

**Сорока Б.С.,** докт. техн. наук, **Воробьев Н.В.,** канд. техн. наук,  
**Бершадский А.И.**

**Институт газа НАН Украины, Киев**

вул. Дегтярєвська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: boris.soroka@gmail.com

## **Экономия природного газа при его замене технологическими газами для отопления средне- и высокотемпературных печей.**

### **1. Влияние характеристик низкокалорийных газов на расход топлива в печах**

Представлена классификация газовых топлив в соответствии с критериями Eurostat. Категория газовых топлив включает природный газ (NG) и вторичные производимые или утилизируемые газы: доменный газ (BFG), коксовый газ (COG), а также газы, вырабатываемые на газовых заводах. Последние упомянутые газы объединены в группу, именуемую «технологическими газами» (process gases — PG). Выполнен численный термодинамический анализ эффективности использования технологических газов и их смесей в промышленных печах с использованием уравнения идеального газа. С единых энтальпийных позиций определены основные теплотехнические характеристики топлив: теоретические температуры горения и теплоты сгорания — в зависимости от состава смесей доменного газа с природным и коксовым. Предложен способ определения расхода топлива в рамках авторской (Сорока Б.С.) методологии замещения топлив, учитывающий 1-е и 2-е начала термодинамики. При условии сохранения потока полезно использованной полной энтальпии и учета соответствующего КПД использования топлива выполнен анализ возможности экономии или возникновения перерасхода природного газа (NG), а также потока теплоты сгорания природного газа в зависимости от содержания доменного газа в смесях NG + BFG при замене NG технологическими газами. Установлено, что при увеличении доли доменного газа в смеси с природным экономия природного газа возрастает, однако значительно увеличивается перерасход располагаемой тепловой энергии смеси топливо : окислитель, вызванный более низкой теоретической температурой и теплотой сгорания доменного газа по сравнению со случаем использования чистого природного газа. Выполнен анализ экономии топлива благодаря утилизации теплоты продуктов сгорания (уходящих из печи газов), реализуемой за счет подогрева компонентов горения: воздуха-окислителя или доменного газа. При увеличении доли доменного газа в смеси с природным возрастает роль подогрева топлива NG + BFG по отношению к влиянию подогрева воздуха на экономию топлива. Сопоставлены потребные потоки располагаемой теплоты газо-воздушных смесей с учетом теплоты подогрева компонентов горения (25, 250 и 400 °С). Исследования проведены для двух температур печи: 800 и 1000 °С. Проведены расчеты замены природного газа коксодоменной смесью с позиций оценки изменения располагаемой теплоты исходной смеси и теплоты сгорания по сравнению с таковыми при использовании чистого природного газа. *Библ. 21, рис. 3, табл. 2.*

**Ключевые слова:** альтернативное газовое топливо, доменный газ, замещение топлив, коксовый газ, теоретическая температура горения, теплота сгорания, термическая печь, экономия природного газа, энтальпийный анализ.

Эффективным способом экономии природного газа является его частичное или полное замещение альтернативным топливом, включая технологические газы (доменный, коксовый, коксодоменный), а также их смеси с природным газом, другие газы металлургических производств или

местного происхождения: биогаз, свалочный газ, продукты газификации твердых и жидких топлив.

Экономия топлива важна не только с позиций энергосбережения, но и при учете экологических последствий использования топлива, поскольку выбросы вредных веществ и парнико-

вых газов имеют практически линейную связь с потреблением топлива. Задача сохранения глобального климата усиливает значимость проблемы экономии ископаемых топлив (fossil fuels) в современном мире в связи с тем, что парниковые газы в продуктах сгорания, прежде всего  $\text{CO}_2$ , играют определяющую роль в повышении температуры атмосферного воздуха.

Несмотря на избыток природного газа и резкое понижение стоимости топлива на рынках США с появлением сланцевого газа и сланцевой нефти, в большинстве стран, в частности, европейских стоимость органического топлива остается высокой, а его экономия сохраняет неизменную значимость для национальных экономик.

Так, в работе [1] при экономической оценке технологии блестящего отжига полосы в муфельной печи с  $\text{H}_2$ -атмосферой фирмы «Ebner Nicson» (Австрия) указывается цена природного газа 0,3 евро/ $\text{м}^3$ , что в 2–5 раз выше таковой в США. Примерно такая же стоимость природного газа (8,75 евро/ГДж) сообщается в работе [2].

В случае замещения природного газа технологическими или другими упомянутыми газами низкая теплота и температура горения топлив плохо сочетаются с возможностями их использования в высокотемпературных агрегатах. В то же время энергетического содержания технологических газов достаточно для использования в средне- и низкотемпературных процессах и печах. В связи с низкой теоретической температурой горения топлив, альтернативных природному газу, их использование в высокотемпературных процессах может быть достигнуто за счет высокотемпературного подогрева компонентов горения: воздуха-окислителя и горючего газа. Подогрев компонентов горения обычно обеспечивается в результате утилизации теплоты уходящих из печи продуктов сгорания. Другой способ использования низкокалорийных газов — их обогащение более калорийными газовыми топливами либо обогащение окислителя кислородом [2]. При этом особое значение приобретает экологический аспект использования топлива, поскольку более высокотемпературный подогрев компонентов горения неизбежно вызывает усиленное образование токсичных газов, в частности, оксидов азота [2].

### Классификация газовых топлив.

#### Технологические и низкокалорийные топлива

Номенклатура горючих газов достаточно разнообразна, поэтому их классифицируют по определенным признакам, облегчающим анализ и сопоставление топлив. Так, согласно действующему в ЕС способу классификации газовых

топлив Eurostat [3], разделение газов на определенные группы проводится с учетом их происхождения. Категория газовых топлив включает природный газ как ископаемое топливо (fossil gas fuel) и категорию сопутствующих вторичных, производимых или утилизируемых газов (derived or recovered gases). В эту категорию входят коксовый и доменный газы, согласно принятой нами классификации, именуемые «технологическими газами» (process gases), а также газы, производимые на газовых заводах — неископаемые топливные газы (recovered gases). Классификация технологических газов по нашей терминологии предполагает учет производств, продуктами которых они являются. Так, в металлургических производствах образуются доменный, коксовый, генераторный, конвертерный и другие газы, получают их смеси, в нефтехимии получают газы риформинга, пиролиза углеводородов [3]. В рамках такого подхода к категории технологических газов их образование рассматривается как сочетание целенаправленного получения газовых топлив, а также как попутного к основному процессу образования некоторых химических соединений в газовой фазе.

В соответствии с классификацией Eurostat [3], биогазы не относят ни к категории «Газ», ни к топливам, а причисляют к категории «Другие возобновляемые энергоисточники» («All other renewable energies»). В то же время существует группа «Жидкие биотоплива» («Biodiesels, Bio jet kerosene, Other liquid biofuels»).

Другим важным критерием при классификации газовых топлив является теплота сгорания. Здесь диапазон принятых значений используемых топлив варьируется более, чем на порядок: от высококалорийных углеводов (природных и попутных газов с теплотой сгорания до 50 МДж/кг) — до низкокалорийных газов технологического или биологического происхождения.

### Современный опыт использования технологических газов

Низкокалорийные газы (НКГ) и смеси газов имеют широкое распространение в различных отраслях промышленности. Кроме того, НКГ служат топливом в двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах, а также в различных когенерационных установках совместного производства тепловой и электрической энергии, в том числе используемых на металлургических предприятиях, где получают технологические газы [4]. В целом речь идет не

только о различных способах использования технологических газов по месту их получения в основных производствах, но и относительно применения НКГ вне этих технологий и предприятий. Несмотря на расширение возможностей газовых рынков, даже в настоящее время в Европе полагают, что производство (в частности, связанное с металлургическими технологиями) ограничивается возможностями топливно-энергоснабжения предприятий [5, 6]. В этой связи предлагается подход, обеспечивающий эффективное использование сопутствующих низкокалорийных (технологических) топлив («Lower quality by – product fuel»), которые образуются в ходе протекания основных металлургических процессов [5, 6]. Из всех технологических газов, по-видимому, наиболее востребованными являются коксовый и доменный газы и их смеси [3].

В работе [7] описан опыт создания специальных генераторов горячих газов фирмы Loesche ThermoProzess GmbH, которые используются в металлургии, цементной промышленности и промышленности строительных материалов для сушки сырья. Теплогенераторы фирмы Loesche имеют широкий ряд типоразмеров по тепловой мощности (от 0,5 до 60 МВт) и обеспечивают потребности средне- (до 750 °С) и высокотемпературных (до 1200 °С) процессов. Установки могут работать отдельно либо одновременно на твердом, жидком топливе и различных НКГ: доменном (BFG), сбросном, коксовом (COG), синтетическом [8].

Камеры сгорания теплогенераторов фирмы Loesche снабжены вспомогательной горелкой для нормального сжигания газообразных топлив при низких значениях теплоты сгорания основного топлива ( $Q_1 < 2500$  кДж/м<sup>3</sup>). Специальные решения фирмы Loesche ThermoProzess GmbH для сжигания НКГ и лигнита обеспечивают выполнение новых жестких экологических нормативов TA Luft [8].

Довольно распространенный класс горючих газов составляют газы биологического происхождения, которые, в соответствии с классификацией Eurostat [3], не включаются в группу «Gas», а относят к категории «Другие возобновляемые энергоисточники» («All other renewable energies»). К числу низкокалорийных топлив, производимых из биомассы, включая пищевые и другие биоотходы, относятся биогазы, продукты газификации – газы, образуемые при термическом (в аллотермических процессах) или окислительном пиролизе (при автотермических процессах) [9].

Газы термического пиролиза содержат биомасляные и смолистые соединения, а также во-

дяной пар (в примере [9] – до 85 %) в связи с содержанием большого количества воды в исходной биомассе.

Для повышения эффективности печей и отдельных узлов доменный газ, согласно разработкам и исследованиям последнего времени, используют и для сравнительно высокотемпературных процессов типа отопления воздухоподогревателей доменных печей при условии дополнительного использования коксового или природного газа либо обогащения воздуха горения кислородом [2].

В работах [5, 6] анализируются различные варианты отопления высокотемпературных печей и утилизации теплоты продуктов сгорания, удаляемых из них, для случаев использования низкокалорийных газов. Рассматриваются варианты, при которых в дополнение к воздуху, предварительно нагретому в центральном металлургическом рекуператоре, нагревается горючий газ. При этом ожидаемый нагрев потока до 500–600 °С на практике, как правило, достигает 350 °С [5, 6], что, возможно, обусловлено более высокой массовой теплоемкостью потока НКГ, в частности, BFG по сравнению с воздушным потоком в условиях качественного сжигания этих топлив при небольших превышениях стехиометрических составов BFG ( $\lambda = 1,05–1,15$ ).

Для обеспечения отопления высокотемпературных нагревательных печей прокатного производства доменным газом рекомендуется предварительный подогрев обоих компонентов горения: нагрев доменного газа с помощью регенеративных горелок Ultra-Low NO<sub>x</sub> Dlasto Flame серий 1130 и 1150 фирмы «Bloom Engineering GmbH» (Германия) и рекуперативный либо регенеративный нагрев воздуха горения (табл.1).

Хотя упомянутые в работах [5, 6] регенеративные горелки являются эффективными утилизаторами теплоты (УТ), централизованные рекуператоры во всем мире являются наиболее востребованными УТ промышленных печей ме-

**Таблица 1. Варианты системы отопления печи с подогревом воздуха и доменного газа [5, 6]**

Вариант подогрева воздуха/газа	Температура, °С (К)		
	T <sub>a</sub>	T <sub>f</sub>	T <sub>T</sub>
Рекуперативный/регенеративный	550 (823)	350 (623)	1593 (1866)
Регенеративный/холодный	1038 (1311)	21 (294)	1595 (1868)
Регенеративный/рекуперативный	1038 (1311)	350 (623)	1698 (1971)
Холодный/регенеративный	21 (294)	1038 (1311)	1646 (1919)
Рекуперативный/регенеративный	600 (873)	1038 (1311)	1827 (2100)
Регенеративный/регенеративный	1038 (1311)	1080 (1353)	1923 (2196)

таллургии, машиностроения, промышленности строительных материалов, химии и нефтехимии, а также других отраслей. Как правило, использование рекуператоров обеспечивает экономию топлива 20–25 % (прежде всего природного газа). В высокотемпературных печах сокращение расходов природного газа за счет подогрева воздуха-окислителя достигает 30–35 % и больше.

В работе [10] указывается на необходимость замены существующих централизованных рекуператоров на новые, с температурой подогрева воздуха горения свыше 600 °С для повышения энергетической эффективности печей, что требует использования сталей с высокой жаростойкостью.

Основная концепция замены природного газа и использования технологических газов, прежде всего низкокалорийных газовых топлив (НКГ или LCV газов), состоит в технико-экономической оптимизации (ТЭОпт) их состава в условиях утилизации теплоты продуктов сгорания, реализуемой за счет подогрева компонентов топливоокислительной смеси: окислителя (воздуха или воздуха, обогащенного  $O_2$ ), горючего газа или обоих компонентов горения.

В табл.1 представлены возможные способы подготовки компонентов горения перед подачей в печь, из которой следует, что подогрев обоих компонентов горения при высокотемпературном нагреве НКГ в регенеративных горелках может обеспечить отопление высокотемпературных печей. Как будет показано ниже, с точки зрения экономии природного газа подогрев не только воздуха, но и НКГ рационален и в случае среднетемпературных печей. Однако с учетом капитальных и эксплуатационных затрат использование двух рекуперативных систем требует экономического обоснования (выполнения технико-экономической оптимизации). Соответствующий анализ должен быть дополнен сравнительной оценкой удельных энергетических и экологических показателей [11, 12].

В качестве первых рассматриваются удельные расходы теплоты сгорания топлива  $b_f$  (кДж/т продукции), в качестве вторых – удельные выбросы  $NO_x$  ( $C_{NO_x}$ , кг  $NO_x$ /т продукции) и  $CO_2$  ( $C_{CO_2}$ , кг  $CO_2$ /т продукции) на единицу массы обрабатываемой в печи продукции (обрабатываемых изделий). Перечисленные показатели могут относиться к 1 кДж полезно использованной энергии и к 1 т продукции в равной степени.

#### Основные характеристики смесевых топлив при замещении природного газа

В Институте газа НАН Украины под руководством проф. Сороки Б.С. предложены и

развиты современные основы замещения топлив с учетом энергетических и экологических характеристик [13] взамен ранее использовавшихся принципов замещения (gas fuels interchangeability [14]). Предлагаемый подход был использован для оценки возможностей замещения природного газа альтернативными газовыми топливами и газовыми смесями. Ниже такой анализ будет представлен на примере замены природного газа на технологические газы и их смеси: природно-доменную и коксодоменную с целью отопления колпаковых печей ЦХП-1 на МК «Запорожсталь». При проведении расчетного анализа рассматривались фактические составы природного и технологических газов, которые производятся на предприятии (табл.2).

При рассмотрении комплекса вопросов, связанных с переходом от использования природного газа к технологическим газам, важную роль играет учет и анализ теоретических температур  $T_T$  и теплоты сгорания  $Q_I$ , а также  $Q_H$  смесей природного и технологических газов. Соответствующие характеристики являются важнейшими параметрами в рамках предлагаемой методики сертификации топлива как товарного продукта [15]. Термодинамические расчеты теоретической температуры и теплоты сгорания природно-доменной и коксодоменной смесей с различным содержанием доменного газа выполняются через полные (с учетом теплоты образования) энтальпии компонентов исходной горючей смеси и равновесных продуктов сгорания. Значение  $T_T$  определяется при различных температурах подогрева исходных компонентов горения с использованием ранее разработанного программного продукта «FUEL» [16].

Удельная теплота сгорания (теплотворная способность) 1 кг топлива может быть пред-

**Таблица 2. Составы газовых топлив и воздуха горения на комбинате «Запорожсталь», % (об.)**

Компонент	Природный газ	Доменный газ	Коксовый газ	Воздух
Метан $CH_4$	93,53	–	26,7	–
Этан $C_2H_6$	3,51	–	–	–
Пропан $C_3H_8$	0,82	–	–	–
Бутан $C_4H_{10}$ (сумма изомеров)	0,20	–	–	–
Пентан $C_5H_{12}$ (сумма изомеров)	0,05	–	–	–
Гексан $C_{6+}$ и выше	0,03	–	–	–
Непредельные углеводороды $C_nH_m$	–	–	2,6	–
Водород $H_2$	–	3,62	57,1	–
Оксид углерода CO	–	25,37	2,9	–
Диоксид углерода $CO_2$	0,56	19,45	4,2	–
Азот $N_2$	1,29	51,56	6,5	79,06
Кислород $O_2$	0,01	–	–	20,94

ставлена одной из трех величин: высшей  $Q_{h,m}$ , нижней  $Q_{l,m}$  или равновесной  $Q_{eq,m}$  теплотой сгорания:

$$Q_{h,m} = (1 + \Omega_{st}^*) (I_{g^*,T_T}^* - I_{g^*,w,T_0}^*); \quad (1)$$

$$Q_{l,m} = (1 + \Omega_{st}^*) (I_{g^*,T_T}^* - I_{g^*,v,T_0}^*); \quad (2)$$

$$Q_{eq,m} = (1 + \Omega_{st}^*) (I_{g^*,T_T}^* - I_{g^*,eq,T_0}^*); \quad (3)$$

где индексы относятся к равновесным продуктам сгорания при различных состояниях  $H_2O$  в них:  $g,w,0$  или  $g,w,T_0$  – вся масса  $H_2O$  при  $T_0$  принимается в жидкой фазе (вода);  $g,v,0$  или  $g,v,T_0$  – вся масса  $H_2O$  при  $T_0$  – в паровой фазе;  $g,eq,0$  или  $g,eq,T_0$  – равновесное содержание  $H_2O$  при  $T_0$  (жидкость + пар).

Теоретические температуры горения и теплоты сгорания рассматриваемых газотопливных смесей по результатам наших расчетов по методике [15–17] представлены на рис.1 и 2 соответственно.

Из рис.1 следует, что при переходе от чистого природного газа к его смесям с доменным газом значительно и ускоренно с ростом DBFG

снижается теоретическая температура горения. В то же время при использовании смесей коксового и доменного газов с уменьшением доли доменного газа теоретическая температура горения  $T_T$  смеси увеличивается до значений, сопоставимых или превышающих уровень  $T_T$  для природно-доменной смеси при тех же DBFG и фиксированных значениях начальных температур газа и воздуха:  $T_f = idem, T_a = idem$ .

Ход кривых, представленных на рис.1, качественно соответствует трендам:

– для смеси коксового и доменного газа

$$\frac{\partial T_T}{\partial D_{BFG}} < 0; \quad \frac{\partial^2 T_T}{\partial D_{BFG}^2} < 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_T}{\partial D_{COG}} > 0; \quad \frac{\partial^2 T_T}{\partial D_{COG}^2} < 0; \quad (5)$$

– для смеси природного и доменного газа

$$\frac{\partial T_T}{\partial D_{BFG}} < 0; \quad \frac{\partial^2 T_T}{\partial D_{BFG}^2} < 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_T}{\partial D_{NG}} > 0; \quad \frac{\partial^2 T_T}{\partial D_{NG}^2} < 0. \quad (7)$$

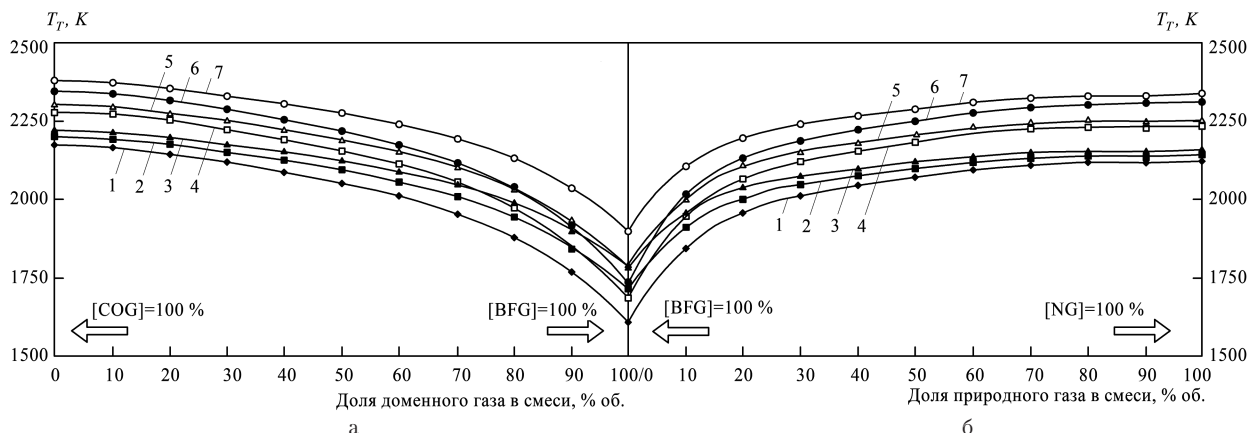


Рис.1. Зависимость теоретической температуры горения  $T_T$  газовых смесей COG + BFG (а) и BFG + NG (б) от состава топлива при различных вариантах подогрева газового топлива и воздуха  $T_f/T_a, K$ : 1 – 298/298; 2 – 523/298; 3 – 673/298; 4 – 298/523; 5 – 523/523; 6 – 298/673; 7 – 673/673.

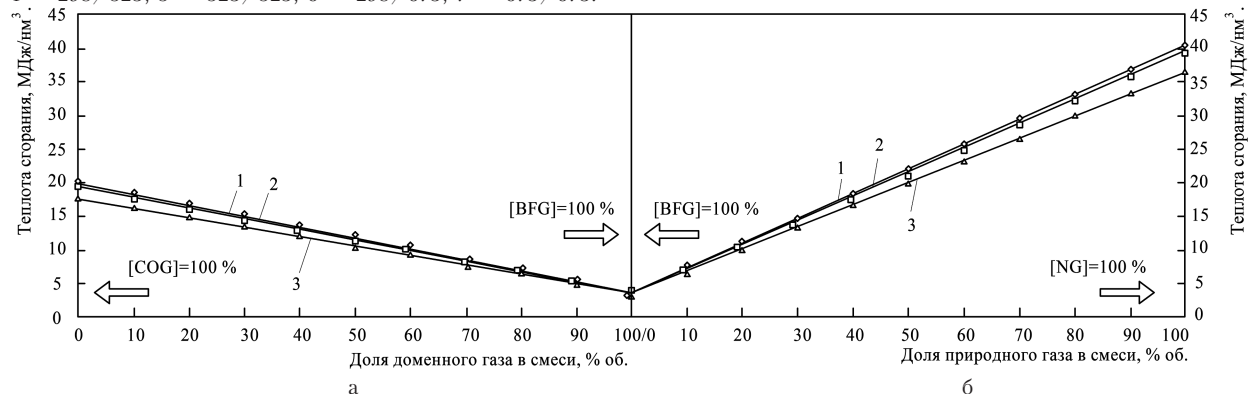


Рис.2. Зависимость удельной объемной теплоты сгорания газовых смесей (МДж/м³) COG + BFG (а) и BFG + NG (б) от состава при разных температурах подогрева газового топлива и воздуха: 1 – высшая теплота сгорания  $Q_h$ ; 2 – равновесная  $Q_{eq}$ ; 3 – низшая  $Q_l$ .

Анализ данных рис.2 показывает значительное снижение удельной теплоты сгорания для газовых смесей COG + BFG и NG + BFG при увеличении доли доменного газа. При увеличении доли коксового газа  $D_{\text{COG}}$  в коксодоменной смеси и  $D_{\text{NG}}$  в смеси с природным газом теплота сгорания значительно возрастает.

### Термодинамическая оценка замещения природного газа технологическими газами по топливоэнергетическим характеристикам

В соответствии с предложенной проф. Сорокой Б.С. методологией замещения топлив [11, 13], расчетная величина потребного расхода топлива  $V_f$  при замене одного топлива другим определяется из условия сохранения полезного (усвоенного садкой) количества теплоты. В случае стационарного процесса это условие представляется как уравнение сохранения потока полезной теплоты:

$$Q_{\text{use}} = Q_{\text{fur}} \eta_f = \text{idem.} \quad (8)$$

Это условие заменило традиционно используемое для оценки потребного расхода топлива  $V_f$  требование сохранения тепловой мощности печи: количество вводимой в печь (топку) теплоты остается неизменным при использовании любых видов топлива:

$$Q_{\text{fur}} = V_f Q_f = \text{idem.} \quad (9)$$

Анализ, представленный ниже, выполняется с использованием уравнения идеального газа. Для численных расчетов примем в качестве базового (замещаемого) топлива природный газ (NG). Обозначения, связанные с ним, помечены одним штрихом ('). В качестве замещающего рассматривается смесевый газ (NG + PG). Обозначения для него помечены двумя штрихами ('').

В рассматриваемом случае частичной или полной замены природного газа технологическим газом PG справедливы следующие соотношения для процессов при постоянном давлении:

$$\begin{cases} B'_{f,v} = B'_{\text{NG},v}; B'_{f,v} = B''_{\text{NG},v} + B''_{\text{PG},v} \\ B'_{f,m} = B'_{\text{NG},m}; B'_{f,m} = B''_{\text{NG},m} + B''_{\text{PG},m} \end{cases} \quad (10)$$

Кроме того,

$$B''_{\text{NG},v} = B''_{f,v} D_{\text{NG},v}. \quad (11)$$

Учтем соотношение идеального газа между объемными и массовыми долями компонента  $i$  в смеси газов  $f$ , в рассматриваемом случае —

природного газа в смеси с технологическим топливом PG:

$$D_{i,m} = D_{i,v} M_i M_f^{-1} \quad (12)$$

или

$$D_{\text{NG},m} = D_{\text{NG},v} M_{\text{NG}} M_f^{-1}, \quad (13)$$

а также уравнение для расчета молекулярной массы газовой смеси

$$M_f'' = M_{\text{NG}} D''_{\text{NG},v} + M_{\text{PG}} D''_{\text{PG},v}. \quad (14)$$

При этом в соответствии со 2-м началом термодинамики [18, 19] КПД печи  $\eta_{\text{fur}}$  определяется по аналогии с КПД цикла Карно с учетом верхнего и нижнего потенциала теплового процесса в печи. В качестве верхнего потенциала принимается избыточная удельная полная энтальпия рабочего тела — продуктов сгорания  $\Delta I_{g,T_T}$  — при теоретической температуре горения  $T_T$ ; в качестве нижнего потенциала — избыточная удельная энтальпия при температуре на срезе печи  $T_{\text{ex}}$ , соответствующая холодной внешней среде.

### Существующая методика замещения топлив

В соответствии с традиционным подходом [20], при замене топлива ( $f'$ ) на ( $f''$ ) сохраняется тепловая мощность установки (печи), то есть количество введенной тепловой энергии (расчет по нижней теплоте сгорания топлива  $O_1$  [20]):

$$\left\{ \begin{array}{l} B'_{f,v} \cdot Q'_{l,v} = B''_{f,v} \cdot Q''_{l,v}; \\ B'_{f,m} \cdot Q'_{l,m} = B''_{f,m} \cdot Q''_{l,m}; \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B'_{f,v} \cdot Q'_{l,v} = B''_{f,v} \cdot Q''_{l,v}; \\ B'_{f,m} \cdot Q'_{l,m} = B''_{f,m} \cdot Q''_{l,m}; \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B'_{f,v} = Q'_{l,v}; \\ B''_{f,v} = Q''_{l,v}; \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B'_{f,v} = B'_{f,m} \cdot \frac{M_f'}{M_f}; \\ B''_{f,v} = B''_{f,m} \cdot \frac{M_f''}{M_f}. \end{array} \right. \quad (18)$$

Здесь и далее все характеристики и параметры топлива  $f'$  помечены одним штрихом, топлива  $f''$  — двумя штрихами. При традиционном подходе экономия природного газа в случае замены NG смесевым топливом (NG + BFG) рассчитывается по следующим зависимостям в соответствии с определениями:

— по массовому расходу

$$\begin{aligned} \Delta B_{\text{NG},m} &= (1 - D''_{\text{NG},m} B''_{f,m} / B'_{f,m}) \cdot 100 \% = \\ &= (1 - D''_{\text{NG},m} Q'_{l,m} / Q''_{l,m}) \cdot 100 \%; \end{aligned} \quad (19)$$

— по объемному расходу

$$\begin{aligned} \Delta B_{\text{NG},v} &= (1 - D''_{\text{NG},v} B''_{f,v} / B'_{f,v}) \cdot 100 \% = \\ &= (1 - D''_{\text{NG},v} Q'_{l,v} / Q''_{l,v}) \cdot 100 \%. \end{aligned} \quad (20)$$

С учетом соотношений (10) и (12) уравнение (19) может быть преобразовано к виду (20), что указывает на количественное совпадение относительного объемного и массового сокращения расхода природного газа при его замене смесью NG + PG:

$$\Delta B_{NG,m} = \Delta B_{NG,V}. \quad (21)$$

Кроме того, из уравнений (19) и (20) следует, что экономия природного газа в рамках существующих подходов к проблеме замены топлив не зависит от рабочей (технологической) температуры в топке (печи). Как будет показано ниже, этот вывод является некорректным.

### Предлагаемая методика замещения топлив

В соответствии с нашим подходом, замещение топлив производится по условию сохранения (равенства) полезно воспринятой тепловой энергии в обоих случаях (использования замещающего ( $f''$ ) или замещаемого ( $f'$ ) топлива):

$$\begin{cases} Q'_{use} = Q''_{use} \\ B'_{f,m} (1 + \lambda' \cdot \Omega'_{st}) \cdot (I'_{g,T} - I'_{g,ex}) = \\ = B''_{f,m} (1 + \lambda'' \cdot \Omega''_{st}) \cdot (I''_{g,T} - I''_{g,ex}). \end{cases} \quad (22)$$

При переходе от массового к объемному расходу топлива получим:

$$\begin{aligned} B'_{f,V} \cdot M'_f (1 + \lambda' \cdot \Omega'_{st}) \cdot (I'_{g,T} - I'_{g,ex}) = \\ = B''_{f,V} \cdot M''_f (1 + \lambda'' \cdot \Omega''_{st}) \cdot (I''_{g,T} - I''_{g,ex}). \end{aligned} \quad (23)$$

В случае замены природного газа природно-доменной или коксодоменной смесью и сохранении избытка воздуха  $\lambda' = \lambda'' = \lambda = idem$  расход смесевоего газа как топлива, в соответствии с (22), определяется по следующему выражению:

$$B''_{f,m} = \frac{B'_{f,m} \cdot (1 + \lambda \cdot \Omega'_{st}) \cdot (I'_{g,T} - I'_{g,ex})}{(1 + \lambda \cdot \Omega''_{st}) \cdot (I''_{g,T} - I''_{g,ex})}. \quad (24)$$

Экономия природного газа при этом составит:

— по массовому расходу

$$\delta B''_{NG,m} = \frac{B'_{f,m} - D''_{NG,m} \cdot B''_{f,m}}{B'_{f,m}} \cdot 100\% = \quad (25)$$

$$= \left[ 1 - D''_{NG,m} \frac{(1 + \lambda \cdot \Omega'_{st}) \cdot (I'_{g,T} - I'_{g,ex})}{(1 + \lambda \cdot \Omega''_{st}) \cdot (I''_{g,T} - I''_{g,ex})} \right] \cdot 100\% ;$$

— по объемному расходу

$$\delta B''_{NG,V} = \frac{B'_{f,V} - D''_{NG,V} \cdot B''_{f,V}}{B'_{f,V}} \cdot 100\% = \quad (26)$$

$$= \left[ 1 - D''_{NG,V} \frac{M'_f \cdot (1 + \lambda \cdot \Omega'_{st}) \cdot (I'_{g,T} - I'_{g,ex})}{M''_f \cdot (1 + \lambda \cdot \Omega''_{st}) \cdot (I''_{g,T} - I''_{g,ex})} \right] \cdot 100\% .$$

В выражениях (25), (26) соотношение между объемной  $D_{NG,V}$  и массовой  $D_{NG,m}$  долями природного газа составляет:

$$D_{i,V} = M_i / M_f = D_{i,m}, \quad (27)$$

где  $D_{i,V} \equiv D_{NG,V}$ ,  $D_{i,m} \equiv D_{NG,m}$ .

Тогда из (25) и (26) следует вывод о совпадении частей массового и объемного расхода природного газа, сэкономленного в смесевом топливе  $f''$  в результате замены исходного природного газа (топлива  $f'$ ):

$$\delta B''_{NG,m} = \delta B''_{NG,V}. \quad (28)$$

На рис.3 представлено сопоставление экономии природного газа  $\Delta B_{NG}$  при существующем подходе к замене NG технологическим газом с величиной  $\delta B_{NG}$ , найденной при использовании предлагаемой методологии.

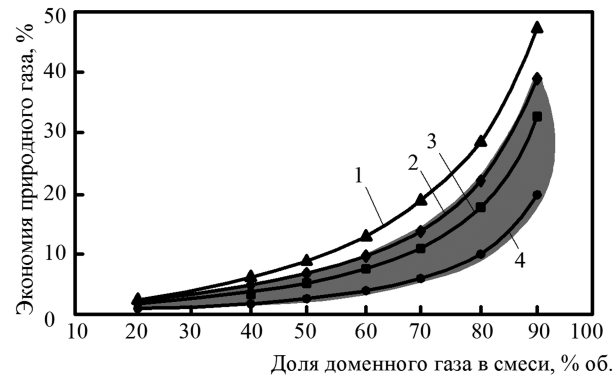


Рис.3. Экономия природного газа при его замене доменным газом в зависимости от доли доменного газа в смеси с природным газом: 1 — существующая (традиционная балансовая) методика замещения топлив [20]; 2-4 — предлагаемая (по поддержанию полезно воспринятого теплового потока (потока избыточной полной энтальпии)) методика замещения топлив. Технологическая температура печи  $t_{fur}$ , °C: 2 — 800; 3 — 1000; 4 — 1200. Коэффициент избытка воздуха  $\lambda = 1,1$ . Холодное топливо и воздух,  $t_f = t_a = 25$  °C.

В соответствии с предлагаемой методологией, возможная экономия топлива  $\delta B_{NG}$  — природного газа при его частичном замещении технологическим газом (BFG) — существенно меньше, чем при традиционном подходе к такой оценке.

При этом с повышением доли доменного газа в смеси с природным газом и при увеличении температуры печи  $t_{fur}$  экономия  $\delta B_{NG}$  уменьшается, а разность  $[\Delta B_{NG} - \delta B_{NG}]$  возрастает.

### Оценка энергозатрат при замене природного газа

При *традиционном подходе*, по определению (17), замена топлива при отсутствии какой-либо специальной подготовки компонентов горения (подогрев компонентов горения, обога-

щение окислителя кислородом, отклонение от стехиометрического соотношения воздух/газ и др.) не меняет затраченной энергии топлива по теплоте сгорания:

$$\Delta Q_{f,comb} = 0. \quad (29)$$

В соответствии с **новой методологией** замещения, оценка изменения потока располагаемой тепловой энергии (available heat) — теплоты химических реакций и физической теплоты подгрева исходных компонентов топлива  $\delta Q_{f,av}$  — проводится по выражению:

$$\begin{aligned} \delta Q_{f,av} &= \left(1 - \frac{Q''_{f,av}}{Q'_{f,av}}\right) \cdot 100\% = \\ &= \left[1 - \frac{B''_{f,m} \cdot (1 + \lambda \cdot \Omega''_{st}) \cdot (I''_{g,T} - I''_{g,v,0})}{B'_{f,m} \cdot (1 + \lambda \cdot \Omega'_{st}) \cdot (I'_{g,T} - I'_{g,v,0})}\right] \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (30)$$

При этом изменение потока теплоты сгорания исходной топливовоздушной смеси, в соответствии с предлагаемой методологией, можно представить в таком виде:

$$\begin{aligned} \delta Q_{f,comb} &= \left(1 - \frac{Q''_{f,comb}}{Q'_{f,comb}}\right) \cdot 100\% = \\ &= \left[1 - \frac{B''_{f,m} \cdot (1 + \lambda \cdot \Omega''_{st}) \cdot (I''_{g,T} - I''_{g,v,0})}{B'_{f,m} \cdot (1 + \lambda \cdot \Omega'_{st}) \cdot (I'_{g,T} - I'_{g,v,0})}\right] \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (31)$$

Процедура, соответствующая (31), может быть использована для оценки экономии теплоты сгорания топлива, расход которого определен по выражению (24). Принимаемые при расчетах энергетические характеристики топлив и печи определяются через избыточные полные энтальпии продуктов сгорания  $\Delta I_{g,T}$  при теоретической температуре горения  $T_T$  и характеристической температуре (для теплоты сгорания и для располагаемой теплоты — при  $T_0$ , для полезной теплоты — при температуре  $T_{ex}$ ) на срезе (в выходном сечении печи):

$$Q_{fur} \approx \dot{m}_g \Delta I_{g,T} = B_{f,m} (1 + \lambda \Omega_{st}) (I_{g,T} - I_{g,0}); \quad (32)$$

$$Q_{use} = Q_{fur} \eta_f = B_{f,m} (1 + \lambda \Omega_{st}) (I_{g,T} - I_{g,ex}) = B_{f,m} (1 + \lambda \Omega_{st}) (\Delta I_{g,T} - \Delta I_{g,ex}). \quad (33)$$

### Выводы

Взаимозаменяемость газовых топлив предполагает учет их энергетических характеристик, включая теплотехнические и огнетехнические свойства, а также рассмотрение температурных условий процессов в топливоиспользующих агрегатах. Для природного газа как базового топ-

лива соответствующие характеристики оговариваются ГОСТ 5542–87 «Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия», который предполагается ликвидировать и заменить с 1 января 2018 г. на основе технического регламента, подлежащего разработке в течение оставшегося периода (2016–2017 гг.). В принципе все используемые топлива различного происхождения должны снабжаться подобными сертификатами для выполнения условий квалифицированного замещения топлив.

Выполнен комплекс работ, предшествующих переводу термических производств на металлургических предприятиях с природного газа (NG) на низкокалорийные технологические газы, в том числе смеси NG с BFG, а также смеси COG + BFG.

1. Рассмотрена классификация газовых топлив по различным критериям с разделением горючих газов на ископаемые топлива (fossil fuels), в данном случае представленные природным и попутными газами, и производимые газовые топлива (derived or recovered gases), представленные прежде всего технологическими газами (process gases). В эту группу газовых топлив входят газы, получаемые в металлургических и нефтехимических производствах, а также газы, производимые на газовых заводах.

2. В свете экологических тенденций последнего времени и в связи с необходимостью снижения воздействия процессов сжигания топлива на парниковый эффект особое внимание уделяется использованию биотоплив и, в частности, биогаза (по классификации Eurostat, биогазы относятся к категории «Другие возобновляемые газы» («All other renewable energies»)). Качество газа в соответствии с требованиями к природному газу как топливу в газовых сетях Германии постоянно изменяется. Характеристики сетевого газа должны удовлетворять стандарту DVGW G260 по теплоте сгорания, плотности, концентрации  $CO_2$  и  $H_2$ , что обеспечивается благодаря добавлению к природному газу других газов, включая ввод биогаза и водорода в германские газотранспортные сети [21].

3. При оценках по существующему «балансовому» методу, базирующемуся на 1-м начале термодинамики с поддержанием теплоты сгорания взаимозаменяемых топлив, установлено: а) расход топлива, замещающего NG, и экономия при этом природного газа не зависят от температуры в топочной камере (технологической температуры печи)  $T_{fur}$ ; б) массовая и объемная экономия природного газа в процентах при его замещении совпадают.

В рамках предлагаемой методологии замещения газовых топлив (Сорока Б.С.), базирую-



щейся на поддержании полезной теплоты, воспринятой внутри топочной камеры (садкой в топливных печах) и при учете 2-го начала термодинамики, проведены расчеты частичной или полной замены природного газа альтернативными газами технологического происхождения.

### Условные обозначения

$B$	– расход топлива, кг/с; $\text{нм}^3/\text{с}$
$\Delta B, \delta B$	– экономия топлива, %
BFG	– доменный газ
COG	– коксовый газ
$D$	– доля компонента
$I, \Delta I$	– абсолютная и избыточная по отношению к таковой при $T_0$ величина удельной полной энтальпии, кДж/кг
$L_{\text{st}}$	– объемное стехиометрическое число газ/воздух (мин), $\text{нм}^3/\text{нм}^3$
$M$	– молярная (молекулярная) масса, кг/кмоль
$\dot{m}$	– массовый поток (расход), кг/с
NG	– природный газ
PG	– технологический газ
$Q$	– теплота сгорания (теплотворная способность), кДж/нм <sup>3</sup> ; тепловая мощность (поток теплоты), кВт
$\delta Q_f$	– экономия (перерасход) затраченной (располагаемой) тепловой энергии, %
$T, t$	– температура, К, °С
$\lambda$	– коэффициент избытка воздуха для топливовоздушной горючей смеси
$\Omega_{\text{st}}$	– массовое стехиометрическое число топливо : воздух
$\eta_f$	– КПД использования топлива в печи, %

### Индексы

$a$	– воздух горения
$av$	– для потока располагаемой тепловой энергии потоков топлива и окислителя (топливоокислительной смеси)
$comb$	– для потока теплоты сгорания топлива
$ex$	– значения на выходе из печи (в выходном сечении)
$eq$	– к равновесной теплоте сгорания (теплотворной способности)
$f$	– топливо
$fl, fur$	– для продуктов сгорания, печи
$g$	– продукты сгорания
$h$	– к высшей теплоте сгорания (теплотворной способности)
$h$	– расчет по теплоте сгорания
$in$	– исходные компоненты процесса горения (топливо + окислитель)
$l$	– к низшей теплоте сгорания (теплотворной способности)
$m$	– при расчетах через массовый расход
$T$	– при теоретической температуре горения $T_T$
$use$	– к полезному тепловосприятию
$V$	– при расчетах через объемные доли компонентов
$v$	– по низшей теплоте сгорания
$w$	– по высшей теплоте сгорания
$0$	– для начальных значений термодинамических параметров и свойств при стандартных условиях ( $P_0 = 0,1013$ МПа; $T_0 = 298$ К);
*	– для параметров горения газового топлива с воздушным окислителем при $\lambda = 1,0$ ; $P_0 = 0,1013$ МПа; $T_0 = 298$ К.

### Список литературы

- Eppensteiner S. Bright annealing technology for high – alloyed steel strip – a comparison of concepts // Heat processing. – 2015. – № 4. – P. 45–50.
- Martin P. Optimising performance, energy efficiency and greenhouse gas emissions // Iron & Steel Today. – November 2013. – P. 13–14.
- Energy balance sheets data 2013. Eurostat statistical book. – Luxembourg, 2015.
- Komori T., Yamagami N., Hara H. Design for blast furnace gas firing gas turbine. – [https://www.mhi.co.jp/power/news/sec1/pdf/2004\\_nov\\_04b.pdf](https://www.mhi.co.jp/power/news/sec1/pdf/2004_nov_04b.pdf) (accessed June 20, 2012).
- Omerbegovic K., Schalles D.G., Beichner F.L. Regenerative Ultra Low  $\text{NO}_x$  – Gichtgasbrenner in der Praxis // GasWarme Intern. – 2015. – № 6. – P. 63–67.
- Omerbegovic K., Schalles D. G., Beichner F.L. Regenerative blast furnace gas blastoflame ultra low  $\text{NO}_x$  burner // Heat Processing. – 2016. – № 1. – P. 65–68.
- Kuehne L., Neuhaus T., Rams H. Heibgaserzeuger fuer den Einsatz von niederkalorischen Gasen und Braunkohlenstaub // GasWaerme Intern. – 2016. – № 1. – S. 45–49.
- Technical data bulletins : Thermal applications. Hot gas generators // Loesche Innovative Engineering. [Web resource]. – Access mode: <http://www.loesche.com/aset/PageContent/Data/Multimedia/Brochures/Hot-Gas-Generators/pdf/201Thermal-ApplicationsHot-Gas-GeneratorEN.pdf>.
- Al-Halbouni A., Giese A., Leicher J., Goerner K., Schillingmann D., Schillingmann H., Huewelmann C. Burner system using entrained hot pyrolysis gas from biomass // Heat Proc. – 2015. – № 4. – P. 69–74.
- Fantuzzi M. Revamping of reheating furnaces // Heat Proc. – 2015. – № 4. – P. 51–57.
- Soroka B., Sandor P. Combined power and environmental optimization of the fuel type by reheating and thermal treatment processes // Proc. of the 21st World Gas Conference, 6–9 June 2000, Nice, France. – 15 p.
- Сорока Б.С., Корниенко А.В. Сравнительный энергоэкологический анализ использования альтернативных газовых топлив различного происхождения // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 7. – С. 105–112.
- Soroka B. Development of combined power and environmental fundamentals of natural gas substitution for alternative combustible gases // International Journal for a Clean Environment. – 2013. – Vol. 14, № 2–3. – P. 91–114.
- Weber E.J. Interchangeability of Fuel Gases. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices : First Edition, Second Printing, Section 12, Chapter 14. – N. Y. : The Industrial Press, 1966. – P. 12/239–12/252.
- Soroka B.S., Bershadskyi A.I. The Fuel Certification by Heat Engineering Characteristics // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – № 2. – С. 3–13.

16. Сорока Б.С., Кудрявцев В.С., Карабчиевская Р.С. Анализ эффективности использования топлива и энергии с применением математического и компьютерного моделирования // Сб. тр. конф. «Моделирование – 2008», Киев, 14–16 мая 2008 г. — Киев : Ин-т проблем моделирования в энергетике НАН Украины. — Т. 1. — С. 337–343.
17. Карп И.Н., Сорока Б.С., Дашевский Л.Д., Семернина С.Д. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах. — Киев : Техника, 1967. — 382 с.
18. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. — М. : Мир, 2002. — 461 с.
19. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М.Прохоров. — М. : Сов. энцикл., 1984. — 944 с.
20. Тепловой расчет котлов (норм. метод). — СПб. : НПО Центр. котлотехн. ин-та, 1998. — 259 с.
21. Stademann A. Gasbeschaffenheit als Herausforderung fur Industrie und Gewerbe // GasWarme Intern. — 2015. — № 4. — P. 45–49.

Поступила в редакцию 11.04.16

**Сорока Б.С.,** докт. техн. наук, **Воробйов М.В.,** канд. техн. наук, **Бершадський А.І.**

**Інститут газу НАН України, Київ**

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: boris.soroka@gmail.com

## **Економія природного газу при його заміні технологічними газами для опалення середньо- та високотемпературних печей. 1. Вплив характеристик низькокалорійних газів на витрати палива в печах**

Наведено класифікацію газових палив у відповідності з критеріями Eurostat. До категорії газових палив належать природний газ (NG) та вторинні вироблені чи утилізовані гази: доменний газ (BFG), коксовий газ (COG), а також гази, що виробляються на газових заводах. Останні згадані гази об'єднані в групу, поійменовану «технологічними газами» (process gases — PG). Виконано чисельний термодинамічний аналіз ефективності використання технологічних газів та їхніх сумішей в промислових печах з використанням рівняння ідеального газу. З єдиних ентальпійних позицій визначено основні теплотехнічні характеристики палив: теоретичні температури горіння та теплоти згорання — в залежності від складу суміші доменного газу з природним та коксовим. Запропоновано спосіб визначення витрат палива в рамках авторської (Сорока Б.С.) методології заміщення палив, що враховує 1-й та 2-й початок термодинаміки. За умови збереження потоку корисно сприйнятої повної ентальпії та врахування відповідного ККД використання палива виконано аналіз можливостей економії чи виникнення перевитрат природного газу (NG), а також потоку теплоти згорання природного газу в залежності від вмісту доменного газу в сумішах NG + BFG при заміні NG технологічними газами. Встановлено, що із збільшенням долі доменного газу в суміші з природним економія природного газу зростає, однак значно збільшуються перевитрати наявної теплової енергії суміші паливо : окислювач, зумовленої більш низькою теоретичною температурою та теплою згорання доменного газу у порівнянні з випадком використання чистого природного газу. Виконано аналіз економії палива за рахунок утилізації теплоти продуктів згорання (викидних газів з печі), що реалізується шляхом підігріву компонентів горіння: повітря-окислювача чи доменного газу. Із збільшенням долі доменного газу в суміші з природним підвищується роль підігріву палива NG + BFG стосовно впливу підігріву повітря на економію палива. Порівняно необхідні потоки наявної теплоти газоповітряних сумішей з урахуванням теплоти підігріву компонентів горіння (25, 250 та 400 °С). Дослідження проведені для двох температур печі: 800 та 1000 °С. Здійснено розрахунки заміни природного газу коксодоменною сумішшю з позицій оцінки зміни наявної теплоти вихідної суміші та теплоти згорання порівняно з такими при використанні чистого природного газу. *Бібл. 21, рис. 3, табл. 2.*

**Ключові слова:** альтернативне газове паливо, доменний газ, заміщення палив, коксовий газ, теоретична температура горіння, теплота згорання, термічна піч, економія природного газу, ентальпійний аналіз.

**Soroka B.S.**, *Doctor of Technical Sciences,*  
**Vorobiov M.V.**, *Candidate of Technical Sciences,* **Bershadskyi A.I.**  
**The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev**  
39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: boris.soroka@gmail.com

## **Natural Gas Saving by Replacement the Last for Process Gases while Heating Middle and High Temperature Furnaces. Part 1. Influence of Low-Calorie Gases Characteristics on Fuel Flow Rate in Furnaces**

In the paper the gas fuel classification has been advanced basing upon Eurostat's criteria. The category of «Gas fuels» includes the natural gas (NG) and derived or recovered gases: blast furnace (BFG), coke-oven (COG) and the gas works gas (GWG) but doesn't include the biogases. We unite the most wide-spread of mentioned notions like BFG and COG in group called «process gases» PG.

The thermodynamic analysis of application the low-calorific gas fuels and fuel mixtures in the industrial furnaces has been carried out by using the ideal gas equation. The main heat engineering characteristics of the process gases: theoretical combustion temperature  $T_T$  and combustion heat  $Q_l$  – have been calculated grounded upon general enthalpian attitudes for any fuels and in dependence on composition of the mixed fuels: BFG with natural gas or BFG with COG.

Evaluation of opportunities the natural gas saving by transfer from NG as a fuel for mixed NG + PG fuel by heating the furnaces has been performed. The technique of definition the substituting fuel flow rate has been proposed in frame of author's methodology of fuel interchangeability. The problem of saving or over expenditure the NG flow rate along with change of available and of combustion heat for mentioned gas fuel mixtures (NG with BFG and COG + BFG) has been studied and analysed.

The methodology of the fuels replacement has been advanced. Instead of traditional approach with the basic condition of conservation the heat flux introduced into the furnace by any fuel combustion, the novel condition of conservation the useful heat absorbed by the furnace charge is proposed by author (B. Soroka).

It means an assumption the condition of invariable flux of the useful total enthalpy to be attained in case of fuel replacement and account of the furnace (fuel utilization) efficiency.

An analysis of fuel saving by flue gases heat recovery has been fulfilled for the case of preheating the initial combustion components: an air or/and BFG. It has been stated that the role of fuel preheating for NG saving is increasing with respect to opportunities of the proper impact of an air flow as the share of BFG in the mixture of fuel gases will grow.

The calculations have been carried out for the cases of furnace operation temperatures of 800 and 1000 °C by conditions of cold initial combustion components: fuel gases and an air-oxidant (25 °C) and under preheating one or both components (250 and 400 °C). It was stated that saving of NG is increasing by enhancement the portion of BFG in fuel mixture with NG while the working (furnace operation) temperature is of moderate level. For eligible cases the required rates of heat energy fluxes: for available heat (chemical and physical (sensible) energy of initial combustion components: fuel and air-oxidant) and for combustion heat – have been evaluated.

The higher is the share of BFG in fuel mixture with NG the bigger are the required heat fluxes resulting in overexpenditure for the last values in comparison with heat consumption for the cases of clean natural gas using by furnace operation while lowering the NG portion in mixed fuel gas.

The calculations on replacement the natural gas for mixture of COG with BFG have been carried out by means of evaluation an available heat content and of combustion heat

through the values of excess total enthalpy flows of initial combustion components: gas fuel and an air-oxidant. The similar procedure on comparison the combustion heat for mentioned fuels has been fulfilled as well. *Bibl. 21, Fig. 3, Table 2.*

**Key words:** alternative gas fuel, blast furnace gas, coke oven gas, combustion heat, enthalpy analysis, fuel replacement, heat-treatment furnace, substitution of fuels, natural gas saving, theoretical combustion temperature.

### References

1. Eppensteiner S. Bright annealing technology for high – alloyed steel strip – a comparison of concepts. *Heat Processing*, 2015, (4), pp. 45–50.
2. Martin P. Optimising performance, energy efficiency and greenhouse gas emissions. *Iron & Steel Today*, November 2013, pp. 13–14.
3. Energy balance sheets data 2013. *Eurostat statistical book*. Luxembourg, 2015.
4. Komori T., Yamagami N., Hara H. Design for blast furnace gas firing gas turbine. – [https://www.mhi.co.jp/power/news/sec1/pdf/2004\\_nov\\_04b.pdf](https://www.mhi.co.jp/power/news/sec1/pdf/2004_nov_04b.pdf) (accessed June 20, 2012).
5. Omerbegovic K., Schalles D.G., Beichner F.L. Regenerative Ultra Low NO<sub>x</sub> – Gichtgasbrenner in der Praxis, *GasWaerme Intern.*, 2015, (6), pp. 63–67.
6. Omerbegovic K., Schalles D.G., Beichner F.L. Regenerative blast furnace gas blastoflame ultra low NO<sub>x</sub> burner. *Heat Processing*, 2016, (1), pp. 65 – 68.
7. Kuehne L., Neuhaus T., Rams H. Heibgaserzeuger fuer den Einsatz von niederkalorischen Gasen und Braunkohlenstaub, *GasWaerme Intern.*, 2016, (1), pp.45–49. (De)
8. Technical data bulletins: Thermal applications. Hot gas generators. *Loesche Innovative Engineering*. – [Web resource]. – Access mode: <http://www.loesche.com/assets/PageContent/Data/Multimedia/Brochures/Hot-Gas-Generators/pdf/201Thermal-ApplicationsHot-Gas-GeneratorEN.pdf>
9. Al-Halbouni A., Giese A., Leicher J., Goerner K., Schillingmann D., Schillingmann H., Huewelmann C. Burner system using entrained hot pyrolysis gas from biomass, *Heat Processing*, 2015, (4), pp. 69–74.
10. Fantuzzi M. Revamping of reheating furnaces, *Heat Processing*, 2015, (4), pp. 51–57.
11. Soroka B., Sandor P. Combined power and environmental optimization of the fuel type by reheating and thermal treatment processes. *Proc. of the 21<sup>st</sup> World Gas Conference*, Nice, France, 6–9 June, 2000, 15 p.
12. Soroka B.S., Kornienko A.V. Comparative energy and environmental analysis of use of alternative gas fuels of various origins, *International Scientific Journal «Alternative Energy and Ecology» (ISJAE)*, 2012, (7), pp. 105–112. (Rus.)
13. Soroka B. Development of combined power and environmental fundamentals of natural gas substitution for alternative combustible gases, *International Journal for a Clean Environment*, 2013, 14 (2–3), pp. 91–114.
14. Weber E.J. Interchangeability of Fuel Gases. *Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices, First Edition, Second Printing*. Section 12, Chapter 14. – N. Y. : The Industrial Press, 1966, pp. 12/239–12/252.
15. Soroka B.S., Bershadskiy A.I. The Fuel Certification by Heat Engineering Characteristics, *[Energy Technologies and Resource Saving]*, 2014, (2), pp. 3–13.
16. Soroka B.S., Kudryavtsev V.S., Karabchievskaya R.S. Analysis of efficiency of use of fuel and energy by using mathematical and computer modeling, *Coll. Conference Proceedings «Modeling – 2008»*, Kiev, May 14–16, 2008, Kiev : Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine, I, pp. 337–343. (Rus.)
17. Karp I.N., Soroka B.S., Dashevskii L.D., Semernina S.D. The products of combustion of natural gas at high temperatures, Kiev : Technika, 1967, 382 p. (Rus.)
18. Pryhozhyn I., Kondepudi D. Modern thermodynamic. *From Heat Engines to Dissipative Structures*, Moscow : Mir, 2002, 461 p. (Rus.)
19. Physical Encyclopedic Dictionary / Chief editor A.M.Porokhov, Moscow : Sovetskaya Encyclopedia, 1984, 944 p. (Rus.)
20. Heat Calculation of boilers (norms method). Sankt-Peterburg : NPO CKTI, 1998, 259 p. (Rus.)
21. Stademann A. Gasbeschaffenheit als Herausforderung fur Industrie und Gewerbe. *GasWaerme Intern*, 2015, (4), pp. 45–49.

Received April 11, 2016