0)(100 - q_4)}{Q_p^0};$$

$$\alpha_{yx} = \frac{V_B}{V_B^0} = \frac{21}{21 - O_2}, \quad (3)$$

где I_{yx} – удельная энтальпия уходящих газов при коэффициенте α_{yx}, температуре θ_{yx} и полном сгорании топлива;

I_{xb}⁰ – удельная энтальпия теоретически необходимого количества холодного воздуха на входе в котел;

α_{yx} – коэффициент избытка воздуха;

V_B – фактический объем воздуха, расходуемый на горение;

V_B⁰ – теоретически необходимый объем воздуха для стехиометрического горения;

O₂ – измеренная концентрация кислорода в уходящих газах в об. %.

По упрощенной формуле М. Б. Равича [6]:

$$q_2 = 0,01Z(t_{yx} - t_{vx});$$

$$Z = \frac{[C' + (h-1)B'K]100}{t_{max}};$$

$$h = \frac{CO_{2max}}{CO_2 + CO + CH_4} \quad (4)$$

где t_{yx} – температура уходящих дымовых газов;

t_{vx} – температура воздуха, поступающего в топку;

t_{max} – жаропроизводительность топлива из таблиц;

Кочегар в котельной

Источник: tritonstroy.ru



Барабинская угольная ТЭЦ

Источник: sibgenco.online

h – коэффициент разбавления дымовых газов воздухом;

CO_{2max} – наибольшая концентрация диоксида углерода в дымовых газах при полном сжигании топлива из таблиц;

CO₂ + CO + CH₄ – сумма углеродсодержащих газов;

B' – усредненная характеристика топлива и C';

K – поправочные коэффициенты, зависящие от температуры дымовых газов из таблиц.

По упрощенной формуле Siegert (Зигерта) в стандарте DIN [7]:

$$q_2 = (T_{дг} - T_{вг}) \left[\frac{A_1}{CO_2} + B \right];$$

или

$$q_2 = (T_{дг} - T_{вг}) \left[\frac{A_1}{(21 - O_2)} + B \right];$$

$$\alpha = \frac{CO_{2max}}{CO_2} = \frac{21}{21 - O_2} \quad (5)$$

где T_{дг}, T_{вг} – измеренная температура дымовых газов и воздуха, подаваемого на горение (в °C);

CO₂ – измеренная или рассчитанная концентрация диоксида углерода в дымовых газах (в об. %);

O₂ – измеренная концентрация кислорода в сухих дымовых газах (в об. %);

CO_{2max} – наибольшая концентрация диоксида углерода в дымовых газах при полном сжигании топлива из таблицы 1 (в об. %);

α – коэффициент избытка воздуха;

B и A₁ – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида сжигаемого топлива из таблицы 1.

2. Потери тепла от химической неполноты сгорания топлива q₃ (в %):

По «классической» формуле:

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_p} 100; \quad Q_3 = V_{с.г} (30,18CO + 85,55CH_4 + 25,79H_2 + 141,1C_nH_m), \quad (6)$$

где V_{с.г} – объем сухих дымовых газов при 0 °C и 0,1 МПа в месте отбора на анализ;

Для оперативного контроля процессов сжигания топлива рационально использовать упрощенные, но достаточно точные методы расчета по Равичу, Зигерту и др. Невязка составляет 0,2–1,5%

CO, CH₄, H₂, C_nH_m – содержание продуктов неполного сгорания топлива в дымовых газах.

По упрощенной формуле М. Б. Равича:

$$q_3 = \frac{Q_3 \cdot 100}{V_1 \cdot Q_p} = \frac{(30,2CO + 25,8H_2 + 85,5CH_4) \cdot h \cdot 100}{P}, \quad (7)$$

где P – максимальное теплосодержание сухих продуктов сгорания данного вида топлива (практически постоянная – обобщенная константа) из таблиц.

По упрощенной формуле Зигерта:

$$q_3 = \frac{A_2 \cdot CO}{(CO_2 + CO)};$$



Vitomax 200 LW 6 MBT котел на ТЭЦ
Источник: stroiteh-msk.ru

$$CO_2 = CO_{2max} \left(1 - \frac{O_2}{21} \right), \quad (8)$$

где CO – измеренная концентрация оксида углерода в дымовых газах (в об. %);

CO₂ – измеренная или рассчитанная концентрация диоксида углерода в дымовых газах (в об. %);

A₂ – эмпирический коэффициент, зависящий от вида сжигаемого топлива из таблицы 1.

3. Потери тепла от механической неполноты сгорания топлива q₄ определяются наличием недогоревшего топлива в шлаке или золе (Q₄), выпадающей в газоходе и бункере (в %):

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_p} \cdot 100. \quad (9)$$

4. Потери тепла на излучение и конвекцию в окружающую среду q₅ (в %) включают теплоту, отдаваемую обмуровкой и другими частями котла окружающему воздуху. Они вычисляются нормативным методом по измеренным температуре поверхности котла и окружающего воздуха с использованием принятых коэффициентов теплоотдачи. Либо упрощенно, согласно нормативным табличным данным для номинальной нагрузки (q_{5ном}) и с учетом фактической нагрузки котла (D_ф), отличающейся от номинальной (D_{ном}), по формуле (в %):

$$q_5 = q_{5ном} \frac{D_{ном}}{D_{ф}}. \quad (10)$$

5. Потери тепла в шлаке или золе при слоевом и камерном сжигании твердого топлива q₆ определяются температурой шлака, удельной теплоемкостью и рассчитываются по формуле (в %):

$$q_6 = \frac{Q_6}{Q_p} \cdot 100. \quad (11)$$

Анализ приведенных формул для расчета КПД брутто любого топливосжигающего агрегата по методу обратного баланса позволяет сделать выводы:

1. Нормативный (классический) метод расчета не применим для цели оперативного контроля и регулирования процессов сжигания топлива, так как требует громоздких вычислений удельных объемов, энтальпий продуктов сгорания и др., а также измерений калорийности топлива, химического состава дымовых газов и их расходов. Его можно использовать как проверочный для оценки точности других методов.

2. Для оперативного контроля и регулирования процессов сжигания топлива рационально использовать упрощенные, но достаточно точные (невязка составляет 0,2–1,5%) методы расчета по Равичу, Зигерту и др. При этом для вычислений требуется меньшее количество исходных данных и их легко получить: из таблиц; от штатных КИП агрегатов; от специальных стационарных или переносных газоаналитических приборов. Кроме этого, данные формулы проще «поместить» в микропроцессоры измерительных приборов и вычисления по ним не потребуют большого быстродействия и объема памяти.

Другим важным параметром, существенно влияющим на показатели экономичности и качества работы котлоагрегата, является количество воздуха, поступающее в топку для горения, вернее, соотношение «топливо – воздух», которое определяется коэффициентом избытка воздуха (α).

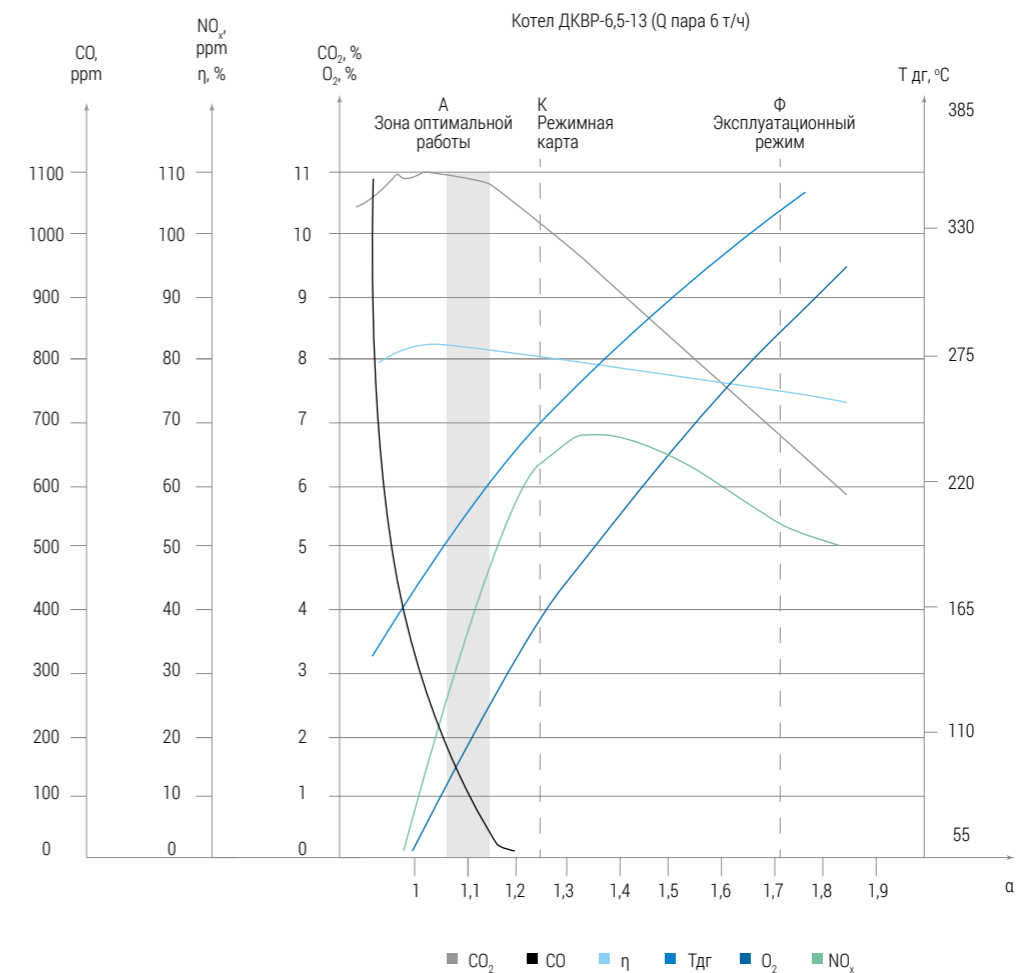
В топливосжигающих агрегатах должно быть точно сбалансировано соотношение «топливо – воздух». Недостаток воздуха вызывает неполное сгорание топлива, появление «недожога» (преимущественно CO), уменьшение температуры дымовых газов и снижение КПД. Избыток воздуха приводит к появлению лишнего кислорода (O₂) в дымовых газах, повышению их температуры и также к снижению КПД. В обоих случаях сжигание топлива сопровождается повышенным выбросом в атмосферу высокотоксичных газов CO и NO_x, т. е. ухудшается экологическая обстановка.

Из приведенных кривых видно, что с уменьшением коэффициента α (альфа) избытка воздуха снижаются содержание кислорода (O₂), температура дымовых газов и потребление электроэнергии вентилятором и дымососом и, как следствие, повышается КПД котла.

Котельные агрегаты, из-за отсутствия газового контроля отходящих дымовых газов и наличия значительных присосов в топке и газоходах, а также в результате применения наладчиками режимных карт (К), работают при необоснованно больших избытках воздуха (Ф). Поэтому уменьшение коэффициента избытка воздуха является эффективным методом снижения потерь теплоты с уходящими газами q₂ и подавления оксидов азота (NO_x). Это достигается только регулированием, при этом не удорожается технологическое оборудование и не меняется конструкция горелочных устройств.

Появление CO определяет границу допустимого воздействия в сторону умень-

Рис. 1. Характеристики котла при регулировании воздуха



шения избытка воздуха. Эта граница является гибкой и зависит:

- от характеристик горелочных устройств;
- от нагрузки котла;
- состава топлива (теплоты его сгорания);
- климатических условий;
- температуры топлива и воздуха;
- технического состояния оборудования и др.

Для создания АСУ-ТП и обмена информацией с другими приборами их следует соединить интерфейсом с управляющим контроллером котла [8]. Разнообразные переносные газоанализаторы, способные рассчитывать параметры горения, с которыми работают наладчики во время режимных испытаний агрегатов (повторяются через 3 года), не решают существующей проблемы. Так как эти приборы, содержащие датчики газов с жидкими электро-



Газовая котельная в поселке Авсюнино

Источник: ozmo.ru

Область экономически выгодного (оптимального) режима сжигания топлива (зона А), соответствующая малым значениям кислорода (0,5–1,5%) и содержанию оксида углерода на уровне 100–300 ppm, выделена на рис. 1 штриховкой. Она может быть обеспечена только автоматической коррекцией работы горелочных устройств.

Для реализации этих принципов существующие и вновь проектируемые котельные агрегаты требуют оснащения надежным оборудованием, таким как:

- стационарные анализаторы дымовых газов;
- быстродействующие микропроцессорные регуляторы;
- интеллектуальные вычислительно-регистрирующие приборы.

литам, которые быстро расходуются, по надежности рассчитаны на кратковременную работу и не могут быть адаптированы в системы автоматического регулирования.

Для этой цели подходят газоаналитические приборы и автоматические системы энергосбережения, разработанные, изготовляемые и внедряемые в течение 25 лет НПФ «УРАН-СПб», которая решает проблемы экономного сжигания топлива в теплоэнергетике [9, 10].

Для контроля экономичности, качества сжигания топлива и для управления этим процессом специально разработано в 2011 г. и серийно выпускается с 2016 г. семейство стационарных комбинированных автоматических анализаторов дымо-

| Наименование параметра | Ед. измер. | Величина |
|---|------------|--------------|
| Диапазон температур окружающего воздуха | °С | –20...+60 |
| Атмосферное давление | кПа | +84...+106,7 |
| Относительная влажность воздуха, при +25 °С | % | до 95 |
| Производственная вибрация (10–55Гц) | мм | до 0,15 |
| Внешнее магнитное поле напряженностью | А/м | до 400 |
| Внешнее электрическое поле напряженностью | кВ/м | до 10 |

Таблица 2. Параметры окружающей среды

| Наименование параметра | Ед. измер. | Величина |
|--|------------|-------------|
| Температура дымовых газов | °С | 0...+1500 |
| Влажность газового потока (при +25 °С) | % | от 0 до +95 |
| Избыточное давление/разрежение | кПа | –5...+5 |
| Скорость потока дымовых газов | м/с | 0...20 |
| Содержание пыли | г/м³ | до 50 |

Таблица 3. Параметры анализируемой газовой среды

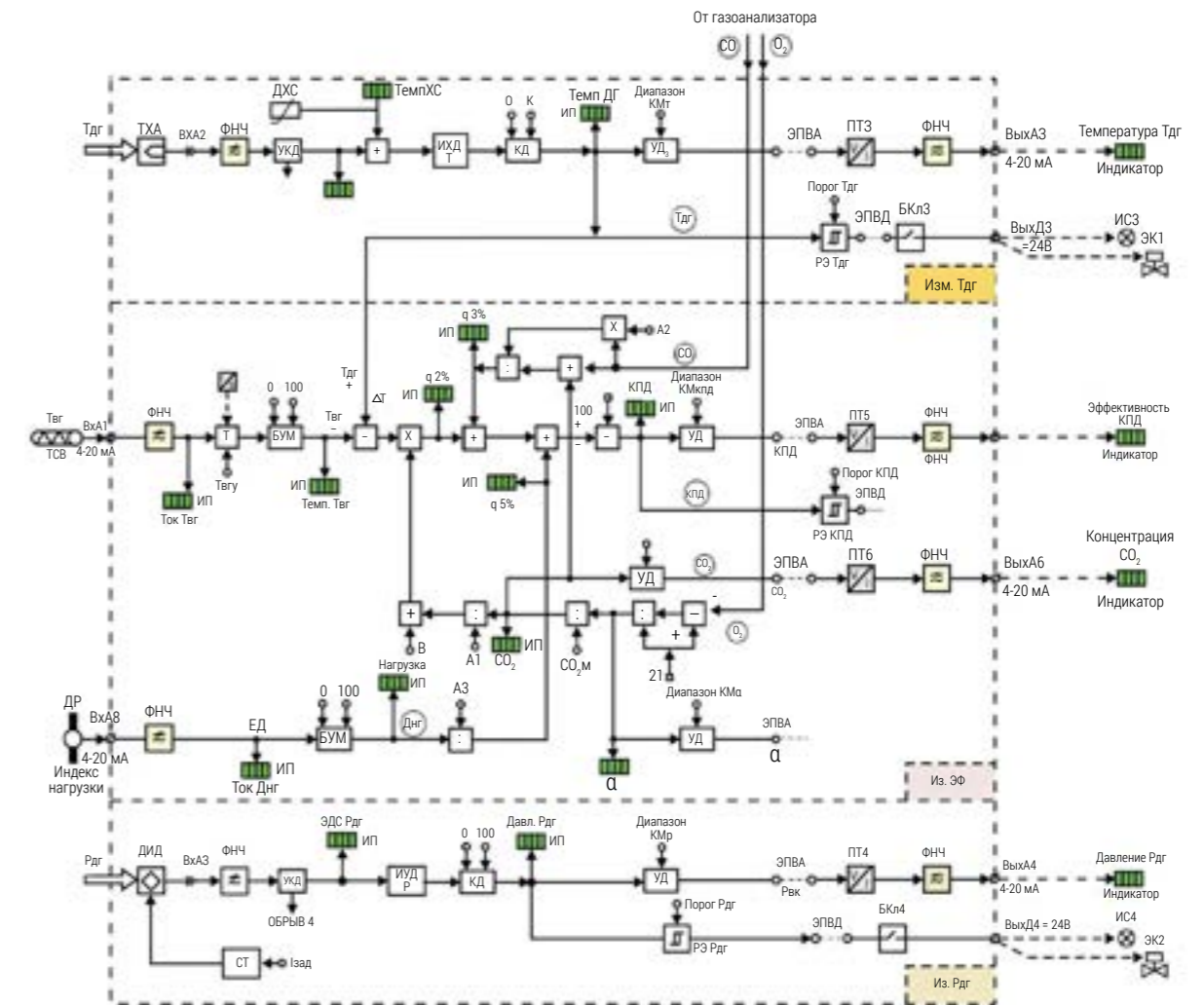


Рис. 2. Функциональная схема вычислителя эффективности горения

вых газов непрерывного действия, внесенное в государственный реестр средств измерений № 87382-22 [11].

В список входят такие модели приборов, как:

- многокомпонентный анализатор дымовых газов – КАДГ.
- интеллектуальный анализатор качества горения топлива – ИАКГ.
- корректор-анализатор качества горения топлива – КАКГ.
- отдельный вычислитель эффективности «Факел-К» с ЖК монитором.

Комбинированные анализаторы дымовых газов предназначены для:

- измерения концентрации кислорода, оксида углерода и оксидов азота в отходящих газах топливосжигающих установок;
- измерения температуры дымовых газов и воздуха на горение;
- измерения избыточного давления/ разрежения дымовых газов или (в моделях КАКГ) давление воздуха на горение;
- а также определения расчетным методом (в моделях ИАКГ, КАКГ) содержания диоксида углерода (CO₂) и эффективности горения топлива (КПД), определения расчетным методом

по ПИД-закону (в модели КАКГ) величины скорректированного давления воздуха или коэффициента коррекции с целью оптимизации процессов горения.

Анализаторы имеют встроенное программное обеспечение (ПО), разработанное специально для решения задач измерения содержания определяемых компонентов, температуры и давления анализируемой среды, а также вычисления параметров, характеризующих эффективность топливосжигающих установок. Функциональная схема вычислительного устройства для моделей ИАКГ, КАКГ приведена на рис. 2.

Все приборы унифицированы и выполнены на единой конструктивной платформе, изготавливаются в четырех модификациях (Н), (П), (Т), (Ех) с разной длиной погружной части и применяются в различных условиях окружающей (таблица 2) и анализируемой (таблица 3) сред, соответственно, нормальной, запыленной, высокотемпературной и взрывоопасной. Способ отбора пробы газа диффузионный или принудительный с использованием встроенного эжектора или воздушного компрессора.

Анализаторы выполнены в виде измерительных и вычислительно-индицирующих блоков, соединенных или разобщен-

Промышленная котельная

Источник: stroiteh-msk.ru



Современная котельная

Источник: Trapezondal / depositphotos.com

ных между собой, которые монтируются непосредственно на стенке дымохода у точки отбора пробы и перед оператором.

В анализаторах использованы надежные и долговечные датчики по измерительным каналам:

- концентрации кислорода, оксида углерода и оксидов азота – электрохимические на твердых электролитах;
- температуры – термоэлектрические и терморезистивные;
- избыточного давления/ разрежения – пьезорезистивные.

Предлагаемые НПФ «УРАН-СПБ» газоаналитические приборы, системы коррекции соотношения «топливо – воздух» и комплексные системы автоматизации

котлоагрегатов с функцией энергосбережения позволяют:

- реализовать общую концепцию энергосберегающей работы котлоагрегатов в непрерывном режиме;
- экономить до 6–10% топлива в течение года;
- сократить на 30–40% выбросы оксидов азота в атмосферу;
- уменьшить на 20–55% потребление электроэнергии вентиляторами и дымососами;
- повысить надежность работы теплотехнического и механического оборудования за счет диагностики и контроля работы газовоздушных трактов, датчиков, исполнительных механизмов и др.

Использованные источники

1. Новиков О. Н., Артамонов Д. Г., Шкаровский А. Л., Кочергин М. А., Окатьев А. Н. Энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива в котлах и печах регулированием соотношения «топливо – воздух» // «Промышленная энергетика». № 5, 2000. С. 57–60.
2. Воликов А. Н., Новиков О. Н., Окатьев А. Н. Повышение эффективности сжигания топлива в котлоагрегатах // «Энергоназор-информ». № 1(43), 2010. С. 54–57.
3. Либерман Н. Б. Справочник по проектированию котельных установок систем централизованного теплоснабжения. Общие вопросы проектирования и основное оборудование // М. «ЭКОЛИТ», 2011.
4. ОСТ 108.030.132-80 «Котлы паровые стационарные. Методы испытаний».
5. ГОСТ Р 54202–2010 «Ресурсосбережение. Газообразные топлива. Наилучшие доступные технологии сжигания».
6. Равич М. Б. Эффективность использования топлива. «Наука», 1977.
7. Flue gas analyser GA-40 «MADUR electronics» 1996.
8. Воликов А. Н., Маслов Ю. В., Новиков О. Н. Энергоэкологическая реабилитация – экономичный путь повышения энергоэффективности предприятия // Журнал «Инженерные системы». № 2, 2011.
9. Бюджетная модернизация всегда в цене // Журнал «Промышленно-строительное обозрение». № 4, 2014.
10. Шкаровский А. Л., Новиков О. Н., Новикова А. В., Полушкин В. Н. Разработка нового семейства интеллектуальных систем управления качеством сжигания топлива // Журнал «Современные наукоемкие технологии». № 12, 2016.
11. Анализаторы дымовых газов, комбинированные модели КАДГ, ИАКГ, КАКГ. «Сертификат № 87382–22 об утверждении типа средств измерений», 2022.