



ПОЛИТЕХ
Институт компьютерных
наук и технологий



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

**ЮБИЛЕЙНЫЕ ЧТЕНИЯ,
ПОСВЯЩЕННЫЕ НАУЧНОЙ ШКОЛЕ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Сборник научных трудов



Новиков Олег Николаевич¹
к.т.н., генеральный директор
Окатьев Алексей Николаевич²
к.т.н., технический директор
Крыжова Надежда Сергеевна³
аспирант

ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ПРОМЫШЛЕННОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Санкт-Петербург, АО НПФ «УРАН-СПб»^{1,2}
СПбПУ Петра Великого³

onnovikov1941@mail.ru¹; okan@mail.ru²; nadezhda.kryzhova@gmail.com³

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.

Специалисты по энергетике, экономике, автоматизации, приборостроению, метрологии, экологии др., связанные с 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 охватывается общим понятием **энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива**, которая предусматривает инструментальный контроль процессов с их оценкой и внедрение прогрессивных технических решений [1,2], для повышения 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].

• **Энергетические показатели**, связанные с технологией сжигания топлива, характеризуют степень использования тепла топлива или тепла другого источника - тепловую экономичность различных агрегатов.

Энергетические показатели: 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.

• **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_T); приведенные затраты (З).

• **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_o).

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 котлоагрегата, является коэффициент полезного действия брутто, который определяется прямым или обратным методом из уравнения теплового баланса по формулам:

$$\eta_k^{бр} = \frac{Q_1}{Q_p} 100; \quad Q_1 = \frac{Q_k^{бр}}{B_k},$$

где Q_1 – полезно использованное тепло котлоагрегатом (ккал/ кг);
 Q_p^p – располагаемое тепло, содержащееся в расходуемом топливе, с учетом физического тепла, внесенного воздухом и топливом при горении (ккал/кг);
 Q_k^{6p} – выработанное тепло (ккал/ч) и V_k – расход топлива котлоагрегатом (кг/ч).

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

Обратный метод определения КПД брутто котлоагрегатов является предпочтительным, пригоден для оперативного использования при эксплуатации существующего оборудования и заключается в определении величин всех потерь теплового баланса по формуле:

$$\eta_k^{6p} = q_1 = 100 - \sum_{j=2}^6 q_j$$

где q_1 – удельное полезно использованное тепло в %;

q_j – удельные потери тепла в котлоагрегате 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 ($q_2 + q_3 + q_5$).

В свою очередь, каждый вид потерь определяется уравнениями.

▪ Потери тепла с уходящими дымовыми газами q_2 (в %) - по формулам:

По «классической» формуле [4]

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p^p} 100 = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} I_{xв}^0) (100 - q_4)}{Q_p^p}; \alpha_{yx} = \frac{V_B}{V_B^0} = \frac{21}{21 - O_2},$$

где I_{yx} – удельная энтальпия уходящих газов при коэффициенте α_{yx} , температуре θ_{yx} и полном сгорании топлива; $I_{xв}^0$ – удельная энтальпия теоретически необходимого количества холодного воздуха на входе в котел; α_{yx} – коэффициенте избытка воздуха; V_B – фактический объем воздуха, расходуемый на горение; V_B^0 – теоретически необходимый объем воздуха для стехиометрического горения; O_2 – измеренная концентрация кислорода в уходящих газах в об. %.

По упрощенной формуле М.Б. Равича [6]

$$q_2 = 0,01 Z (t_{yx} - t_{вх}); Z = \frac{[C' + (h-1)B' K] 100}{t_{max}}, h = \frac{CO_{2max}}{CO_2 + CO + CH_4}$$

где t_{yx} – температура уходящих дымовых газов; $t_{вх}$ – температура воздуха, поступающего в топку; t_{max} – жаропроизводительность топлива из таблиц; h – коэффициент разбавления дымовых газов воздухом; CO_{2max} – наибольшая концентрация диоксида углерода в дымовых газах при полном сжигании топлива из таблиц; $CO_2 + CO + CH_4$ – сумма углеродсодержащих

газов; V' – усредненная характеристика топлива и C' , K – поправочные коэффициенты, зависящие от температуры дымовых газов из таблиц.

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

$$q_2 = (T_{дг} - T_{вг}) \left[\frac{A_1}{CO_2} + B \right]; \text{ или } q_2 = (T_{дг} - T_{вг}) \left[\frac{A_1}{(21 - O_2)} + B \right]; \alpha = \frac{CO_{2max}}{CO_2} = \frac{21}{21 - O_2},$$

где $T_{дг}, T_{вг}$ – измеренная температура дымовых газов и воздуха, подаваемого на горение (в °С); CO_2 – измеренная или рассчитанная концентрация диоксида углерода в дымовых газах (в об.‰); O_2 – измеренная концентрация кислорода в сухих дымовых газах (в об.‰); CO_{2max} – наибольшая концентрация диоксида углерода в дымовых газах при полном сжигании топлива из табл. 1 (в об.‰); α – коэффициенте избытка воздуха; B и A_1 – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида сжигаемого топлива из табл. 1.

Таблица 1. Эмпирические топливные параметры

| 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 | 0,50 | 0,007 | 52 | 15,7 |
| Каменный уголь | 0,68 | 0,000 | 69 | 18,8 |
| Бурый уголь | 0,98 | 0,000 | 69 | 19,1 |

▪ *Потери тепла от химической неполноты сгорания топлива q_3 (в %):*

По «классической» формуле

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

где $V_{с.г}$ – объем сухих дымовых газов при 0°С и 0,1 МПа в месте отбора на анализ; CO, CH_4, H_2, C_nH_m – содержание продуктов неполного сгорания топлива в дымовых газах.

По упрощенной формуле М.Б. Равича

$$q_3 = \frac{Q_3 100}{B_T Q_H^p} = \frac{(30,2CO + 25,8H_2 + 85,5CH_4) h 100}{P};$$

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

По упрощенной формуле Зигерта

$$q_3 = \frac{A_2 CO}{(CO_2 + CO)}; CO_2 = CO_{2max} \left(1 - \frac{O_2}{21} \right),$$

где CO – измеренная концентрация оксида углерода в дымовых газах (в об.‰); CO_2 – измеренная или рассчитанная концентрация диоксида углерода в дымовых газах (в об.‰); A_2 – эмпирический коэффициент, зависящий от вида сжигаемого топлива из табл. 1.

▪ *Потери тепла от механической неполноты сгорания топлива q_4 определяются наличием недогоревшего топлива в шлака или золе (Q_4), выпадающей в газоходе и бункере (в %):*

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_p} 100.$$

▪ *Потери тепла на излучение и конвекцию в окружающую среду* q_5 (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 ($Q_{5\text{ном}}$) и с учетом фактической нагрузки котла (D_ϕ), отличающейся от номинальной ($D_{\text{ном}}$), по формуле (в %):

$$q_5 = Q_{5\text{ном}} \frac{D_{\text{ном}}}{D_\phi}.$$

▪ *Потери тепла в шлаке или золе при слоевом и камерном сжигании твердого топлива* q_6 определяются температурой шлака, удельной теплоемкостью и рассчитываются по формуле (в %):

$$q_6 = \frac{Q_6^{\text{шл}}}{Q_p} 100.$$

Анализ приведенных формул для расчета КПД брутто любого топливосжигающего агрегата по методу прямого 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: М.Б. Равича, Зигерта и др. При этом для вычислений требуется меньшее количество исходных данных и их легко добыть: 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, – это количество воздуха, поступающего в топку для горения, вернее, соотношением «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 СО), уменьшение температуры дымовых газов и снижение КПД. Избыток

воздуха приводит к появлению лишнего кислорода (O_2) в дымовых газах, повышению их температуры и так же снижению КПД. В обоих случаях сжигание топлива сопровождается повышенным выбросом в атмосферу высокотоксичных газов CO и NO_x т.е. ухудшается экологическая обстановка.

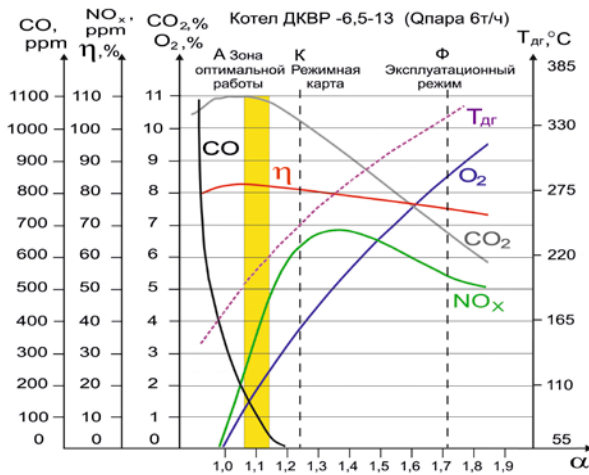


Рис. 1 Характеристики котла при регулировании воздуха

На рис.1 приведена зависимость содержания основных компонентов продуктов сгорания (O_2 , CO_2 , CO , NO_x), температуры дымовых газов $T_{дг}$ и КПД (η) котлоагрегата от коэффициента избытка воздуха (α).

Из приведенных кривых видно, что с уменьшением коэффициента избытка воздуха снижаются содержание кислорода (O_2), 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 действий наладчиков для безопасности котлов с режимными картами (К), работают при необоснованно больших избытках воздуха (Ф). Поэтому уменьшение коэффициента избытка воздуха является эффективным методом снижения потерь теплоты с уходящими газами q_2 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 на уменьшение 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. 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: надежными, стационарными анализаторами дымовых газов; быстродействующими микропроцессорными регуляторами; интеллектуальными вычислительно-

регистрирующими приборами, а для создания АСУ-ТП и обмена информацией, соединить их 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. Потому, что эти приборы, содержащие датчики газов с жидкими электролитами, которые быстро расходуются, по надежности рассчитаны на кратковременную работу и не могут быть адаптированы в системы автоматического регулирования.

Для этой цели подходит газоаналитические приборы и автоматические системы энергосбережения, разработанные, изготавливаемые и внедряемые в течение 25 лет НПФ «УРАН-СПб», которая занимается решением проблем экономного сжигания топлива в теплоэнергетике [9, 10].

Для контроля экономичности, качества сжигания топлива и для управления этим процессом специально разработано в 2011 году и серийно выпускается с 2016 года семейство стационарных, комбинированных, автоматических анализаторов дымовых газов непрерывного действия, внесенное в государственный реестр средств измерений № 62989-16 [11].

В список входят следующие модели приборов, представлены на рис.1:

- Многокомпонентный анализатор дымовых газов – КАДГ.
- Интеллектуальный анализатор качества горения топлива – ИАКГ.
- Корректор-анализатор качества горения топлива – КАКГ.

Комбинированные анализаторы дымовых газов предназначены для:

- измерения концентрации кислорода и оксида углерода в отходящих топливосжигающих установках;

- измерения температуры дымовых газов и воздуха на горение;

- измерение избыточного давления/разрежения дымовых газов или (в моделях КАКГ) давление воздуха на горение,

а также определение расчетным методом (в моделях ИАКГ, КАКГ) содержание диоксида углерода (CO_2) и эффективности горения топлива (КПД), определение расчетным методом по ПИД-закону (в модели КАКГ) величины скорректированного давления воздуха или коэффициента коррекции с целью оптимизации процессов горения.



Рис. 2 Семейство комбинированных анализаторов дымовых газов моделей КАДГ, ИАКГ, КАКГ

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. 3.

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 (таб. 2) и анализируемой (табл. 3) сред, соответственно, нормальной, запыленной, высокотемпературной и взрывоопасной. Способ отбора пробы газа диффузионный или принудительный с использованием встроенного воздушного эжектора или компрессора.

Таблица 2. Параметры окружающей среды

| Наименование параметра | Ед. измер. | Величина |
|--|------------|----------------|
| Диапазон температур окружающего воздуха | °С | -20...+60 |
| Атмосферное давление | кПа | +84,0...+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 3. Параметры анализируемой газовой 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 | -5,0...+5,0 |
| Скорость потока дымовых газов | м/с | 0...20 |
| Содержание пыли | г/м ³ | до 50 |

Анализаторы выполнены в виде нескольких блоков, которые монтируются непосредственно на стенке дымохода у точки отбора пробы.

В анализаторах использованы надежные и долговечные датчики по измерительным каналам:

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

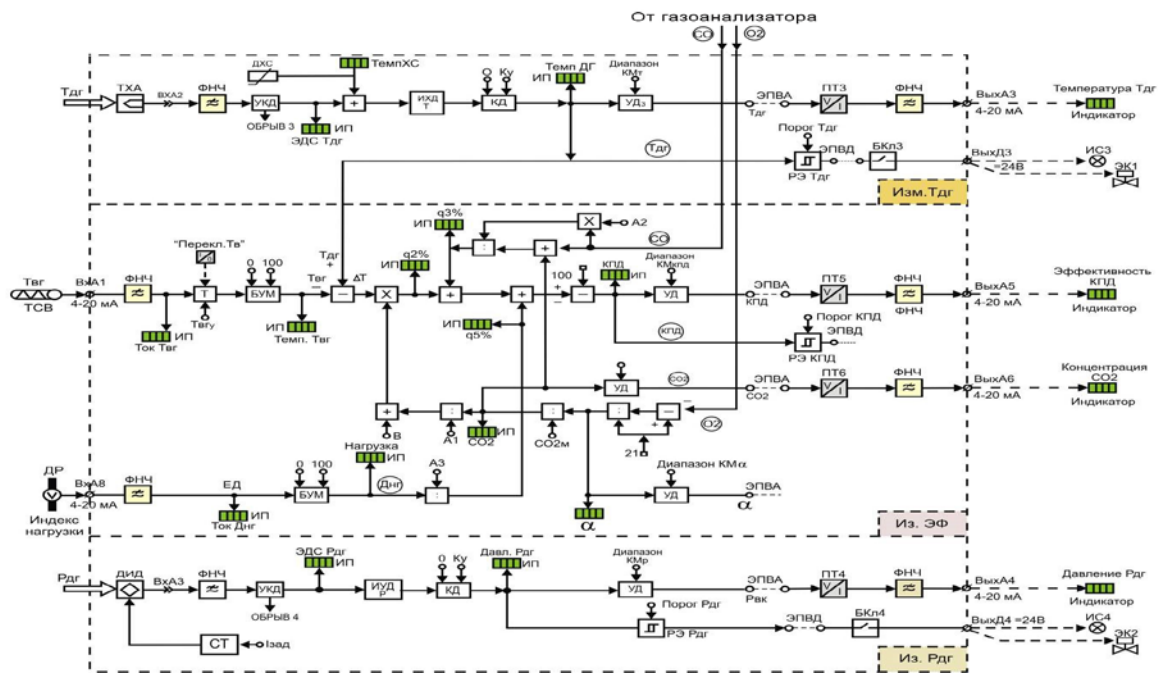


Рис. 3 Функциональная схема вычислителя эффективности горения

В функциональной схеме (рис.3) содержатся элементы, обозначенные:

- **ТСВ**, **ДР** – внешние датчики: термометр сопротивления; расходомер топлива или пара (индекс нагрузки);
- **БУМ** – звено установки масштаба измеряемого параметра;
- **Т** – электронный (виртуальный) переключатель сигналов;
- **1/0** – кнопка электронного переключателя сигналов.
- **УД** – устройство установки диапазона измерения параметра;
- **ПТ** – преобразователь «напряжение-ток» измерительного канала;
- **ИП** – индикация параметра на ЖК-дисплее;
- **РЭ** – компаратор, сравнивающий текущее значение параметра с пороговым значением и формирующий логический сигнал;
- **УКД** – устройство контроля состояния датчика;
- **ФНЧ** – фильтр низкой частоты для входного или выходного сигналов;
- **ТХА**, **ДИД** – датчики температуры; избыточного давления/разрежения в блоке БИД анализатора;
- **+**, **-**, **÷**, **×**, **:**, **exp** – математические операции;
- **XXX □→** – постоянный коэффициент, программируемый пользователем;
- **XXX ○→** – константа, запрограммированная во FLASH-память на заводе-изготовителе;
- **ЭПВА**, **ЭПВД** – электронные переключатели (коммутаторы) аналоговых и релейных выходов.

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 газо-воздушных трактов, датчиков, исполнительных механизмов и др.

Заинтересованные читатели могут найти подробную информацию по научно-техническим достижениям фирмы на ее сайте: www.uranspb.ru

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков О.Н., Артамонов Д.Г., Шкаровский А.Л., Кочергин М.А., Окадьев А.Н. Энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива в котлах и печах регулированием соотношения «топливо-воздух». // Промышленная энергетика, 2000, № 5, с. 57-60.

2. Воликов А.Н., Новиков О.Н., Окадьев А.Н. Повышение эффективности сжигания топлива в котлоагрегатах. // Энергоназор-информ, 2010, № 1(43), с. 54-57.

3. Либерман Н.Б. Справочник по проектированию котельных установок систем централизованного теплоснабжения. Общие вопросы проектирования и основное оборудование. М.: ЭКОЛИТ, 2011, 224 с.

4. ОСТ 108.030.132-80 «Котлы паровые стационарные. Методы испытаний». Л.: НПО ЦКТИ, 1980, 19 с.

5. ГОСТ Р 54202-2010 «Ресурсосбережение. Газообразные топлива. Наилучшие доступные технологии сжигания». М: Стандартинформ, 2011, 27 с.

6. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. М: Наука, 1977, 344 с.

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. // Инженерные системы, 2011, № 2, с. 42-49.

9. Бюджетная модернизация всегда в цене. // Промышленно-строительное обозрение, 2014, № 4, с. 38-39.

10, Шкаровский А.Л., Новиков О.Н., Новикова А.В., Полушкин В.Н. Разработка нового семейства интеллектуальных систем управления качеством сжигания топлива. // Современные наукоемкие технологии, 2016, № 12, с. 556-561.

11. Анализаторы дымовых газов комбинированные модели КАДГ, ИАКГ, КАКГ. «Свидетельство № 61259 об утверждении типа средств измерений», 2016.