

**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 $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ [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, экономии 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 (Direct Flame Impingement) – 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]

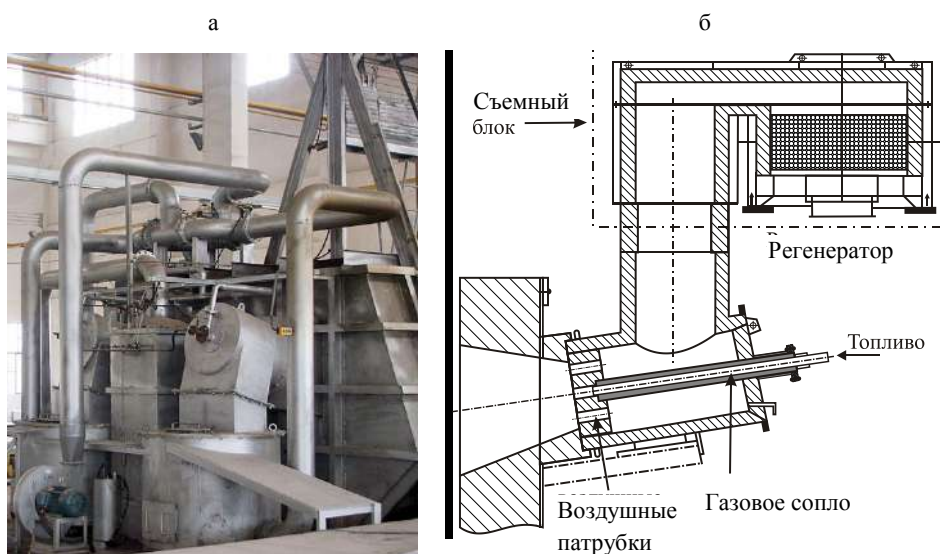


Рис. 2. Регенеративная горелка фирмы BLOOM [10]: а – установка горелки на термической печи; б – принципиальная схема регенеративной горелки

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

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 (fossil fuels).

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.

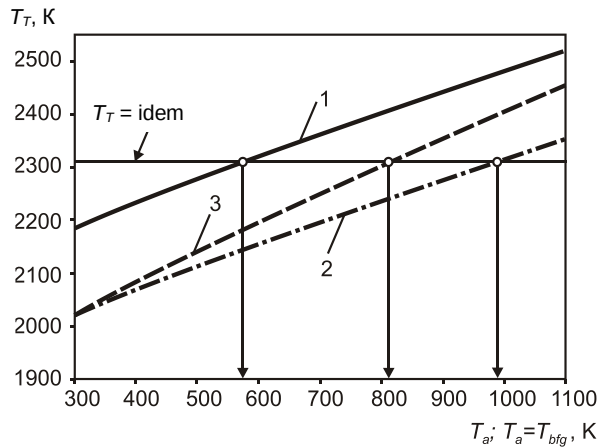


Рис. 3. Зависимость теоретической температуры горения T_T горючих газов с воздухом-окислителем от температуры подогрева компонентов горения. Кривые: 1 – природный газ, подогрев воздуха-окислителя до температуры T_a ; 2 – горючий газ: 70 % доменного газа + 30 % природного газа, подогрев только воздуха 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 $[\text{CH}_4] = 100 \text{ \%}$.

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 $T_a = 300 \text{ °C}$ (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, проволоочных мотков, с одной стороны, и лункообразных впадин (dimples), с другой.

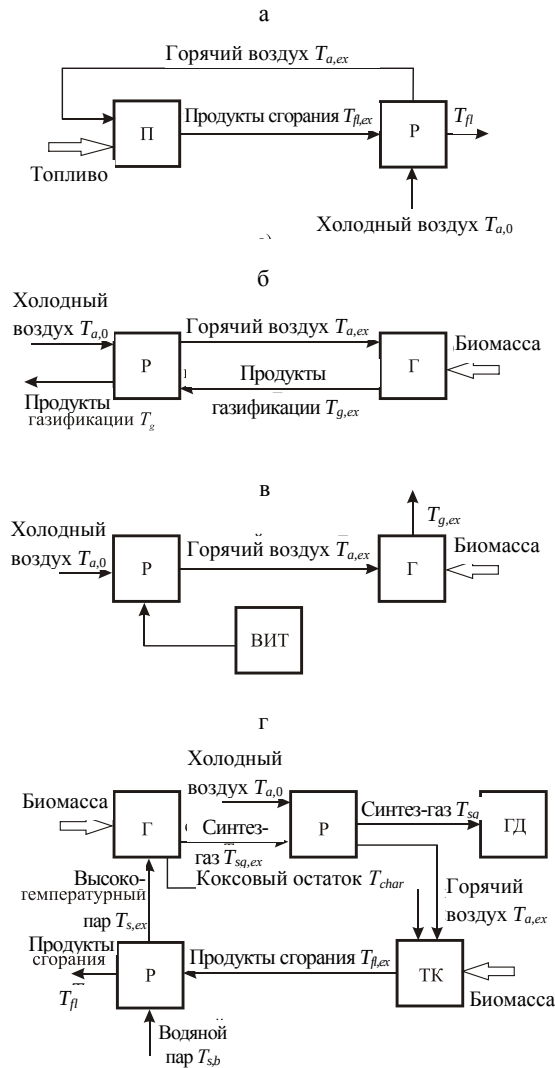


Рис. 4. Примеры использования рекуператоров в различных технологических схемах: а – подогрев воздуха горения в топливной печи; б – воздушная газификация биомассы – подогрев воздуха продуктами газификации; в – воздушная газификация биомассы – подогрев воздуха посредством внешнего источника теплоты; г – 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

производительностью 300 т/ч, где распределение температур по длине печи от 1000 °С (1273 К) до 1320 °С (1593 К) соответствует противоточной схеме ввода топлива и удаления продуктов сгорания и обеспечивается системой HiTAC (High Temperature Air Combustion) 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 с недостаточной температурой горения в условиях высокотемпературных процессов: нагрев стали под пластическую деформацию (прокатка – в металлургии и кузнечнопрессовое производство – в машиностроении), обжига 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 на воздушном тракте – агрессивной является внешняя среда (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 технологических 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 // GasWärme 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 // Metallurgia 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) issue3. – 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) issue2. – 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 о диссипативных 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. С о р о к а, 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. S o r o k a, 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. S o r o k a, 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. П р о д у к т ы сгорания природного газа при высоких температурах / И. Н. Карп [и др.]. – Киев: Техника, 1967. – 382 с.
18. Б і л о д і д, 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. L a l o v i c, M. Flame temperature as a function of the combustion conditions of gaseous fuels / M. Lalovic, Z. Radovic, N. Jaukovic // MTAEC9. – 2006. – No 40 (3). – P. 89–82.
20. B i o m a s s Gasification with Preheated Air: Energy and Exergy Analyses / R. M. Karmarković [et al.] // Thermal Science. – 2012. – Vol. 16, issue 2. – P. 535–550.
21. P e r f o r m a n c e 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. S z e w c z y k, 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. S e o n g, 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, прошедших продление срока эксплуатации. Возможным путем решения этой задачи является применение измерительных контроллеров, территориально совмещенных с первичными преобразователями информации.