

УДК 696.42

*Риполь-Сарагоси Т.Л.,
д.т.н., профессор, заведующая кафедрой «Теплоэнергетика на
железнодорожном транспорте»
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей
сообщения»
Россия, г. Ростов-на-Дону*

*Гладких М.А.,
инженер отдела технического сопровождения, студент
1 курс, факультет «Энергетический»
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей
сообщения»
Россия, г. Ростов-на-Дону*

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МОДУЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы, связанные с повышением энергоэффективности котлоагрегатов модульных котельных. Рассмотрены различные критерии энергоэффективности. В качестве основного выбран коэффициент полезного действия котлоагрегата. Определены пути его повышения для чего спроектированы три различные схемы модульной котельной. Определение количественного изменения к.п.д. в каждой схеме проводилось с помощью ранее представленного алгоритма по результатам проведенных натурных испытаний, визуализированных в виде гистограммы. Представленный графический материал проанализирован.

Ключевые слова: энергоэффективность, котлоагрегат, модульная котельная, коэффициент полезного действия, гистограмма, натурные испытания.

Introduction: *The article deals with issues related to improving the energy efficiency of boiler units in modular boiler houses. Various criteria for energy efficiency are considered. The efficiency of the boiler unit was chosen as the main one. The ways of its increase are determined, for which three different schemes of a modular boiler house are designed. Determination of the quantitative change in k.p.l. in each scheme was carried out using the previously presented algorithm based on the results of field tests, visualized in the form of a histogram. The presented graphic material was analyzed.*

Key words: *energy efficiency, boiler unit, modular boiler house, efficiency, histogram, field tests.*

Расширение диапазона использования модульных котельных в Российской Федерации при переходе с централизованного теплоснабжения на индивидуальное неизбежно связано с рассмотрением возможности повышения их энергоэффективности [1].

К показателям энергетической эффективности модульных котельных можно отнести:

- коэффициент полезного действия;
- расход топлива на получение теплоносителя;
- вспомогательное потребление электроэнергии.

В ходе проведения аналитического обзора работы различных конструкций модульных котельных, а также схем их эксплуатации наиболее целесообразным представляется в качестве основного критерия повышения энергоэффективности модульных котельных выбрать определение путей повышения величины коэффициента полезного действия котлоагрегата.

В целях определения количественного значения повышения КПД котельной при внедрении установки кислородного регулирования и экономайзера было принято решение о проведении испытаний различных схем водогрейных котлов в ООО «НПО Астера» [2].

На начальном этапе испытаний проводилась оценка эффективности сгорания топлива, которая определялась путем измерения содержания кислорода и (или) углекислого газа в дымовых газах. Кислородный тест обеспечивает точное измерение соотношения воздух/топливо для конкретной рабочей нагрузки конкретной отопительной установки и вида топлива. Это может быть достигнуто путем размещения анализатора с передающим устройством в канале дымовых газов. Тесты на количественное содержание углекислого газа в дымовых газах можно проводить с использованием аналогичного метода.

Испытания проводились при следующих режимах:

- Номинальная нагрузка котельного агрегата;
- Пятидесятипроцентная нагрузка котельного агрегата.

Объектом испытания выбрана котельная установка "БКУ АСТЕРА-5800", в которой котел №1 ARCUS IGNIS F-1600 включен в стандартную схему, котел №2 – имеет систему кислородного регулирования, а котел №3 – подключен к экономайзеру. В качестве топлива используется природный газ, основные данные по которому приведены в таблицах 1 и 2. В таблице 3 представлены параметры измерения работы установок.

Таблица 1.

Теплотворная способность и состав топлива

Характеристика	Обозначение	Размерность	Величина
Теплота сгорания топлива	Q_H^c	кДж/нм ³	35750
Метан	CH_4	%	98,99
Этан	C_2H_6	%	0,25
Пропан	C_3H_8	%	0,04
Бутан	C_4H_{10}	%	0,02
Азот	CO_2	%	0,10
Кислород	N_2	%	0,60

Таблица 2.

Характеристики топлива

Характеристика	Обозначение	Размерность	Величина
Теоретическое количество воздуха	V_{ϵ}^0	нм ³ /нм ³	9,48
Количество сухих трехатомных газов в продуктах сгорания	$V_{RO_2}^0$	нм ³ /нм ³	1,00
Количество водяных паров в продуктах сгорания (при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$)	$V_{H_2O}^0$	нм ³ /нм ³	2,14
Количество азота в продуктах сгорания (при $\alpha = 1$)	$V_{N_2}^0$	нм ³ /нм ³	7,50
Безразмерная характеристика топлива (характеристика Бунте)	β	–	0,803

Таблица 3.

Измеряемые параметры

Характеристика	Обозначение	Размерность
Расход топлива	B	нм ³ /час
Расход воды	D	м ³ /ч
Температура воды на входе	t_{ϵ}'	°С
Температура воды на выходе	t_{ϵ}''	°С
Температура воздуха в котельной	$t_{xв}$	°С
Температура дымовых газов на выходе	$\theta_{yг}$	°С
Двуокись углерода	CO_2	%
Кислород	O_2	%

Ниже приведен алгоритм расчета коэффициента полезного действия котельной установки в вышеописанных схемах работы.

Расчет коэффициента избытка воздуха проводим:

по кислородной формуле:

$$\alpha = \frac{1}{1 - O_2/21}.$$

по азотной формуле:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79 O_2 - 0,5 \cdot CO}{21 N_2}},$$

где CO – содержание окиси углерода в уходящих газах, вычисляем по формуле:

$$CO = \frac{(21 - \beta \cdot CO_2) - (CO_2 + O_2)}{0,605 + \beta}, \%;$$

где N_2 – содержание азота:

$$N_2 = 100 - (CO_2 + O_2 + CO), \%.$$

Полезно использованная теплота по прямому балансу определяется как:

$$Q_1 = \frac{D(h_g'' - h_g') \cdot 1000}{B}, \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3}.$$

где Q_p^p – располагаемая теплота; в данном случае $Q_p^p = Q_n^c$.

Потери теплоты с уходящими газами:

$$Q_2 = I_{yz} - I_{xв}, \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3},$$

где I_{yz} – энтальпия уходящих газов, $\frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3}$:

$$I_{yz} = [(V_{RO_2}^0 \cdot c_{RO_2} + V_{N_2}^0 \cdot c_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot c_{H_2O}) + (\alpha - 1)V_g^0 \cdot c_g] \cdot \theta_{yz}, \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3};$$

$$I_{xв} - \text{энтальпия холодного воздуха, } \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3}:$$

$$I_{xg} = \alpha \cdot V_{\epsilon}^0 \cdot c_{\epsilon} \cdot t_{xg}, \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3}.$$

Относительная потеря с уходящими газами:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p} \cdot 100, \%$$

Потери теплоты от химического недожога:

$$Q_3 = V_{\text{сз}} (126,4 \cdot CO + 107,98 \cdot H_2 + 358,2 \cdot CH_4 + \dots + 590,6 \cdot C_m H_n), \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3},$$

где $V_{\text{сз}}$ – объем сухих газов:

$$V_{\text{сз}} = V_{RO_2} + V_{H_2O}^0 + (\alpha - 1) \cdot V_{\epsilon}^0, \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}.$$

Относительная потеря:

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_p} \cdot 100, \%$$

Относительные потери от механического недожога.

При сжигании газа они равны нулю $q_4 = 0$. Относительные потери теплоты через наружное ограждение котлоагрегата.

Эта потеря является табличным данным и зависит от мощности при работе котла на номинальном режиме или определяется по ниже представленной формуле:

$$q_5 = 4,05 \cdot Q^{\text{н}^{-0,4337}}, \%$$

Для данного котла потеря теплоты от внешнего охлаждения на номинальном режиме по приведенной формуле оставляет $q_5 = 3,30 \%$.

Тепловая мощность котла ARCUS IGNIS F-1600 на режиме испытаний меньше номинальной в $x = \frac{Q_{\epsilon} \cdot 3,6}{D(t''_{\epsilon} - t'_{\epsilon}) \cdot 4,19}$ раз.

Потери через наружное ограждение при частичной нагрузке больше, чем при номинальной в такое же число раз (абсолютная величина потерь принимается неизменной).

В этом случае $q_5 = q_5^H \cdot x$.

Относительные потери с теплотой шлака. При сжигании газа эти потери равны нулю. $q_6 = 0$.

Коэффициент полезного действия котла по обратному балансу, %:

$$\eta_{ка} = 100 - q_2 - q_3 - q_5.$$

Для осуществления системы кислородной регулировки на котле №2 первоначальная двухступенчатая горелка марки TBG 210 P заменяется на горелку аналогичного типоразмера TBG 210 ME, предназначенную для осуществления исследуемого регулирования. Также следует оборудовать дымоходы котла газоанализаторами для генерирования управляющего сигнала системы.

Основываясь на руководствах по первоначальному розжигу горелок различной конфигурации фирмы Baltur, поддерживаемые концентрации свободного кислорода после котлоагрегата в стандартных комплектациях принимаются в диапазоне 3,5...5,5 %. В случае же внедрения схемы с корректировкой по датчику кислорода, настройка режимов работы котлоагрегата производится в границах 1...2 %.

С помощью данных представленных выше таблиц и алгоритма расчета коэффициента полезного действия водогрейного котла в различных схемах была построена гистограмма с помощью которой произведена визуализация полученных результатов.

Таблица 4.

**Результаты расчетов эффективности внедрения установок на
рабочем режиме**

Характеристика	Средние оказания котла №1	Средние показания котла №2	Средние показания котла №3	Размерность
CO	0,030	0,020	0,030	%
N_2	86,34	87,59	86,34	%
α по кислородной формуле	1,27	1,09	1,273	—
α по азотной формуле	1,243	1,078	1,243	—
Q_1	32 532,50	32 532,50	32 532,50	кДж/нм ³
I_{ye}	731,27	637,78	491,88	кДж/нм ³
I_{ye}	57,99	49,58	47,00	кДж/нм ³
Q_2	673,27	588,20	444,87	кДж/нм ³
q_2	1,88	1,65	1,24	%
V_{ce}	5,72	3,97	5,44	нм ³ /нм ³
Q_3	21,70	10,04	20,63	кДж/нм ³
q_3	0,06	0,03	0,06	%
q_5	6,61	6,61	6,61	%
$\eta_{ка}$	91,45	91,72	92,09	%

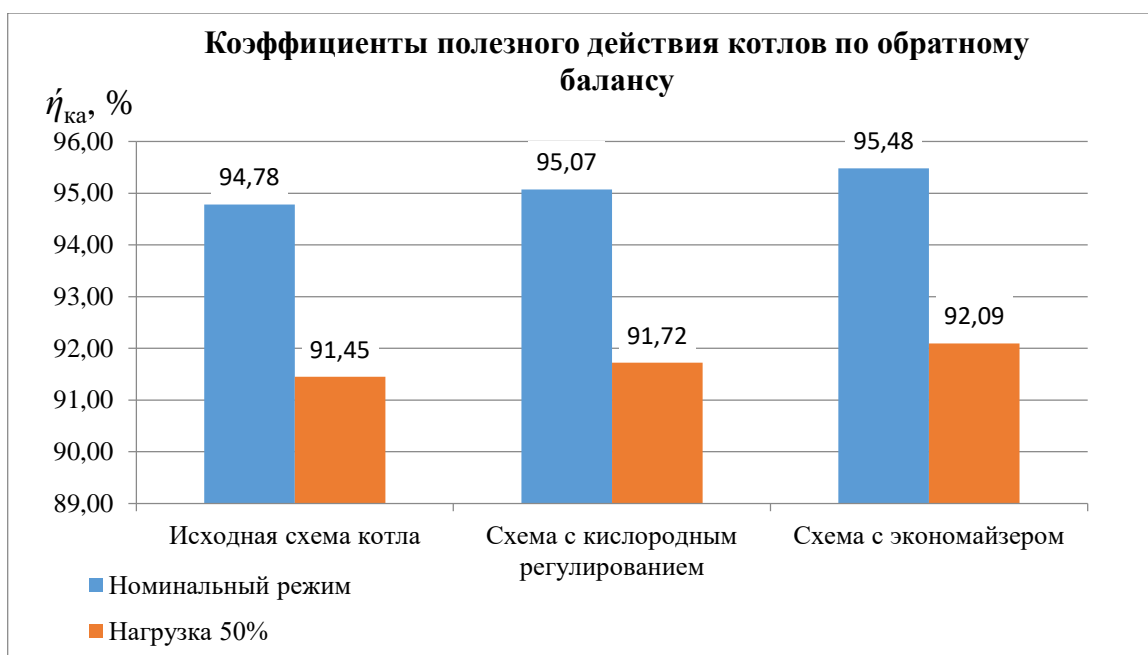


Рисунок 1. Сводная гистограмма результатов испытаний

На основании проделанных расчетов можно констатировать следующее: при прочих равных условиях поддержание пониженного содержания свободного кислорода в уходящих газах способствует уменьшению коэффициента избытка воздуха при сжигания топлива, что приводит к незначительному, но все же увеличению коэффициента полезного действия котла по сравнению с исходной схемой. Однако, наименьшие потери теплоты были достигнуты в схеме котла с экономайзером как на расчетной нагрузке, так и уменьшенной в два раза нагрузке. Снижение содержания кислорода в уходящих газах в объеме дымовых газов на 3,5 % способствовала увеличению коэффициента полезного действия котла в среднем на 0,31 %. В свою очередь, установка экономайзера позволила поднять эту величину в два раза, что наглядно доказывает возможности управления энергоэффективностью модульных котельных с помощью кислородного регулирования и установки экономайзера.

Использованные источники:

1. Риполь-Сарагоси Т.Л., Черников В.В., Юнак С.А. Модернизация конвективной части водогрейного котла как способ повышения его энергоэффективности // Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростовн/Д. 2021с.67-72.
2. Муравьев, А. В. Моделирование гидродинамики и теплообмена в каналах с турбулизаторами / Муравьев А.В. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4 – С. 189–195. DOI 10.46973/0201–727X_2021_4_189.