

УДК 621.182.9

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ  
С ПЕРЕМЕННЫМ ОБЪЕМОМ ТОПКИ  
ПРИ СЖИГАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ УГЛЯ**

**ENERGY AND EXERGISTIC ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SOLID-FUEL  
WATER-HEATING BOILERS OF SMALL POWER WITH  
THE MOBILE COLUMN SCREEN INSTALLATION**

©Хужаев П. С.

*Таджикский технический университет им. акад. М. С. Осими  
г. Душанбе, Таджикистан, parviz0774@inbox.ru*

©Khujaev P.

*Osimi Tajik technical university  
Dushanbe, Tajikistan, parviz0774@inbox.ru*

©Сулейманов А. А.

*д-р техн. наук  
Таджикский технический университет им. акад. М. С. Осими  
г. Душанбе, Таджикистан*

©Suleymanov A.

*Dr. habil., Osimi Tajik technical university  
Dushanbe, Tajikistan*

©Сайвалиев Ф. Р.

*Таджикский технический университет им. акад. М. С. Осими  
г. Душанбе, Таджикистан*

©Sayvaliev F.

*Osimi Tajik technical university  
Dushanbe, Tajikistan*

©Рахмонзода Т. Р.

*Таджикский технический университет им. акад. М. С. Осими  
г. Душанбе, Таджикистан*

©Rakhmonzoda T.

*Osimi Tajik technical university  
Dushanbe, Tajikistan*

*Аннотация.* Вопросы энергетической и эксергетической эффективности сжигания топлива остаются актуальными в настоящее время. Пути уменьшения потерь теплоты и снижения количества сжигаемого топлива рассматривается в работах многих авторов, так как сжигание топлива в большом количестве практически всегда сопровождается определенными потерями, приводящими к снижению КПД котельного агрегата.

*Abstract.* The article deals with the issues of energy and exergistic analysis of effective fuel combustion remain relevant at the present time. Ways to reduce heat losses and reduce the amount of fuel burned are considered in the works of many authors, since combustion of fuel in large quantities is almost always accompanied by certain losses, leading to a decrease in the efficiency of the boiler unit.

*Ключевые слова:* эффективность работы котельного агрегата, котельный агрегат, термодинамический анализ, энергетическая эффективность, эксергетический КПД, топливо, потери теплоты с уходящими газами, анализ эффективности работы, температура горения топлива.

*Keywords:* boiler plant efficiency, boiler unit, thermodynamic analysis, energy efficiency, energy efficiency, fuel, heat loss with outgoing gases, performance analysis, fuel combustion temperature.

Для оценки эффективности теплотехнических процессов в котле используем метод, основанный на использовании первого и второго законов термодинамики. Для термодинамической оценки эффективности котла применим метод эксергетических балансов [2, 4].

При экономической эффективности котла для оценки термодинамического совершенства энерготехнологических систем, теплотехнических установок и их элементов все шире используется эксергетический анализ. В его основе лежит понятие эксэргии, под которой понимают максимальную работу термодинамической системы при обратимом переходе ее в состояние равновесия с окружающей средой.

Одним из известных и распространенных методов исследования различных технологических и энергетических процессов является термодинамический анализ.

Это объясняется двумя причинами:

– первое: важное место в рассматриваемых процессах занимают энергетические превращения, изучаемые на основании второго закона термодинамики;

– второе: действие данных процессов происходит в условиях взаимодействия с равновесной окружающей средой, параметры которой не зависят от действия системы. Однако эти параметры оказывают важное термодинамическое влияние на систему и энергии, которая преобразуется в работу, различают несколько видов эксэргии. При анализе эффективности котла целесообразно использовать понятия эксэргии потока вещества и химической эксэргии [2-4].

В отличие от баланса энергии, баланс эксэргии для любой установки может быть сведен лишь условно, если включить в число его составляющих эксэргию, потерянную в процессах преобразованиях

$$E_{\text{вх}} = E_{\text{вых}} + \sum E_{D_i},$$

где  $E_{\text{вх}}$  — суммарная эксэргия, поступающая в установку с потоками вещества и энергии;

$E_{\text{вых}}$  — суммарная эксэргия, уходящая из установки;

$E_{D_i}$  — сумма потерь эксэргии в установке.

Эксергетический расчет топчного устройства, состоящий из топки и камеры смешения, предназначенного для получения дымовых газов с температурой 300°C. Исходным сырьем для получения дымовых газов служат продукты сгорания Зиддинского угольного месторождения. В камере смешения продукты сгорания разбавляют воздухом ( $T_o = 293 \text{ K}$ , влагосодержание  $d = 0,01 \text{ кг/кг}$ ,  $p = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$ ). Расход воздуха составляет 46,7 м<sup>3</sup>/кг топлива [4].

Эксергетический баланс для топки определяется по формуле.

$$E_T = E_{\text{пс}} + \Delta E_{\text{ос}} + \Delta E \quad (1.1)$$

При расчете эксергитический баланс, КПД топки может составлять  $19859/22555 = 0,889$  или 88,9%.

По результатам сравнительной оценки составляющих теплового баланса работы твердотопливных водогрейных котлов малой мощности установкой подвижной колосниковой было установлено, что работа котла с переменным объемом топочного пространства при сжигание основные угольные месторождения Республики Таджикистан обеспечивает снижение расхода топлива до 15–20%.

Наибольшие затруднения у эксплуатационников вызывает решение проблемы сокращения выбросов в атмосферу оксидов азота (NOx), поскольку они содержатся в дымовых газах в любом интервале нагрузок котла от минимальных до максимальных значений [2, 4, 5].

В результате внедрения нового твердотопливных водогрейных котлов малой мощности установкой подвижной колосниковой решетки и технологии сжигания различных видах твердого топлива и режимах работы, стоимость вырабатываемой тепловой энергии существенно снижается.

Поэтому эксергитический КПД котла  $\eta_{ex}$  характеризует долю полезно использованной эксергии

$$\eta_{ex} = \frac{E_{исп}}{E_{затр}} = \frac{E_{ввых} - E_{тр}}{E_{вх} - E_{тр}} \quad (1.2)$$

где  $E_{затр}$ ,  $E_{исп}$  — соответственно затраченная и использованная эксергии;

$E_{тр}$  — транзитная эксергия, то есть эксергия, которая проходит от входа в установку до выхода из нее, не участвуя в процессах преобразования энергии. Для котла–утилизатора в данном случае к транзитной эксергии относятся эксергии потоков питательной воды  $E'_{пв}$  и воздуха  $E'_в$ , а также физическая эксергия потока отходящих газов сажевого производства. Рассчитаем эксергию продуктов сгорания каменного угля Зиддинского месторождения ( $Q_H^p = 22500$  кДж/кг), состав которого приведено в Таблице 1.

Таблица 1.

СОСТАВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ  
 ЗИДДИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

|                        | $V_0^0$ | $V_{CO_2}$ | $V_{N_2}$ | $V_{H_2O}$ | $V_{п.с}$ |
|------------------------|---------|------------|-----------|------------|-----------|
| $V$ м <sup>3</sup> /кг | 5,51    | 0,915      | 4,2       | 0,615      | 5,73      |

Таблица 2.

ЭКСЕРГИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

| Топливо             | $V_{п.с}^0$<br>м <sup>3</sup> /кг | Мольные доли |        |        | Влагосодер-<br>жание<br>$X_{ZO}, \text{кг/кг}$ | Хим. эксергия<br>пр. сгорания $e_{0 п.с}$ |
|---------------------|-----------------------------------|--------------|--------|--------|--|---|
|                     |                                   | $N_2$        | $CO_2$ | $H_2O$ |  |   |
| Зиддинский<br>уголь | 6,604                             | 0,788        | 0,1749 | 0,0984 | 0,0161   | 1046 кДж/кг                               |

Определим эксергию дымовых газов в смеси, полученную при разбавлении продуктов сгорания каменного угля (Таблица 1.) воздухом в количестве 44,7;  $p = p_0 = 9,8 \cdot 10^4$  Па,  $T_0 = 293$  К,  $W_0 = 0,01$  кг/кг до температуры смеси  $t_{см} = 573$  К.

Таблица 3.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

| Вещество         | $V_i$ м <sup>3</sup> /кг. т | $N_i$ ,<br>Кмоль / м <sup>3</sup><br>топл. | $h$<br>кДж/кмоль | $h_0$<br>кДж/кмоль | $\Delta h$<br>кДж/кмоль | $N_i \Delta h$<br>кмоль/кг. т | $S_i$<br>кДж/(кмоль · К) |
|------------------|-----------------------------|--|------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 0,915                       | 0,0408                                     | 12520            | 762                | 11750                   | 479                           | 30,45                    |
| N <sub>2</sub>   | 57,18                       | 2,552                                      | 8790             | 580                | 8210                    | 20952                         | 21,65                    |
| O <sub>2</sub>   | 15,19                       | 0,678                                      | 9100             | 591                | 8509                    | 5769                          | 22,25                    |
| H <sub>2</sub> O | 1,77                        | 0,079                                      | 10350            | 675                | 9675                    | 818                           | 25,6                     |
| Всего            | 78,68                       | 3,512                                      |                  |                    |                         | 28018                         |                          |

Таблица 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОВОДИЛОСЬ С ТВЕРДОТОПЛИВНЫМ ОТОПИТЕЛЬНЫМ ВОДОГРЕЙНЫМ КОТЛОМ СО СЛЕДУЮЩИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТОПКИ

| Поверхность пода      | Боковая поверхность   | Поверхность потолка   | Внутренняя поверхность центральной газоотводящей трубы | Поверхность потолка газоотводящей трубы | Объем топочного пространства                 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|---|--|
| 0,2826 м <sup>2</sup> | 0,7536 м <sup>2</sup> | 0,2703 м <sup>2</sup> | 0.314 м <sup>2</sup>                                   | 1,2265 м <sup>2</sup>                   | 1,228525 · 10 <sup>-1</sup> м <sup>3</sup> . |

Массовый расход продуктов горения при сжигании 1 кг топлива твердого топлива определяется зависимостью

$$G_0 = 1 - \frac{A^p}{100} + 1,306 \cdot \alpha V^0 \quad (1.3)$$

для В кг топлива

$$G = B \cdot G_0 = B \left[ 1 - \frac{A^p}{100} + 1,306 \cdot \alpha V^0 \right] = f(B, \alpha, V^0)$$

$$\text{или} \quad t(x) = t_0 + \exp\left[-\frac{k p d_{г.гр.н}}{c f(B, \alpha, V^0)} x\right] \quad (1.4)$$

В процессе энергетический и эксергетический анализ эффективности эксплуатации твердотопливных водогрейных котлов малой мощности установкой подвижной колосниковой решетки было установлено, что с переменным объемом топочного пространства способствует снижению расхода топлива, а также способствует дожиганию летучих газов и несгоревших пылевидных фракций угля.

Полученные в результате исследования данные можно использовать для создания комплексной автоматизированной системы управления режимами работы котла за счет регулирования объема топочного пространства, подачи воздуха и удаления продуктов сгорания в зависимости от свойств и количества сжигаемого топлива.

В результате исследование получили, что значение эксергетического КПД равно 88,9%. Результаты определены потери теплоты с уходящими газами, они составили 8,76%; Потери

тепла с механическим недожогом составили 17,37%; Получена расчетная зависимость для определения КПД котельного агрегата от производительности. КПД данного котельного агрегата составил 79–81%.

Таким образом, правильно спроектированная и хорошо работающая топка обеспечивает минимальный коэффициент избытка воздуха при полном сгорании топлива и максимальный коэффициент прямой отдачи тепла в объеме топочной камеры [2, 4, 5].

Таким образом, проводимый термодинамический анализ позволяет подробно и разносторонне исследовать энергетические превращения как в самой системе и ее частях, так и ее взаимодействии с окружающей средой [4]. Результаты анализа тепловых процессов всегда выражаются в виде баланса.

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие выводы:

1. Обоснована максимальная эффективность работы при наличии изменением топочного пространство, при сжигание различных месторождение угля которой оказывает положительное влияние на условия сжигания различных характеристики твердых топлив.

2. Показано, что конструкция водогрейного котла с подвижной колосниковой решеткой, позволяющей регулировать объем топочного пространства обеспечивает снижение коэффициента избытка воздуха в уходящих газов за котлом, а также снижение уровня содержания кислорода ( $O_2$ ).

3. Уменьшение и увеличение объем топочного пространства способствует поддержанию необходимого рационального температурного режима в топочном пространстве, что приводит к сокращению выбросов оксидов азота на 20–25%.

Экономический эффект от внедрения в результате установки разработанной конструкции водогрейного котла мощностью 50 кВт установленного в здании интерната по отношению к ранее установленным существующим котлам идентичной мощности составила около 14400 сомон (22450) за один отопительный сезон. При этом стоимость единицы тепловой энергии понизилась на 15%.

#### Список литературы:

1. Хужаев П. С., Назаров С. М. Характеристики углей некоторых месторождений республики Таджикистан // Материалы международной научно-практической конференции «Архитектурное образование и архитектура Таджикистана: 50 лет развития и совершенствования». Душанбе, 2013. С. 194-199.
2. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод) / под ред. Г. М. Каган. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
3. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел Ф. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
4. Юдаев Б. Н. Теплопередача М.: Высшая школа, 1973, 360 с.
5. Ривкин С. Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. 2-е изд., перераб., и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984, 80 с.

#### References:

1. Khuzhaev, P. S., & Nazarov, S. M. (2013). Kharakteristiki uglei nekotorykh mestorozhdenii respubliky Tadjhikistan. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Arkhitekturnoe obrazovanie i arkhitektura Tadjhikistana: 50 let razvitiya i sovershenstvovaniya"*. Dushanbe, 194-199
2. Kagan, G. M. (ed.). (1998). *Teplovoi raschet kotlov (Normativnyi metod)*. 3-e izd., pererab. i dop. St. Petersburg, NPO TsKTI, 256

3. Isachenko, V. P., Osipova, V. A., & Sukomel, F. S. (1981). *Teploperedacha*. Moscow, Energoizdat, 416.
4. Yudaev, B. N. (1973). *Teploperedacha*. Moscow, Vysshaya shkola, 360
5. Rivkin, S. L., & Aleksandrov, A. A. (1984). *Termodinamicheskie svoistva vody i vodyanogo para*. Spravochnik. 2-e izd., pererab., i dop. Moscow, Energoatomizdat, 80.

*Работа поступила  
в редакцию 19.04.2017 г.*

*Принята к публикации  
23.04.2017 г.*

---

*Ссылка для цитирования:*

Хужаев П. С., Сулейманов А. А., Сайвалиев Ф. Р., Рахмонзода Т. Р. Энергетический и эксергетический анализ эффективности твердотопливных водогрейных котлов малой мощности с переменным объемом топки при сжигании различных видов угля // Бюллетень науки и практики. Электрон. журн. 2017. №5 (18). С. 106-111. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/khujaev-suleymanov> (дата обращения 15.05.2017).

*Cite as (APA):*

Khujaev, P., Suleymanov, A., Sayvaliev, F., & Rakhmonzoda, T. (2017). Energy and exergistic analysis of the efficiency of solid-fuel water-heating boilers of small power with the mobile column screen installation. *Bulletin of Science and Practice*, (5), 106-111