



CONTROL COMBUSTION PROCESS IN SMALL AND MEDIUM POWER BOILERS USING OXYGEN SENSORS

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В КОТЛОАГРЕГАТАХ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕНСОРОВ КИСЛОРОДА

член-корр. НАН Украины, проф., д.т.н. Бабак В.П.¹; научный сотрудник, к.т.н. Запорожец А.А.¹;
 доцент, к.т.н. Пономаренко А.В.²

¹Институт технической теплофизики НАН Украины – Киев, Украина

²Промышленно-экономический колледж Национального авиационного университета – Киев, Украина

art.morco@gmail.com

Abstract: Boiler's technical condition which are using in communal and industrial power engineering is being analyzed. The method of improving the accuracy of the excess air ratio which based on present level of oxygen's concentration in the air is offered. The structure of fuel combustion monitoring and directing system is developed. The structure based on fluent speed regulation of ventilator 's engine on signals of oxygen sensors in the exhaust gases are elaborated. The results of experimental research of developed system based on boiler NIISTU-5 are showed.

Keywords: combustion process, control, boilers, optimization system, oxygen sensor

1. Введение

Структура потребления энергоресурсов в секторах экономики Украины показывает, что около 40% котельно-печного топлива направляется в сферу теплообеспечения, и именно в ней находится основной потенциал энергосбережения. Однако эта важная сфера ЖКХ находится в неудовлетворительном состоянии и требует немедленных преобразований. Необходимость этих изменений обусловлена значительным негативным влиянием предприятий теплообеспечения на окружающую среду.

По данным Минрегионстроя и ЖКХ в Украине насчитывается более 6000 единиц котельных установок теплопроизводительностью 1 Гкал/ч с КПД около 70%, что требуют замены и модернизации, 40% котлов эксплуатируются с КПД ниже 82%, около 11000 котлов мощностью от 100 кВт до 1 МВт находятся в эксплуатации более 20 лет, срок эксплуатации 57% котельных установок превышает 20 лет [1]. Среди них значительное количество котлов НИИСТУ-5, «Универсал», «Минск» и т.д. [1,2] (рис. 1).

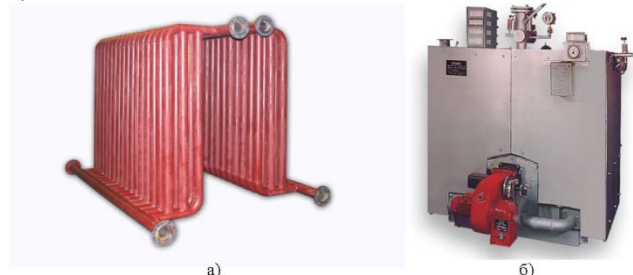


Рис. 1. Наиболее распространенные котлоагрегаты: а) НИИСТУ-5; б) Универсал-5М

Сводная характеристика котлоагрегатов, широко использованных в сфере коммунальной теплоэнергетики Украины, представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика котлоагрегатов малой мощности, используемых в коммунальной сфере

Тип котла	Теплопроизводительность, МВт/ч	Значение КПД, %	
		Природный газ	Жидкое топливо
НИИСТУ-5	0,35-0,80	90	–
Универсал-6	0,35-0,75	87	–
Виктор-100	0,12	93	93
УСП-1-14	0,63	–	85
Е-0,1-0,9	0,63	89	85
КПО	0,06-0,35	91	91
Колви-90	0,10	93	92

На сегодняшний день в большинстве котельных ситуация такова, что в отопительный сезон котлоагрегаты работают все время на полную мощность, а оператор котельной вручную, при помощи шиберов, регулирует подачу воздуха. При этом реальный КПД рабочего котельного агрегата не соответствует заявленным техническим характеристикам.

На практике по данным Госкомстата реальный КПД котлоагрегатов малой и средней мощности находится в пределах 70-80%, при этом их тепловая мощность не превышает 1 МВт (рис. 2.). Хотя доля этих котлов в системе Теплокомунэнерго не превышает 14%, прогнозируемая экономия природного топлива в котлах мощностью до 3,5 МВт составляет 130 млн. м³/год, в то время котлами мощностью до 25 МВт – 152 млн м³/год, а котлами до 100 МВт – только 57 млн м³/год [3]. Представленные данные свидетельствуют о реальной необходимости повышения эффективности и надежности функционирования оборудования в сфере коммунальной теплоэнергетики.

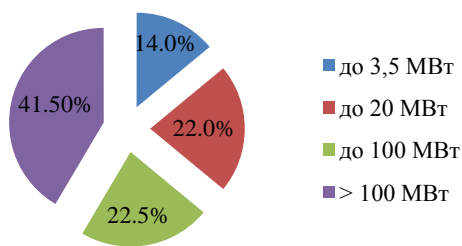


Рис. 2. Соотношение котлов различной тепловой мощности в сфере коммунальной энергетики Украины

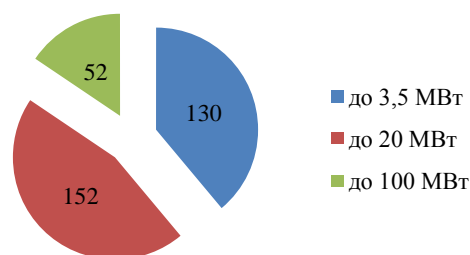


Рис. 3. Потенциал экономии природного газа в котлах различной мощности в сфере коммунальной энергетики Украины (млн. м³/год)

Пути выхода коммунальной теплоэнергетики Украины из кризисного состояния являются:

- демонтаж устаревшего оборудования и ввод в эксплуатацию новых, преимущественно импортных котлоагрегатов;
- комплексная модернизация существующего оборудования.

Первый вариант маловероятен, поскольку требует значительных единовременных финансовых инвестиций. Оптимальным решением данной проблемы является комплексная модернизация существующих котлоагрегатов на базе малозатратных и быстрокупаемых средств (до 2 лет). Ряд технологий позволяет достичь значительного результата при достаточно малом капиталовложении за счет автоматизации управления процессом сжигания.

2. Анализ источников и постановка проблемы

Приблизить работу котлоагрегата к наиболее рациональным режимам функционирования можно с помощью газоанализирующих устройств или систем автоматического управления процессом сжигания [1]. Большинство из последних базируются на применении комбинированного метода информирования о содержании остаточного кислорода и продуктов неполного сжигания с перекрестным ограничением, что позволяет более точно (по сравнению с параллельным управлением) поддерживать соотношение «воздух-топливо» [4]. Такие системы снижают содержание кислорода в отходящих газах до тех пор, пока в них не появляется монооксид углерода (оптимальным является уровень в пределах от 50 до 200 ppm). Появление CO в отходящих газах свидетельствует об образовании локальных зон в топке котла с химическим недожогом топлива. К недостаткам таких систем можно отнести: наличие систем отбора и подготовки пробы, что значительно увеличивает время измерения; отсутствие частотного регулирования вентиляторов и дымососов, что затрудняет поддержание оптимального режима сжигания топлива; длительное время инсталляции системы; по сравнению значительный срок окупаемости; назначение исключительно для котлоагрегатов большой мощности [5-7].

Таким образом, актуальным является разработка систем управления сжиганием топлива для котлоагрегатов малой и средней мощности.

3. Цель и задачи исследования

Проведенные исследования имели целью разработать компьютеризированную систему контроля качества сжигания топлива в котлах малой и средней мощности на базе сенсоров кислорода, что позволит повысить энергетическую эффективность котлоагрегатов и снизить уровень вредных выбросов в атмосферу.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- разработать метод повышения точности измерения коэффициента избытка воздуха как информативного параметра процесса сжигания топлива;
- разработать алгоритмы и программное обеспечение системы для достижения необходимого быстродействия и достоверности контроля и управления процессом сжигания топлива на основе измерения концентрации кислорода в выходных газах и ступенчатой коррекции состава воздушно-топливной смеси (ВТС);
- создать опытный образец системы процесса сжигания топлива, провести его экспериментальные исследования.

4. Результаты исследований

К конструированию и применению горелочных устройств, работающих на жидком и газообразном топливе, выдвигается ряд требований, среди которых компактность и удобство в эксплуатации, долгий срок эксплуатации и сравнительно низкая стоимость. Но одним из важнейших требований является необходимость обеспечения полного и надежного сжигания топлива с минимальным избытком воздуха, т.е. горелочные устройства должны обеспечить формирование стехиометрической ВТС. На рис. 4 приведены факторы, влияющие на процесс сжигания топлива [8].

Для определения эффективности и экономичности сжигания топлива используют коэффициент избытка воздуха



Рис. 4. Факторы влияния на процесс сжигания топлива

(КИВ, α), величина которого на практике определяется согласно соотношения:

$$(1) \alpha = \frac{21}{21 - [O_2]}$$

где 21 – «традиционное» содержание кислорода в воздухе, %; $[O_2]$ – содержание кислорода в продуктах сжигания топлива, %.

В работах [9,10] показано, что метеорологические параметры окружающей среды влияют на концентрацию кислорода в воздухе, что приводит к постоянным изменениям данной величины. Аналитическая зависимость объемной концентрации кислорода в воздухе от метеорологических параметров окружающей среды, получена на основе анализа основных газовых законов и

уравнения Клайперона-Менделеева, выражена соотношением:

$$(2) [O_2^{ок}] (P, T, \varphi) = 20,957 \cdot \left(1 - \frac{e(P, T, \varphi)}{P} \right),$$

где $[O_2^{ок}]$ – концентрация кислорода в воздухе, %; P – атмосферное давление, гПа; T – температура воздуха в градусах Цельсия, °C; φ – влажность воздуха, %; e – парциальное давление водяного пара, гПа.

Так как была доказана сезонная/суточная изменчивость концентрации кислорода в воздухе, в ходе исследований предложено усовершенствование стандартного метода измерения КИВ путем учета концентрации кислорода в окружающей среде по нижеприведенному соотношению:

$$(3) \alpha = \frac{[O_2^{ок}]}{[O_2^{ок}] - O_2}$$

Технические способы реализации учета текущей концентрации кислорода в воздухе представлены на рис. 5., где 1 – выходные газы, 2 – внутренний кислородный сенсор, 3 – аналитический блок, 4 – дисплей, 5 – внешний кислородный сенсор.

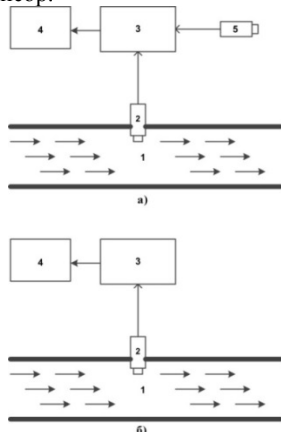


Рис. 5. Технические способы реализации повышения точности определения КИВ (а – с использованием двух кислородных сенсоров, б – с использованием одного кислородного сенсора)

Алгоритм работы системы автоматического управления процессом сжигания топлива в котлоагрегатах путем регулирования соотношения ВТС для горелки с обратной связью по сигналам сенсора кислорода изображен на рис. 6.

Особенностью алгоритма является применение частотного регулирования, при помощи которого плавно изменяется количество воздуха, подаваемого в зону сжигания. С помощью сенсора измеряется концентрация кислорода в выходных газах и система обрабатывает полученную информацию. В зависимости от полученного значения КИВ формируется сигнал управления – уменьшается или увеличивается частота вращения вентилятора на 0,1 Гц (при $\alpha > X$ или $\alpha < X$ соответственно, где X – измеренное значение КИВ). После установления стационарного режима работы вентилятора повторно проводится опрос системы.

Зависимость частоты вращения дутьевого вентилятора от КИВ определяется системой уравнений:

$$(4) f(\alpha) = \begin{cases} f_0 - \Delta f \text{ при } X > \alpha; \\ f_0 & \text{при } X = \alpha; \\ f_0 + \Delta f \text{ при } X < \alpha, \end{cases}$$

где f_0 – рабочая частота вращения дутьевого вентилятора, Δf – шаг изменения частоты вращения, X – текущее значение КИВ, α_0 – рабочее значение КИВ.

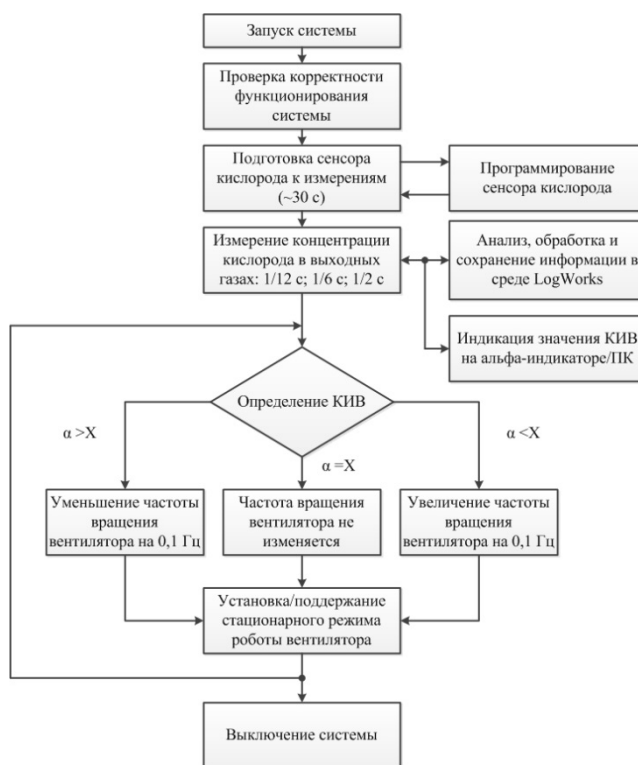


Рис. 6. Алгоритм функционирования разработанной системы на базе частотного регулирования

Особенности разработанной системы позволяют использовать ее в системе автоматического управления процессом сжигания топлива в котлоагрегатах малой и средней мощности. На рис. 7 приведена структурная схема функционирования такой системы.

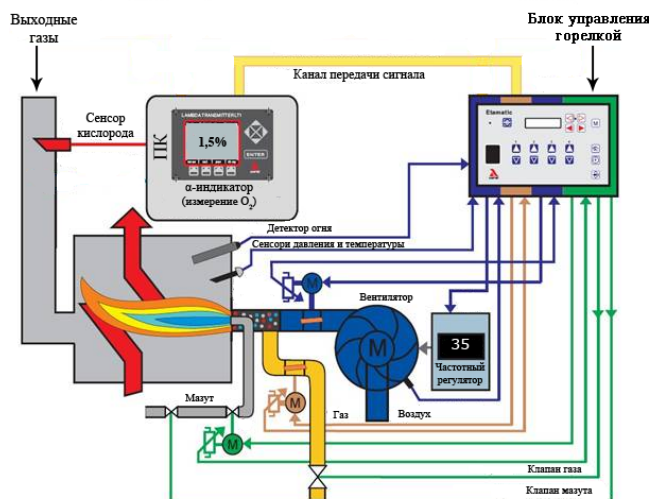


Рис. 7. Структурная схема системы автоматического управления процессом сжигания топлива в котлоагрегатах малой и средней мощности на базе сенсора кислорода

Основным назначением системы управления является регулирование скорости привода электродвигателя вентилятора, так чтобы в топке котла поддерживать оптимальный режим сжигания, т.е. обеспечить наиболее благоприятные условия для полного сжигания топлива. Для этого система на основе информации полученной от своих первичных сенсоров (концентрации кислорода,

температуры и разрежения) подает в топку необходимое количество воздуха. Применение предложенной системы автоматического управления позволит поддерживать энергосберегающую работу котлоагрегаты на высоком уровне, достигая ~95% КПД.

Для функционирования системы на базе LogWorks адаптировано программное обеспечение, что позволяет обеспечить 2 основных режима работы:

- 1) получение информации в режиме реального времени с измерительного канала (время измерения – 0,1-0,2 с) и ее визуализация (рис. 8);
- 2) накопление измерительной информации, в том числе в облачных хранилищах, для ее дальнейшей обработки после проведения контроля.

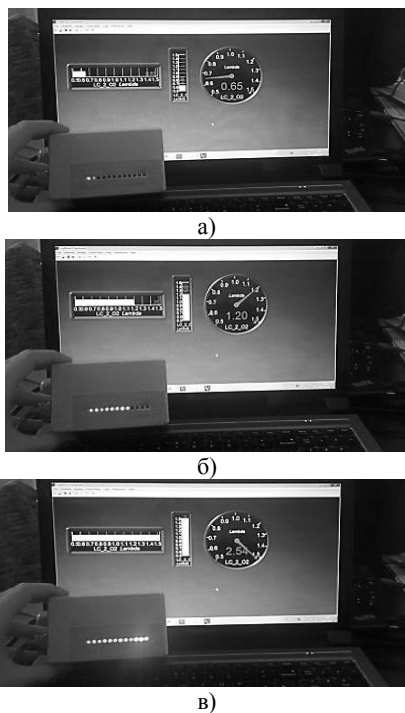


Рис. 8. Визуализация взаимодействия программного комплекса системы с α -индикатором при различных режимах работы котлоагрегата: а) обогащенная смесь; б) смесь, близкая к стехиометрической; в) обедненная смесь

В состав программного обеспечения входят блоки: регистрации, сбора и накопления измерений; предварительной обработки и передачи информационных сигналов и результатов вычислений; управления.

Разработанное программное обеспечение используется в блоке контроля [11], который входит в систему контроля и управления процессом сжигания топлива, но также может использоваться в качестве самостоятельного газоанализирующего устройства. Его внешний вид представлена рис. 9, а технические характеристики – табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики блока контроля процесса сжигания топлива

Выходной сигнал измерительного сенсора, В	+0,1...5,0
Отклик (задержка по времени индикации) для 50% ступенчатого возмущения, с	0,1...0,3
Начальное время подготовки к измерениям, с	≤30,0
Диапазон измерений параметра α	0,5...8
Относительная погрешность, %	2
Индикация результатов измерений	светодиодная

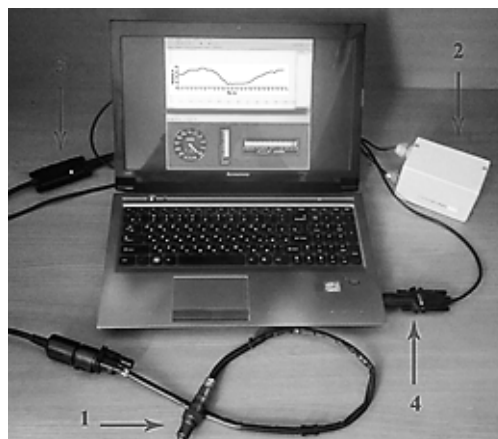


Рис. 9. Фото блока контроля процесса сжигания топлива: 1 – сенсор кислорода; 2 – α -индикатор; 3 – контроллер; 4 – USB-интерфейс

Исследования разработанной системы автоматического контроля и управления сжиганием топлива проводились на базе водогрейного котла НИИСТУ-5.

Для повышения эффективности работы данного котла был выделен основной подход – модернизация топочного пространства котла с полной заменой морального и физически устаревших горелки и автоматики. Замена проводилась на базе автоматизированного блока горелки ГБГМ-0,85 НД (рис. 10), оснащенного разработанной системой автоматического управления и контроля процесса сжигания.



Рис. 10. Котлоагрегат НИИСТУ-5 после модернизации горелкой ГБГМ-0,85 НД с инсталлированной системой

Для проверки эффективности работы системы проводились режимные испытания при оптимальном значении КИВ в выходных газах. Для обеспечения процесса полного сжигания топлива КИВ в отходящих газах устанавливался на уровне 1,2. Данный показатель был определен на основе экспериментальных исследований, и соответствует минимальному значению [CO] в выходных газах. При этом проводились исследования возможности обеспечения полного сжигания топлива при различных режимах нагрузки котлоагрегата в пределах от 10% до 100%. КПД котлоагрегата определялся по обратному балансу:

$$(5) \eta = 100 - q_2 - q_3 - q_5,$$

где η – КПД котлоагрегата, %; q_2 – тепловые потери с выходными газами, %; q_3 – тепловые потери от химического недожога, %; q_5 – тепловые потери от поверхностей нагрева, %. Так как котлоагрегат на протяжении экспериментальных исследований функционировал с незначительным уровнем CO в

выходных газах, можно считать, что $q_2 \approx 0$. Измерение q_5 требует привлечение дополнительного тепловизионного оборудования, поэтому данная величина не учитывалась при расчете КПД.

В ходе эксперимента показано, что максимальный КПД котлоагрегата $\sim 97,4\%$ достигается на уровне 10% от максимальной мощности. Его величина уменьшается линейно и является минимальной (КПД $\sim 92,4\%$) при максимальной мощности котлоагрегата. При этом наблюдались незначительные отклонения от линейного спада в диапазоне 0,2-0,3 Гкад/ч, что связано с увеличением скорости роста температуры выходных газов.

Рост тепловых потерь с выходными газами также носит линейный характер, при этом их минимальное значение устанавливалось на уровне 2,6% при 10%, а максимальное – 7,6% при 100% мощности котлоагрегата. На рис. 11 приведено показательное сравнение зависимости КПД котлоагрегата от его мощности при функционировании по режимной карте и при использовании разработанной системы.

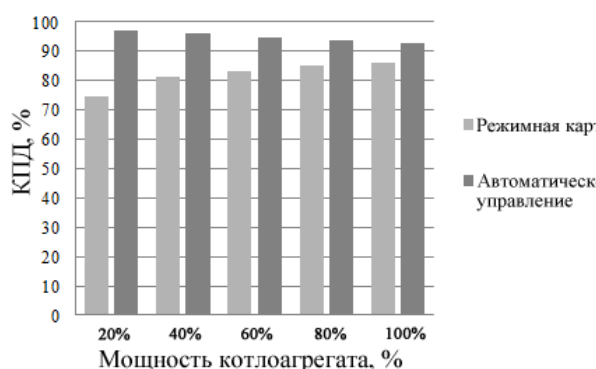


Рис. 11. КПД котлоагрегата НИИСТУ-5 при функционировании на режимной карте и с помощью автоматического управления

Использование системы автоматического управления процессом сжигания топлива позволяет повысить КПД котлоагрегата при любых нагрузках котла. При этом максимальная разница КПД возникает при нагрузке котла на уровне 20% – $\Delta\eta_{\max}=22,1\%$, минимальная разница КПД наблюдается при максимальной нагрузке котла – $\Delta\eta_{\min}=6,5\%$.

5. Заключение

В ходе проведенных исследований разработан метод повышенной точности определения КИВ, который базируется на учете изменения метеорологических параметров окружающей среды: температуры, абсолютного давления и относительной влажности. Его применение позволяет исключить методическую погрешность традиционных измерений и повысить точность определения КИВ до 2%.

Предложена структура системы управления и контроля процесса сжигания топлива, основанная на применении сенсора кислорода и частотно регулируемого электропривода дутьевого вентилятора. Данная система позволяет обеспечить эффективное сжигание топливных ресурсов в котлоагрегате путем поддержания стехиометрической ВТС.

На базе сенсора кислорода создана портативная система контроля процесса сжигания топлива в котлоагрегатах. Особенностью системы является широкий диапазон измерения КИВ, быстрое измерение концентрации

кислорода, отсутствие системы отбора и подготовки пробы, сравнительно низкая стоимость.

Для системы управления процессом сжигания топлива разработаны алгоритмы, обеспечивающие возможность образования стехиометрической смеси «воздух-топливо» для различных типов газообразных и жидких топлив.

Адаптировано программное обеспечение системы контроля и управления процессом сжигания топлива, что позволяет быстро и точно устанавливать текущие режимы работы котлоагрегата.

На базе горелки типа ГБГМ с установленной системой контроля и управления процессом сжигания топлива проведены пуско-наладочные работы и эксплуатационные испытания котлоагрегата НИИСТУ-5. Полученные результаты свидетельствуют о возможности высокоэффективного использования устаревших котлоагрегатов путем замены горелочного устройства с разработанной системой. Применение системы процесса сжигания топлива позволяет поддерживать номинальный КПД котлоагрегата при любых режимах его функционирования путем уменьшения потерь теплоты с выходными газами.

6. Литература

1. Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії: Монографія / В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Березун та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / - К., Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2016. – 352 с.
2. Долінський А. А. Енергозбереження та екологічні проблеми енергетики / А.А. Долінський – Вісник НАН України. – 2006. – №2. – С. 24-32.
3. Демченко В. Г. Интенсификация теплообмена в топках водогрейных котлов / В. Г. Демченко. – Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2012. – 236 с.
4. Шкаровский А. Л. Энергоэкологические принципы управления процессом сжигания топлива / А.Л. Шкаровский, О.Н. Новиков, А.Н. Окадьев // Датчики и системы. – 2002. – №10. – С. 41-44.
5. Chen K. Effect of separated over-fire air on combustion performance of a 3MW pilot-scale facility / K. Chen, J. Zhang, D. Che // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 108. – P. 30-40.
6. Edge P. J. A reduced order full plant model for oxyfuel combustion / P.J. Edge, P.J. Heggs, M. Pourkashanian, P.L. Stephenson, A. Williams // Fuel. – 2012. – Vol. 101. – P. 234-243.
7. Hong R. Emission characteristics of CO and NOx from opposed firing boiler in a 600 MW supercritical unit / R. Hong, Y. Shen, Z. Zhao // Dongli Gongcheng Xuebao/Journal of Chinese Society of Power Engineering. – 2012. – Vol. 32. – P. 922-927.
8. Li Z. Numerical simulation of bituminous coal combustion in a fullscale tiny-oil ignition burner. Influence of excess air ratio / Z. Li, C. Liu, X. Zhang, L. Zeng, Z. Zhen // Frontiers in Energy. – 2012. – Vol. 6. – P. 296-303.
9. Бабак В. П. Экспериментальные исследования изменения объемной концентрации кислорода в воздухе и его влияние на процесс горения / В.П. Бабак, А.А. Запорожец, А.А. Редько // Научные известия НТСМ. – 2016. – № 1. – Т. 187. – С. 81-84.
10. Методика расчета количества кислорода в атмосферном воздухе на основе метеорологических параметров с целью прогнозирования метеопатических эффектов атмосферы [Текст]: (метод, рекомендации) / Гл. упр. лечеб.-профілактич. пом. сост. В. Ф. Овчарова. – М.: МЗ СССР. – 1983. – 13 с.
11. Бабак В. П. Система якості горіння повітряно-паливної суміші в котлоагрегатах малої та середньої потужності / В.П. Бабак, А.О. Запорожець // Методи та прилади контролю якості. – 2014. – №2(33). – С. 106-114.