

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ
УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ В ТОПЛИВНЫХ ПЕЧАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
РЕКУПЕРАТОРОВ**

Часть 1

**Докт. техн. наук, проф. СОРОКА Б. С., асп. ВОРОБЬЕВ Н. В.,
канд. техн. наук ЗГУРСКИЙ В. А.**

Институт газа НАН Украины

Современные подходы к оценке состояния проблемы. Методы повышения эффективности использования топлива в печах. Из числа основных топливоиспользующих агрегатов промышленности и энергетики – котлов и печей – первые (котлоагрегаты и парогенераторы) отличаются высокой эффективностью использования топлива (КПД, как правило, выше 90 %, а в случае котлов с конденсацией – выше 100 % по низшей теплоте сгорания Q_n^p [1–3]), вторые (промышленные печи) обычно характеризуются существенно более низким КПД [4]. Анализ современного состояния проблемы использования топлива в нагревательных печах приведен в [5], где рассмотрены основные пути экономии топлива в тепло-технологических агрегатах. Состояние проблемы использования топлива в печах для нагрева и термообработки металла, а также отдельные направления улучшения ее состояния (по данным промышленности Беларуси) обобщены в [6].

В статье Б. С. Сороки [5] (по данным ведущих зарубежных компаний) критически проанализированы современные способы сжигания топлива, которые направлены на совершенствование систем отопления, экономию топлива, сокращение времени обработки черных и цветных металлов и реализуются путем увеличения потенциала топливо-окислительной смеси при высокотемпературном подогреве и/или обогащении воздуха-окислителя кислородом. Современные тенденции заключаются в объединении в одном аппарате горелочных и теплообменных устройств и разработке на этой основе рекуперативных [7–9] (рис. 1) и регенеративных горелок [10, 11] (рис. 2), а также радиационных труб с такими устройствами. В рамках высокоэффективной технологии сжигания топлива с использованием в качестве окислителя кислорода или воздуха, обогащенного O_2 [12], широкое признание получают DFI (DirectFlameImpingement) – технологии, обеспечивающие повышение эффективности Оху-fuel систем сжигания, а также FLOX – метод сжигания топлив различного состава, изначально получивший распространение в связи с экологическими преимуществами, а затем и благодаря теплотехническим достоинствам метода.

Последние годы характеризуются тенденцией углубленной утилизации теплоты продуктов сгорания не только в котлах и парогенераторах, но и в промышленных печах.

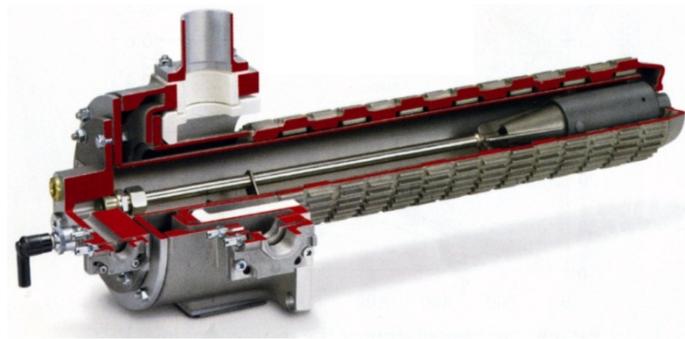


Рис. 1. Рекуперативная горелка фирмы ECOMAX® [13]

а б

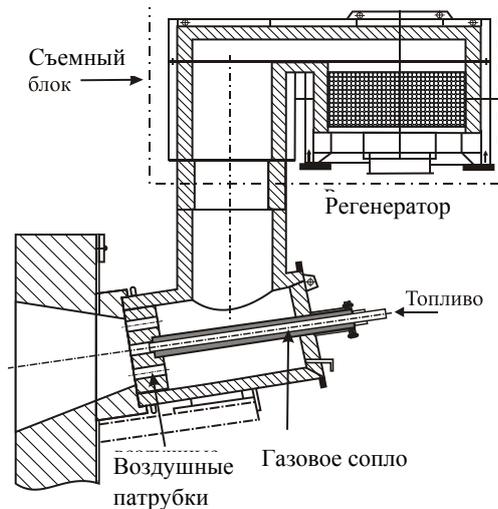


Рис. 2. Регенеративная горелка фирмы BLOOM[10]: а – установка горелки на термической печи; б – принципиальная схема регенеративной горелки

Расчеты эффективности топливоиспользующих агрегатов – определение КПД использования топлива η_f и теплоты η_H – проводятся по аналогии с теоремой Карно для «идеальной печи» [4]. В соответствии с теоремой Карно коэффициент полезного действия обратимого теплового двигателя [13] – функция температур горячего и холодного резервуаров (источников)

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - f(T_2, T_1) = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (1)$$

где T_1 и T_2 – абсолютные температуры горячего и холодного резервуаров.

Коэффициент полезного действия, равный 1, определяет абсолютный нуль рассматриваемой шкалы температур.

Наш подход распространяется на случай химически реагирующего (горячего теплоносителя – продуктов сгорания), а КПД в нашем случае рассматривается как КПД использования топлива и теплоты

$$\eta_H = 1 - \frac{\Delta I_{fl,ex}^a}{\Delta I_{fl,T}^a}. \quad (2)$$

В качестве базового параметра для «горячего» источника рассматривается избыточная полная энтальпия 1 кг продуктов сгорания $\Delta I_{fl,T}^a$ при теоретической температуре горения топливо-окислительной смеси $T_{fl,T} = T_T$; в качестве параметра, характеризующего «холодный источник» (приемник), – избыточная полная энтальпия продуктов сгорания в печи $\Delta I_{fl,ex}^a$ при технологической температуре – температуре продуктов на выходе из печи $T_{fl,ex}$.

Если в современных котлах утилизация теплоты углубляется за счет использования конденсации теплоты продуктов сгорания (понижение потенциала холодного источника в цикле Карно [13]), то для промышленных печей рост энергетического КПД обеспечивается повышением температурного уровня теплоносителя (продуктов сгорания) путем поднятия потенциала горячего источника в цикле Карно.

Оценка подогрева теплоносителя и возможностей утилизации теплоты уходящих из печи продуктов сгорания путем подогрева компонентов горения, чаще всего – воздуха-окислителя, выполняется с использованием энтальпийного анализа по предложенным методам [14–16]. С этой целью была разработана оригинальная компьютерная программа определения составов и свойств равновесных продуктов сгорания FUEL под руководством проф. Б. С. Сороки с использованием подходов, развитых в Институте газа НАНУ еще в 60-е годы прошлого века [17]. За прошедшие годы программа была переработана, насыщена исходными термодинамическими свойствами многих десятков индивидуальных веществ в системе элементов: С, Н, О, N, S – для расчета сжигания минеральных топлив (fossilfuels).

Несмотря на высокую точность современных методов и расчетно-компьютерной базы термодинамического анализа эффективности использования топлива при различных способах повышения потенциала топливо-окислительной смеси (подогрев и минимизация избытка окислителя, обогащение воздуха кислородом, добавки к горючей части компонентов с высокой теплотой сгорания), соответствующий подход с использованием представлений о полной энтальпии веществ как характеристики, учитывающей и физическую, и химическую составляющие (учет теплоты образования компонент из базовых элементов), не имеет достаточного распространения среди специалистов, занятых в промышленной теплоэнергетике и печной теплотехнике.

В результате до последнего времени как в отечественных работах [18], так и в зарубежной литературе [19] вместо фундаментальной характеристики топливо-окислительной смеси – теоретической (адиабатной) температуры горения T_T , учитывающей протекание реакций диссоциации-рекомбинации для продуктов сгорания, используются понятия об оценочной «калориметрической» температуре горения T_C .

При этом T_C линейно связывают с подогревом компонентов горения [18, 19], прежде всего воздуха-окислителя T_a , в то время как отклонение от такой зависимости для T_T тем сильнее, чем выше T_a :

$$T_C = T_{C,0} + \gamma T_a; \quad (3)$$

$$(T_T - T_{T,0}) < (T_C - T_{C,0}), \quad (4)$$

где $\gamma \approx \text{const}$; индекс «0» при $T_{C,0}$ и $T_{T,0}$ относится к температурам горения холодных горючих смесей: $T_{a,0} = 298 \text{ K}$.

Из (4) получим общую зависимость:

$$T_T < T_C. \quad (5)$$

Любые расчеты экономии топлива и определения свойств продуктов сгорания, связанные с использованием значения T_C вместо T_T , являются ошибочными и в лучшем случае могут служить в качестве ориентировочных оценок.

Возрастание T_T топливо-окислительной смеси фиксированного состава достигается предварительным подогревом окислителя, обычно воздуха горения, а в случае низкокалорийных газовых топлив – подогрева обоих компонентов горения: воздуха и газа.

Зависимости теоретической температуры горения T_T от подогрева компонентов топливо-воздушной смеси представлены на рис. 3.

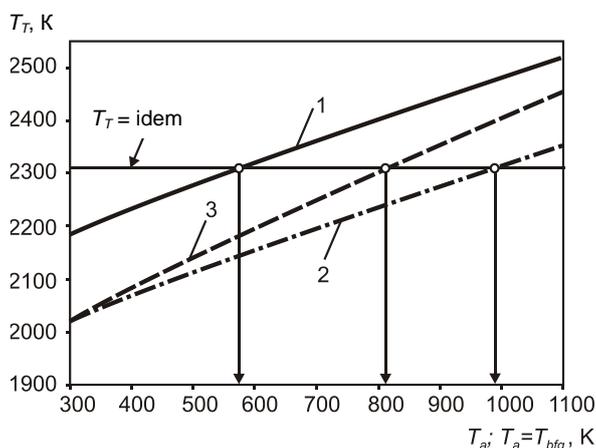


Рис. 3. Зависимость теоретической температуры горения T_T горючих газов с воздухом-окислителем от температуры подогрева компонентов горения. Кривые: 1 – природный газ, подогрев воздуха-окислителя до температуры T_a ; 2 – горючий газ: 70 % доменного газа + 30 % природного газа, подогрев только воздуха до T_a ; 3 – горючий газ: 70 % доменного газа + 30 % природного газа, подогрев обоих компонентов горения: воздуха – до T_a ; газа – до $T_a = T_{bfg}$. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,05$

Здесь сопоставлены значения T_T при сжигании природного газа и природно-доменной смеси с воздухом-окислителем. Для природного газа оценивается влияние подогрева воздуха, для доменного – рассматриваются два варианта: подогрев только воздуха и подогрев обоих компонентов горения: как воздуха, так и горючей смеси, состоящей из 70 % (об.) доменного газа и 30 % (об.) природного газа. Состав доменного газа, используемый при смешении с природным газом, следующий, % (об.): $[\text{CO}] = 20$; $[\text{H}_2] = 2$; $[\text{CO}_2] = 24$; $[\text{N}_2] = 54$. Природный газ рассматривается состоящим из метана $[\text{CH}_4] = 100 \%$.

Очевидно, что для случая природного газа с высоким стехиометрическим числом (объемным $L_{st} = 9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$; массовым $\Omega_{st} = 17,16 \text{ кг/кг}$) целе-

сообразен подогрев одного воздуха окислителя, тем более что подогрев углеводородов протекает с их крекингом – эндотермической реакцией – и сопровождается сажеобразованием. Подогреву воздушного дутья при сжигании природного газа сопутствует интенсивная, возрастающая с повышением температуры T_T диссоциация продуктов сгорания. Поскольку диссоциация представляет эндотермические реакции, то рост T_T в области высоких температур отстает от увеличения T_a в отличие от хода функции $T_C(T_a)$ (формула (3)).

Иная ситуация складывается в случае использования в качестве горючего низкокалорийных забалластированных газов. Такое топливо характеризуется малым стехиометрическим числом (для рассматриваемого доменного газа $L_{st} = 0,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $\Omega_{st} = 0,47 \text{ кг/кг}$; для рассматриваемой на рис. 3 природно-доменной смеси $L_{st} = 3,22 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $\Omega_{st} = 3,4 \text{ кг/кг}$), и для поддержания $T_T = \text{idem}$ по отношению к природному газу необходим одновременный подогрев топлива и окислителя. На рис. 3 показано, что для обеспечения T_T соответствующей минимальной, но широко используемой в печах различного назначения, работающих на природном газе, температуре подогрева воздуха $T_a = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ (573 К) в случае природно-доменной смеси рассматриваемого состава соответствует подогрев воздуха $T_a = 990 \text{ К}$. Подогрев обоих компонентов горения позволяет ограничить температуру до $T_a = T_{bfg} = 813 \text{ К}$.

Подогрев топлива и окислителя осуществляется в ходе утилизации теплоты продуктов сгорания (первичный теплоноситель), передающих тепловую энергию воздуху (газу) – вторичному теплоносителю. Этот процесс производится в рекуперативных и регенеративных теплообменных аппаратах, обычно в зависимости от технологической температуры в печном агрегате. Регенеративные теплообменники в основном используются в высокотемпературных печах, однако и в этом случае могут применяться рекуператоры – как более простые в управлении аппараты при условии выбора соответствующего типа устройства, его конструкции и материала теплообменных поверхностей.

Основные типы существующих рекуперативных теплообменников.

Высокотемпературные рекуператоры представляют основной тип теплообменников, служащих для централизованной утилизации теплоты продуктов сгорания (уходящих газов) в промышленных печах [5] (рис. 4а) и технологических схемах воздушной [20] (рис. 4б, в) и паровой [21] газификации (рис. 4г). Такие рекуператоры достаточно условно разделяются на аппараты конвективного и радиационного типов. В связи с широким распространением в последние десятилетия рекуперативных горелочных устройств [7–9] основное внимание при создании эффективных рекуператоров как высокотемпературных утилизаторов теплоты уделялось совершенствованию способов и устройств интенсификации конвективного теплообмена в системах «продукты сгорания – теплообменные поверхности – нагреваемый воздушный поток». Эта тенденция вызвала разработку разнообразных турбулизаторов на пути теплоносителей в форме продольных и поперечных канавок и ребер, винтообразных и спиральных вставок, выступов в форме прерывистых шипов, проволочных мотков, с одной стороны, и лункообразных впадин (dimples), с другой.

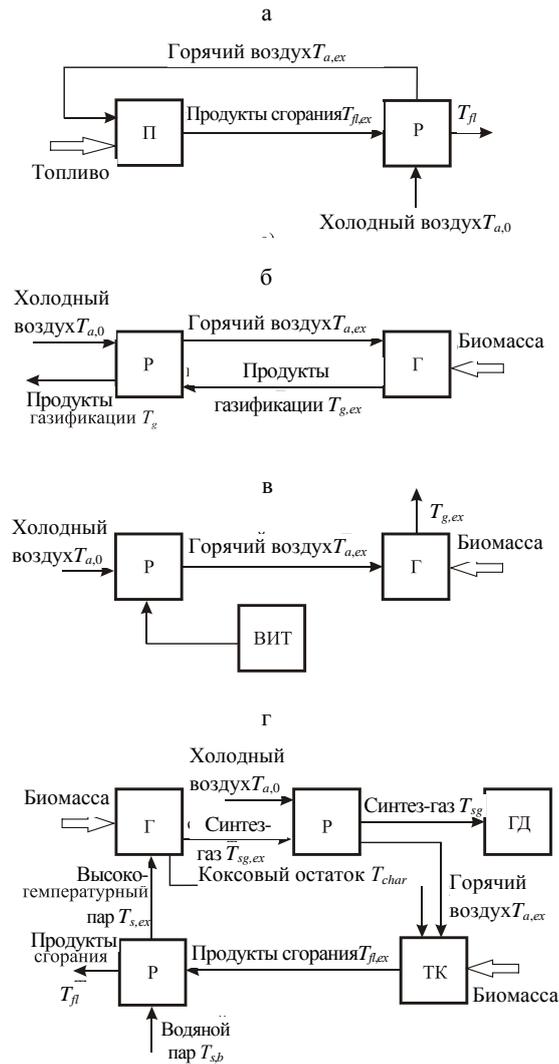


Рис. 4. Примеры использования рекуператоров в различных технологических схемах: а – подогрев воздуха горения в топливной печи; б – воздушная газификация биомассы – подогрев воздуха продуктами газификации; в – воздушная газификация биомассы – подогрев воздуха посредством внешнего источника теплоты; г – подогрев пара и воздуха горения в схеме высокотемпературной паровой газификации HTSG; П – печь; Р – рекуператор; Г – газификатор; ТК – топочная камера; ГД – газовый двигатель; ВИТ – внешний источник теплоты

Несмотря на растущее распространение в индустриально развитых странах систем отопления на базе рекуперативных и регенеративных горелочных устройств, централизованные рекуператоры сохраняют свою значимость для мощных нагревательных печей металлургии, машиностроения, а также при тепловой обработке неметаллических материалов. В [22] имеются указания на значимость централизованных рекуператоров в системах с FLOX (MILD, HiTAC) системами сжигания, эксплуатация которых требует предварительного разогрева печного пространства до температур не менее 800°C (1073 K). Например, компания SSAB ввела в эксплуатацию после реконструкции нагревательную печь с шагающим подом производи-

тельностью 300 т/ч, где распределение температур по длине печи от 1000°C (1273 К) до 1320 °С (1593 К) соответствует противоточной схеме ввода топлива и удаления продуктов сгорания и обеспечивается системой HiTAC (HighTemperatureAirCombustion) сжигания топлива (аналог беспламенного (flameless) или замедленного (объемного) сжигания) в условиях высокотемпературного подогрева воздуха. Печь отопливается с помощью низкоэмиссионных (low – NO_x) горелок НТВ, а утилизация теплоты уходящих газов обеспечивается централизованным рекуператором с температурой подогрева воздуха 600 °С.

Отметим в заключение, что роль рекуператоров как утилизаторов теплоты является лимитирующей при использовании низкокалорийных газовых топлив недостаточной температурой горения в условиях высокотемпературных процессов: нагрев стали подпластическую деформацию (прокатка – в металлургии и кузнечно-прессовое производство – в машиностроении), обжиг керамики, огнеупоров, плавления стекла. В этих процессах необходимо обеспечить предварительный подогрев обоих компонентов горения: горючего (низкокалорийного) газа наряду с воздухом-окислителем.

При этом особую угрозу представляет присутствие серы как компонента топлива (горючего газа), которая в продуктах сгорания резко снижает термическую и химическую стойкость поверхностей нагрева [23]. Если для утилизаторов теплоты уходящих газов – рекуператоров в воздушно-агрессивной среде (продукты сгорания), то для теплообменников на газовом тракте сера будет присутствовать как снаружи, так и внутри элементов рекуператора.

Для использования низкокалорийных газовых топлив в высокотемпературных процессах необходимо выполнение следующих требований:

- повышенная температура подогрева компонентов горения, имея в виду подогрев обоих компонентов: топлива и окислителя, т. е. об использовании двух утилизаторов теплоты (рекуператоров) для каждого из компонентов горения;

- минимально возможная температура теплообменных поверхностей при максимальном нагреве компонентов (газа, воздуха), т. е. установление минимальной разницы температур: «внутренний поток – теплообменная поверхность». Выполнение этого условия может уменьшить коррозионное воздействие агрессивной среды, поскольку при пониженных температурах стали (труб, иных поверхностей) снижается скорость химических реакций между продуктами сгорания и металлом. Для пониженной разности температур «теплообменная стенка – теплоноситель», например в случае использования трубчатых рекуператоров, необходимо применять интенсификацию теплообмена внутри каждой из труб.

ВЫВОДЫ

1. Утилизация теплоты уходящих продуктов сгорания является обязательной составляющей повышения эффективности использования топлива в высокотемпературных агрегатах (печах, котлах, парогенераторах), подъема рабочих температур теплоносителя до или выше уровня технологиче-

ских требований. Значимость и возможности утилизации теплоты с точки зрения экономии топлива возрастают по мере роста технологических температур $T_{fl,ex}$ в агрегате и снижения разности между теоретической температурой горения T_T рассматриваемой топливо-окислительной смеси и $T_{fl,ex}$.

2. В последние годы получил распространение подогрев рабочих компонентов для случаев воздушной и паровой газификации биомассы за счет утилизации теплоты продуктов газификации (синтез-газа). С этой целью изменены схемы и конструкции установок газификации биотоплива, которые комбинируют с котлами и газовыми двигателями в системах когенерации энергии.

3. В качестве утилизаторов теплоты используются высокотемпературные конвективные и радиационные теплообменники, обычно рекуперативного типа. Применение рекуператоров в условиях серосодержащих газовых смесей, что имеет место при использовании альтернативных газовых топлив, резко понижает температурную и химическую стойкость стальных теплообменных труб. В этой связи вопрос о повышении стойкости рекуператоров, по существу, определяет возможность использования нетрадиционных топлив.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kuhs, H. J. Erdgaseinsatz in industriellen Kesselanlagen / H. J. Kuhs // Gas Wärme Int. – 2006. – Vol. 55, No 8. – P. 562-565.
2. Mandeville, L. Percomterm Boiler Flue Gas Economizers / L. Mandeville // Technology and Market Assessment Forum (TMAF), Meeting in Kansas City, Missouri, October 16th, 2008. – 28 p.
3. Система децентрализованного теплоснабжения на основе аппаратов погружного горения: термодинамический анализ пути совершенствования / Б. С. Сорока [и др.] // Пром. теплотехника. – 2001. – Т. 23, № 3. – С. 112–119.
4. Сорока, Б. С. Интенсификация тепловых процессов в топливных печах / Б. С. Сорока. – Киев: Наукова думка, 1993. – 416 с.
5. Сорока, Б. С. Системы сжигания и теплоутилизационные устройства технологических печей: современное состояние и мировые тенденции развития / Б. С. Сорока // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 2. – С. 54–69.
6. Менделев, Д. В. Теплотехническое обоснование энергоэффективных технологий и конструкций промышленных печей для нагрева металла: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Д. В. Менделев // Металлургия черных, цветных и редких металлов. – Минск, 2012. – 20 с.
7. Gitzinger, H. P. Saving energy by modernizing the heating system, using modern self recuperative burners / H. P. Gitzinger, M. Wicker, P. Ballinger // Heat Processing. (8) issue 3. – 2010. – P. 253–254.
8. Trimis, D. New Ceramic Heat Exchangers with Enhanced Heat Transfer Properties for Recuperative Gas Burners / D. Trimis, V. Uhlig, R. Eder // Heat Processing. (9) issue 2. – 2011. – P. 183–187.
9. Neuartige keramische Wärme – übertrager für Rekuperatorgasbrenner / D. Trimis [et al.] // Gas Wärme Int. – 2011. – № 5. – P. 384–386.
10. Whipple, D. High efficiency burner systems for aluminium melting furnaces / D. Whipple, J. Teufert, J. Domagala // Heat Processing (8), issue 2. – 2010. – P. 139–144.
11. Reusch, G. Effiziente Brennersysteme für Öfen in der Aluminium-Industrie / G. Reusch, J. Domagala // Gas Wärme Int. – 2011. – No 5. – P. 57–62.
12. Использование кислорода и обогащенного кислородом воздуха в нагревательных печах, колодцах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей / И. Н. Карп [и др.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 3. – С. 18–29.

13. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей оддиссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди; пер. с англ. Ю. А. Данилова и В. В. Белого, под ред. А. П. Агеева. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
14. Сорока, Б. С. Энергоэкологический анализ эффективности использования топлива и энергии с применением математического и компьютерного моделирования. 1. Методика расчета энергетической эффективности и ее теплофизическое обоснование / Б. С. Сорока, В. С. Кудрявцев, Р. С. Карабчиевская // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 1. – С. 11–21.
15. Soroka, B. Combined power and environmental optimization of the fuel type by reheating and thermal treatment processes / B. Soroka, P. Sandor // Proceedings of the 21st World Gas Conference. – Nice, France, 6–9 June 2000. – 15 p.
16. Soroka, B. Simplified design method of efficiency's and NO_x yield's evaluation at the industrial furnaces under replacement of type of combustible gas / B. Soroka, P. Sandor // Proceedings of the VII International Scientific Conference on Combustions and Heat Technics: University of Miskolc, 1998, May 27–29. – Miskolc, 1998. – P. 103–113.
17. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах / И. Н. Карп [и др.]. – Киев: Техника, 1967. – 382 с.
18. Білодід, В. Д. Енергетичний потенціал горючих вторинних енергоресурсів і водню, а також витрати на їх підготовку до прямого спалювання / В. Д. Білодід, Г. О. Куц // Проблеми загальної енергетики. – 2011. – Вип. 2 (25). – С. 32–39.
19. Lalovic, M. Flame temperature as a function of the combustion conditions of gaseous fuels / M. Lalovic, Z. Radovic, N. Jaukovic // MTAEC9. – 2006. – No40(3). – P. 89–82.
20. Bionassis Gasification with Preheated Air: Energy and Exergy Analyses / R. M. Karamarković [et al.] // Thermal Science. – 2012. – Vol. 16, issue 2. – P. 535–550.
21. Performance Analysis of Biomass Gasification and Power System with High Temperature Steam / K. Umeki [et al.] // Proceedings of 8th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, July 5–7, 2010, Poznan, Poland. – P. 415–423.
22. Szewczyk, D. High Temperature Burners (HTB) as the result of the connection of HiTAC combustion technology with central recuperative systems / D. Szewczyk, J. Engdahl, A. Stachowski // Proceedings of 8th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, July 5–7, 2010, Poznan, Poland. – P. 337–345.
23. Seong, B. G. High-temperature corrosion of recuperators used in steel mills / B. G. Seong, S. Y. Hwang, K. Y. Kim // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 126, issues 2–3. – P. 256–265.

Поступила 25.10.2012

УДК 539.1.074

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Инж. СКРЯБИНА Е. В., докт. техн. наук САПОЖНИКОВ Н. Е.

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Весьма актуальной на сегодняшний день в ядерной энергетике является задача продления срока эксплуатации технических средств. Как правило, для тех средств, срок эксплуатации которых продлен, проводится мониторинг основных характеристик, что приводит к лавинообразному росту информации об этих характеристиках. Таким образом, необходимо решить задачу избыточности информации, передаваемой от технических средств,