

## Топливо и энергетика

УДК 614.71:620.9:662.76

**Сорока Б.С.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, проф., **Шандор П.<sup>2</sup>**, PhD,  
**Воробьев Н.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Карабчиевская Р.С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> **Институт газа НАН Украины, Киев**

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: boris.soroka@gmail.com

<sup>2</sup> **Optimum Energo-Ecology Ltd., Дунайварош, Венгрия**

### **Экономия природного газа при его замене технологическими газами для отопления средне- и высокотемпературных печей. 2. Численное определение расхода, энергетических и экологических характеристик использования топлива при задании его типа и состава**

В рамках новой авторской методологии замещения топлив, учитывающей 2-е начало термодинамики наряду с 1-м, предложен способ определения требуемого расхода топлива и соответствующей теплоты его сгорания. Развита методика расчета требуемой располагаемой энтальпии топливоокислительной смеси. Рассмотрено влияние замены топлива на образование вредных веществ при сжигании топлив в печах. В основу концепции замены топлив положено условие сохранения потока полезно использованной полной энтальпии и учета КПД использования топлива. Выполнены численные оценки возможности экономии или возникновения перерасхода природного газа (NG). Проведены расчеты потоков располагаемой теплоты исходной топливовоздушной смеси и теплоты сгорания анализируемых низкокалорийных топлив в зависимости от содержания доменного газа (BFG) в смесях с природным (NG + BFG) и коксовым (COG + BFG) газами при замене природного газа технологическими газами. Наряду с расходными и энергетическими характеристиками использования смешанных топлив выполнены оценки образования удельных выбросов вредных веществ: диоксида углерода  $C_{CO_2}^m$  как парникового газа и оксидов азота  $C_{NO_x}^m$  как токсичного вещества. *Библ. 12, рис.7, табл. 2.*

**Ключевые слова:** альтернативное газовое топливо, вторичные энергоресурсы, доменный газ, замещение топлив, коксовый газ, располагаемая тепловая энергия, термическая печь, экономия природного газа, удельные выбросы вредных веществ.

### Место технологических газов в проблеме использования вторичных энергоресурсов

Использование вторичных энергоресурсов (ВЭР) и энерготехнологическое комбинирование в промышленности позволяют существенно сократить расход первичной энергии и ее носителей. При этом ВЭР разделяются на три основные группы: горючие ВЭР, тепловые ВЭР, ВЭР избыточного давления [1].

Горючие (топливные) ВЭР, производимые в печах металлургической, химической и нефтехимической промышленности, отходы деревообработки и целлюлозно-бумажной промышленности относятся к первой из упомянутых групп ВЭР. К их числу принадлежат технологические горючие газы, эффективность использования которых рассматривается в настоящей работе.

До последнего времени было принято считать, что технологические газы как вторичные энергоресурсы формируются энергетическим потенциалом продукции, отходов, побочных и промежуточных продуктов, образующихся в технологических агрегатах (установках, процессах), который не срабатывает в самом агрегате, но может быть частично или полностью использован для энергоснабжения других агрегатов (процессов) [1].

Со схожих позиций ВЭР представляются как энергетические отходы внешнего использования [2].

Работами последних лет доказана несостоятельность положения об использовании упомянутых газов как ВЭР только для энергоснабжения других агрегатов (процессов). Так, в условиях металлургического комбината «DUNAFERR» (Венгрия) в основных технологических печах используются все наличные горючие газы в различных соотношениях, в том числе газ, полученный в рассматриваемой печи (доменный, конвертерный), используется для энергоснабжения этой же печи [3].

Доменный газ (blast furnace gas — BFG), получаемый как бросовый продукт в ходе доменного процесса, принадлежит к числу наиболее распространенных низкокалорийных топлив. Поскольку доменные воздухонагреватели обеспечивают поступление в печь значительной доли подаваемой тепловой энергии, доменный газ используется для его сжигания в воздухонагревателях [4]. Таким образом, доменный газ в рассматриваемом случае, будучи типичным вторичным энергоресурсом, используется в том же агрегате, где был произведен.

Другим примером использования ВЭР в самом агрегате, где этот продукт был получен, может служить использование разработанной

компаниями Siemens VAI и Linde технологии использования рециркуляции выбросных газов воздухоподогревателя в доменном процессе (Stove Waste Gas Recycle Technology) [4]. При этом часть выбросных газов рециркулирует и смешивается с кислородом перед сжиганием. В этом процессе для обеспечения требуемых температур под куполом печи доменного воздухонагревателя (stove) взамен использования высокотемпературного и более дорогого коксового газа сжигается доменный газ с кислородом в сочетании с рециркуляцией продуктов сгорания.

В нашей статье [5] была представлена оригинальная авторская методика численного термодинамического анализа эффективности использования в промышленных печах технологических газов и их смесей, состояние которых подчиняется уравнению идеального газа. С единых энтальпийных позиций при этом были

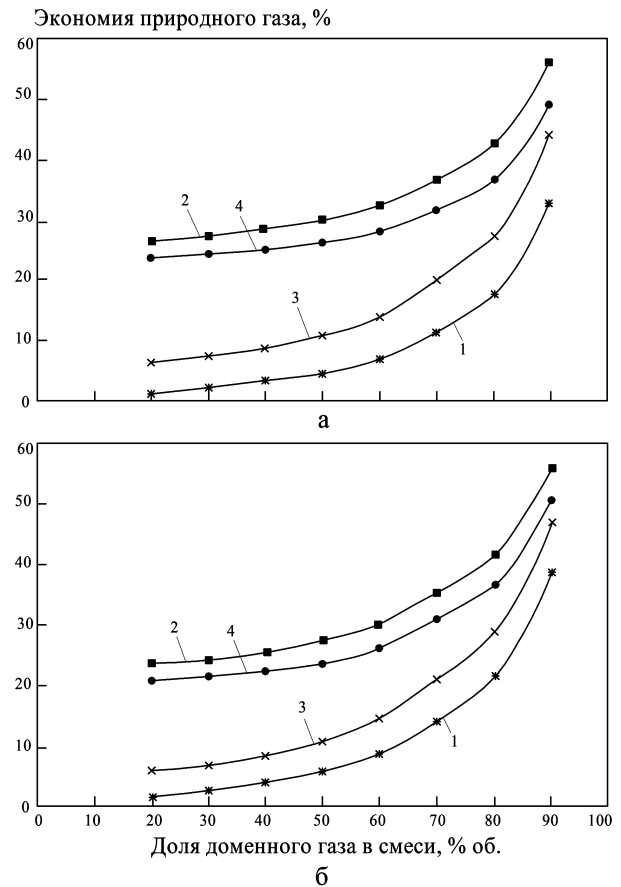


Рис. 1. Экономия природного газа  $\delta B_{NG}$  при замене чистого природного газа смесью доменного и природного газов в зависимости от доли доменного газа в смеси с природным газом: 1 — «холодная» топливоокислительная смесь,  $t_{mix} = 25^\circ C$ ; 2 — «холодное» топливо,  $t_f = 25^\circ C$ ,  $t_a = 400^\circ C$ ; 3 — «горячее» топливо,  $t_f = 400^\circ C$ ,  $t_a = 25^\circ C$ ; 4 — «горячая» топливоокислительная воздушная смесь,  $t_{mix} = 400^\circ C$ . Технологическая температура печи  $t_{fur}$ ,  $^\circ C$ : а — 1000; б — 800.

определены основные теплотехнические характеристики топлив: теоретические температуры горения и теплоты сгорания — в зависимости от состава смесей доменного газа с природным и коксовым газами.

**Численное определение экономии топлива, его расходов и теплоты при замещении природного газа**

Характеристики рассматриваемых газов, а также методика определения расхода топлива, экономии природного газа и затраченной тепловой энергии топлива при замещении природного газа представлены в работе [5].

В табл.1 и на рис.1 приведены расчетные данные по экономии природного газа  $\delta B_{NG}$  при его замещении доменным газом в зависимости от доли доменного газа в низкокалорийном газе (смеси топливных газов). Экономия располагаемой тепловой энергии исходной топливовоздушной смеси (потока энтальпии)  $\delta Q_{f,av}$  при замещении природного газа доменным показана на рис.2. Расчеты выполнены в соответствии с представленным нами энтальпийным подходом [5] в зависимости от температуры подогрева топлива  $T_f$  и воздуха  $T_a$ .

Приведенные данные указывают на то, что при умеренном (до 20–50 %) добавлении доменного газа к природному газу в условиях фиксированного тепловосприятия (полезной теплоты, воспринятой в печи) и стандартных температур компонентов горения ( $T_a = T_f = 298$  К) обеспечивается сокращение расхода природного газа  $\delta B_{NG}$  менее 5 %. По мере увеличения доли  $D_{BFG}$  в смеси с NG при стандартных условиях исходной смеси  $\delta B_{NG}$  возрастает, причем в случае  $T_{fur} = 800$  °С больше, чем при  $T_{fur} = 1000$  °С. При нагреве обоих компонентов горения экономия  $\delta B_f$  в случае  $T_{fur} = 1000$  °С обычно стано-

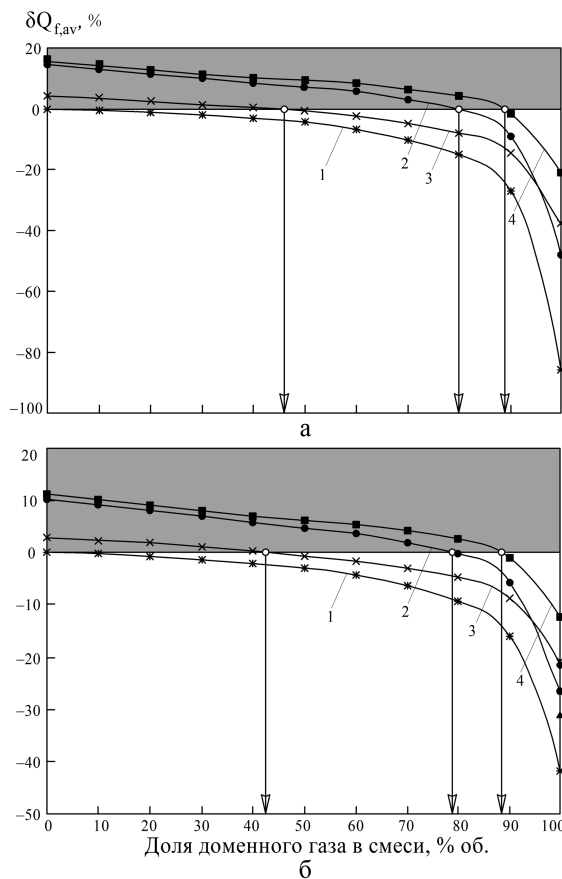


Рис.2. Изменение располагаемой тепловой энергии исходной топливовоздушной смеси  $\delta Q_{f,av}$  {экономия (+); перерасход (-)} в зависимости от объемной доли доменного газа в смеси с природным при замене природного газа смесью доменного и природного газов. Область экономии тепловой энергии затонирована. Обозначения как на рис.1.

вится выше, чем при  $T_{fur} = 800$  °С (см. табл.1). По мере приближения состава топливной смеси к чисто доменному газу может измениться влияние  $T_{fur}$ .

**Таблица 1. Экономия природного газа при отоплении печи смесью доменного газа (BFG) с природным газом (NG) по сравнению с использованием чистого природного газа**

Состав топлива, % (об.)		Объемное стехиометрическое число $L_{st}, \text{нм}^3/\text{нм}^3$	Температурные условия исходных компонентов: топливо ( $t_f$ )/воздух ( $t_a$ ), °С						
NG	BFG		$t_f : t_a = 25/25$	$t_f : t_a = 25/250$	$t_f : t_a = 250/25$	$t_f : t_a = 250/250$	$t_f : t_a = 25/400$	$t_f : t_a = 400/25$	$t_f : t_a = 400/400$
100	0	9,67	-	-	-	-	-	-	-
80	20	7,88	1,4/1,7	16,2/14,3	4,5/4,3	18,1/15,9	23,9/21,1	6,5/6,0	26,7/23,5
60	40	6,08	3,4/4,4	17,6/15,6	6,5/6,6	19,8/17,9	25,2/22,6	8,8/8,5	28,5/25,5
50	50	5,18	4,9/6,4	19,0/17,9	8,4/9,2	21,5/20,1	26,5/24,4	11,5/11,3	30,1/27,6
40	60	4,28	7,1/9,2	20,9/20,4	11,3/12,5	23,9/22,9	28,3/26,7	14,1/14,8	32,5/30,4
20	80	2,50	17,6/21,8	30,2/31,5	23,3/26,1	34,4/34,9	36,9/36,9	27,2/29,1	42,6/41,8
10	90	1,59	32,8/38,8	43,5/46,4	40,0/43,8	48,6/50,3	49,1/50,6	44,2/46,9	55,9/56,1

Примечание. Технологическая температура  $t_{fl} = t_{fur} = 1000$  (числитель)/800 (знаменатель), °С.

**Таблица 2. Экономия располагаемой теплоты топливовоздушного потока при отоплении печи смесью доменного газа (BFG) с природным газом (NG) по сравнению с использованием чистого природного газа**

Состав топлива, % (об.)		Объемное стехиометрическое число $\frac{L_{st}}{HM^3/HM^3}$	Экономия (+)/перерасход (-) теплоты по отношению к природному газу при $t_f : t_a, ^\circ C$						
NG	BFG		$t_f : t_a = 25/25$	$t_f : t_a = 25/250$	$t_f : t_a = 250/25$	$t_f : t_a = 250/250$	$t_f : t_a = 25/400$	$t_f : t_a = 400/25$	$t_f : t_a = 400/400$
100	0	9,67	-	-	-	-	-	-	-
80	20	7,88	-1,08/-0,76	+6,63/+4,50	+0,76/+0,61	+7,56/+5,13	+11,45/+8,14	+2,97/+2,48	+12,80/+9,08
60	40	6,08	-2,92/-1,90	+4,57/+2,96	-1,27/-0,85	+5,77/+3,76	+8,60/+5,70	-0,07/-0,08	+10,34/+6,9
50	50	5,18	-4,47/-2,93	+3,27/+2,05	-2,5/-1,7	+4,67/+2,98	+7,43/+4,84	-1,13/-0,81	+9,45/+6,23
40	60	4,28	-6,75/-4,21	+1,55/+0,94	-4,13/-2,7	+3,28/+2,08	+5,90/+3,83	-2,45/-1,63	+8,36/+5,50
20	80	2,50	-15,0/-9,20	-5,37/-3,40	-10,64/-6,60	-2,16/-1,38	-0,24/-0,15	-7,70/-4,82	+4,18/+2,74
10	90	1,59	-27,4/-16,10	-15,40/-9,40	-19,3/-11,6	-9,60/-6,00	-9,00/-5,60	-14,50/-8,90	-1,36/-0,87
0	100	0,70	-85,60/-42,2	-60,7/-32,05	-52,82/-28,50	-38,20/-21,57	-48,30/-26,50	-38,10/-21,5	-20,94/-12,50

Примечание. Технологическая температура  $t_{fl} = t_{fur} = 1000$  (числитель)/800 (знаменатель),  $^\circ C$ .

Экономия природного газа возрастает при нагреве компонентов горения, при этом с увеличением доли доменного газа значительно увеличивается объем смесевое топлива (до 6–7 раз) и определенное увеличение расхода потребного воздуха горения и, следовательно, потока продуктов сгорания. В этой связи замена топлива требует не только пересмотра конструкции горелочных устройств, но и влияет на другие узлы печи (дутьевые, дымоудаления).

Из рис.2 видно, что экономия располагаемой тепловой энергии исходной топливо-воздушной смеси  $\delta Q_{f,av}$  при переходе от природного газа к природнодоменной смеси возможна только в случае подогрева воздуха горения и (или) самого топлива (смеси газов). Подогрев до  $400^\circ C$  даже обоих исходных компонентов горения не позволяет получать экономию располагаемой тепловой энергии топливовоздушной смеси в случае чистого доменного газа или при использовании смесей с большим (> 80 %) содержанием доменного газа. Отметка «0» на оси ординат соответствует точкам пересечения каждой из кривых (2–4), справа и вниз от которых наблюдается область перерасхода тепловой энергии потока технологического топлива и воздуха ( $\delta Q_{f,av} < 0$ ).

Более детально количественная информация о влиянии замены природного газа доменным на изменение располагаемой тепловой энергии топливовоздушной смеси может быть получена при анализе табл.2.

Полная замена природного газа доменным всегда сопровождается перерасходом располагаемой тепловой энергии в диапазоне изменения температур подогрева  $t_a < 400^\circ C$ ,  $t_f < 400^\circ C$ . В то же время для смесей с долей доменного га-

за  $D_{BFG} < 60-80\%$  можно отметить экономию  $\delta Q_{f,av}$  в случае подогрева компонентов горения. Чем выше технологическая температура печи  $T_{fur}$ , тем больше будет перерасход затраченной располагаемой тепловой энергии топлива при замещении природного газа (ПГ) доменным. Максимальный перерасход соответствует слу-

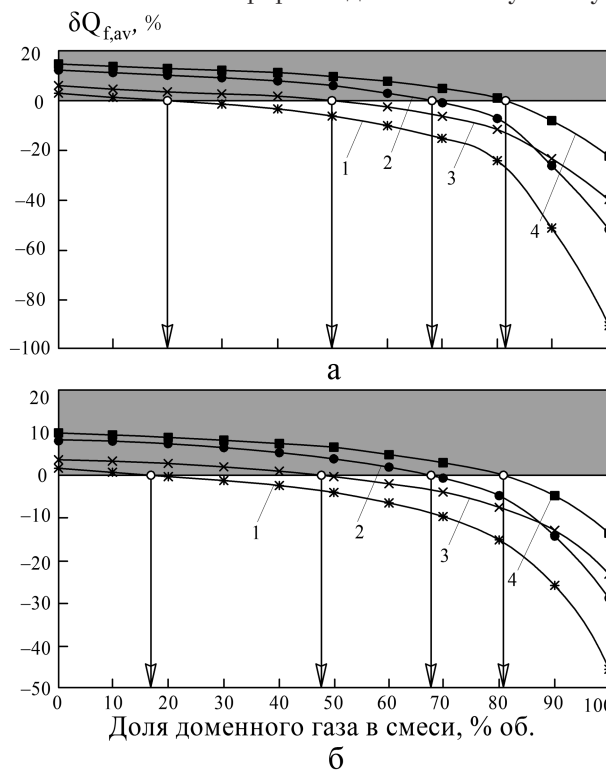


Рис.3. Изменение располагаемой тепловой энергии исходной топливовоздушной смеси  $\delta Q_{f,av}$  {экономию (+); перерасход (-)} в зависимости от объемной доли доменного газа в смеси с коксовым газом при переходе на использование коксодоменной смеси. Обозначения как на рис.1.

чаю использования холодной доменно-воздушной смеси и составляет  $(-85,6)$  % при температуре уходящих газов  $1000$  °С, и  $(-42,2)$  % при  $800$  °С. Аналогичные  $\delta Q_{f,av}$  результаты будут и для изменения потока теплоты сгорания исходной топливовоздушной смеси  $Q_{f,comb}$  [5].

На рис.3 показано изменение располагаемой тепловой энергии исходной топливно-воздушной смеси при переходе от использования ПГ на сжигание коксодоменной смеси. Расчеты проведены по сравнению со случаем сжигания природного газа с холодным воздухом.

В рассматриваемом случае экономия располагаемой теплоты по сравнению с использованием природного газа наблюдается при доле доменного газа в коксодоменной смеси до  $80$  % и одновременном подогреве обоих компонентов горения (воздуха и газа либо топливоокислительной смеси в целом) до  $400$  °С. Можно отметить незначительную экономию тепловой энергии топливовоздушного потока  $\delta Q_{f,av} = +0,17...+0,25$  % по сравнению с природным газом, однако при содержании доменного газа в смеси более  $80$  % будет иметь место перерасход потока располагаемой тепловой энергии топлива и воздуха, затрачиваемых для реализации процесса с использованием коксодоменной смеси ( $\delta Q_{f,av} < 0$ ).

Таким образом, для обеспечения экономии потока располагаемой тепловой энергии, затрачиваемой в случае использования природного газа, при замещении топлива должен быть проведен комплекс мер для организации подогрева воздуха горения и (или) низкокалорийного топлива. Проведенный анализ влияния подогрева воздуха ( $t_a < 400$  °С) и топлива ( $t_f < 400$  °С) показал, что даже при относительно небольшом подогреве воздуха и топлива ( $< 250$  °С) обеспечивается экономия затраченной тепловой энергии потока топливовоздушной смеси при работе на природнодоменной и коксодоменной смесях с содержанием доменного газа до  $60$  % (см. табл.2).

#### **Оценка экологических характеристик при замещении природного газа технологическими газами**

Оценка образования вредных веществ – важнейший этап сопоставления характеристик топлив при выборе и оптимизации составов используемых топлив. К основным вредным выбросам при сжигании газового топлива относят  $NO_x$  как важнейшие токсичные компоненты продуктов сгорания и  $CO_2$  как основной парниковый газ.

Объективный анализ экологических последствий замены используемого топлива должен базироваться на экспериментально определенных показателях токсичности выбросов, полученных при использовании различных топлив в условиях их сжигания с помощью одних и тех же горелочных устройств.

Именно поэтому особые требования предъявляются к пилотным установкам для испытаний топочных систем энергетического оборудования. В качестве моделирующих устройств крупнейших котлоагрегатов фирмы Babcock&Wilcox Co. используется, например,  $100$  MBtu/h =  $29,3$  МВт установка, где исследуются экологические аспекты процессов горения в котле. Это позволяет практически в натуральных условиях или при значительных масштабных факторах, обеспечить индустриальное приближение («... at or near commercial size range or reasonable scale up factors to commercial systems»).

Еще более впечатляющая  $70$  МВт установка, позволяющая обеспечить полномасштабное моделирование множества систем сжигания и образования вредных веществ в топочных устройствах котельных агрегатов, сооружена и используется компанией ABB C-E Services Inc.

Разумеется, полагаться на такие практически натурные испытания можно только в отдельных случаях. По этой причине для сравнения образования вредных выбросов в рамках нашей методологии замены топлив [6] предлагается оценка по предельным – термодинамически равновесным концентрациям вредностей.

1. Энергоэкологический подход предполагает не само по себе сочетание энергетического и экологического анализа процесса использования топлива и рассматриваемого топливоиспользующего агрегата. Энергоэкологию следует понимать как науку об энергетической эффективности использования топлива в условиях экологических ограничений, а также об экологических характеристиках процессов и агрегатов в условиях энергетически эффективного использования топлива.

Соответствующие критерии рассматриваются в монографии [7] применительно к образованию твердых и газообразных загрязнений для производств электрической тепловой энергии и пара, нефтепереработки, цементной промышленности и др. В этой работе часовое образование вредных веществ соотносится с часовым производством энергии или готовой технологической продукции.

Металлургические предприятия являются источником значительных выбросов основных парниковых газов в виде диоксида углерода. В

работе [8] рассмотрен механизм формирования  $\text{CO}_2$  в ходе пяти типов металлургических процессов, генерирующих образование  $\text{CO}_2$ . Предложены расчетные зависимости для определения выхода  $\text{CO}_2$ .

Удельные выбросы, отнесенные к единице полезной тепловой энергии, воспринятой в процессах нагрева металла, в качестве базового экологического критерия для нагревательных печей рассматриваются в монографии [9].

С этих же энергоэкологических позиций автором настоящей работы (Сорока Б.С.) впервые в мировой литературе был предложен метод определения удельных на единицу полезной энергии выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$ , основанный на определении равновесных составов и энергетических характеристик (полных энтальпий) продуктов горения [6, 10].

2. Новая политика в отношении сохранения глобального климата оговаривается документами 21-й сессии Конференции сторон (КС) рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКООНИК), проведенной в Париже 30 ноября – 12 декабря 2015 г. и подписанной президентами государств (в том числе Украины). Итоговый документ, подготовленный сторонами, – соглашение «Рамочная конвенция об изменении климата», начало утверждения которого планируется в 2016 г., а вступление в действие документа – в 2020 г. [11].

Общая идея документа – недопущение повышения температуры земной атмосферы больше, чем на  $1,5\text{ }^\circ\text{C}$  (до  $2\text{ }^\circ\text{C}$ ), что должно осуществляться в результате постепенного сокращения потребления энергии и перехода к возобновляемым источникам энергии. Процесс выполняется в соответствии с национальными программами.

Конвенция закрепляет необходимость подготовки к существенному снижению потребления энергии и обеспечению сопутствующего сокращения выбросов, прежде всего  $\text{CO}_2$  как основного парникового газа (низкоуглеродная энергетика (low-carbon power)) после 2020 г. Внедрение проектов по сокращению влияния выбросов  $\text{CO}_2$  увязывается с развитием экономики и промышленности отдельных стран.

В документе устанавливается размер помощи развивающимся странам на программы борьбы с климатическими изменениями на уровне 100 млрд долл./год после вступления в действие упомянутой конвенции в 2020 г.

3. До последнего времени выбросы  $\text{CO}_2$  и торговля квотами на их выбросы регламентировались Киотским Протоколом [12] – международным соглашением об ограничении выбросов

в атмосферу парниковых газов, который был принят 11 декабря 1997 г., начало действия – 16 февраля 2005 г. Украина ратифицировала Киотский Протокол 04 февраля 2004 г. Киотский Протокол входит в Рамочную конвенцию ООН об изменении климата 1992 г.

Для анализа влияния состава топливоокислительной смеси на образование вредных веществ: оксидов азота  $\text{NO}_x$  как основных токсичных газов и  $\text{CO}_2$  как основного парникового газа – при сжигании смешанного топлива был использован **метод энергоэкологического анализа**, развитый проф. Б.С.Сорокой. Суть его состоит в определении удельного выхода  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$  по данным расчетов термодинамически равновесного состава и свойств продуктов сгорания, а также при учете при этом КПД использования топлива  $\eta_f$ .

Удельный выход  $\text{CO}_2$  ( $C''_{\text{CO}_2}$ ) определяется через концентрацию  $[\text{CO}_2]$  при температуре окружающей среды  $T_{\text{atm}}$ , либо  $[\text{CO}_2] + [\text{CO}]$  на завершающих стадиях факельного процесса, при любой температуре  $T$  продуктов сгорания:  $p_{\text{CO}_2}(T) + p_{\text{CO}}(T) \approx p_{\text{CO}_2}(T_{\text{atm}})$  при  $T_{\text{atm}} \leq T \leq T_T$ , поскольку при повышенных температурах, в частности, при теоретической температуре горения  $T_T$  отмечается существенная диссоциация продуктов.

При временах, превышающих характерное время горения,  $[\text{CO}_2]$  следует за термодинамически равновесной концентрацией, в том числе при  $T > T_{\text{atm}}$  происходит рекомбинация продуктов горения.

Что касается  $[\text{NO}_x]$ , то поскольку их основная составляющая в продуктах сгорания –  $\text{NO}$  – образуется на пике температур горящего факела [9], то при оценочных расчетах для  $\text{NO}_x$  принимаются:  $p_{\text{NO}}(T_T) + p_{\text{NO}_2}(T_T) \approx p_{\text{NO}_x}(T) \approx p_{\text{NO}_x}(T_{\text{atm}})$ . Это обусловлено также «замораживанием»  $\text{NO}_x$  при  $T_{\text{atm}} \leq T \leq T_T$ .

Для оценочного определения и сравнения выбросов оксидов азота  $C''_{\text{NO}_x}$  и диоксида углерода  $C''_{\text{CO}_2}$ , отнесенных к единице полезно воспринятой теплоты, использовались следующие расчетные зависимости:

$$C''_{\text{CO}_2} = \frac{10^{-2} D_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2}}{(\Delta I_{\text{г,Т}} - \Delta I_{\text{г,ex}}) M_{\text{г,Т}}}; \quad (1)$$

$$C''_{\text{NO}_x} = \frac{10^{-2} (D_{\text{NO}} M_{\text{NO}} + D_{\text{NO}_2} M_{\text{NO}_2})}{(\Delta I_{\text{г,Т}} - \Delta I_{\text{г,ex}}) M_{\text{г,Т}}}, \quad (2)$$

где  $C''_X$  – удельный выход компонента  $X \equiv \text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ),  $\text{CO}_2$ , отнесенный к единице полез-

ной теплоты, кг/кДж;  $D_X$  — объемное содержание компонента X (концентрация объемная, молярная), % (об.); для  $CO_2$  — при 298 K, для  $NO_x$  — при  $T_T$ ;  $M_X$  — молярная масса (для компонента X и условная для продуктов сгорания (индекс g) при теоретической температуре горения  $T_T$ );  $\Delta I_{g,T}$ ,  $\Delta I_{g,ex}$  — полная избыточная энтальпия 1 кг продуктов сгорания — при  $T_T$  и температуре уходящих продуктов сгорания  $T_{g,ex}$ , принимаемой равной технологической температуре соответственно.

Обе представленные характеристики (1) и (2) являются энергоэкологическими, ибо дают экологическую оценку используемого типа топлива по отношению к единице полезно использованной в агрегате тепловой энергии, то есть с учетом КПД агрегата  $\eta_H$  — КПД использования располагаемой тепловой энергии топливо-окислительной смеси

$$(\Delta I_{g,T} - \Delta I_{g,ex}) = \Delta I_{g,T} \eta_H. \quad (3)$$

На рис.4 представлено изменение  $C''_{CO_2}$  в зависимости от доли  $D_{BFG}$  в смеси с природным газом при замещении природного газа доменным с учетом температуры подогрева компонентов горения. Видно, что увеличение доли доменного газа в смеси резко увеличивает вы-

бросы диоксида углерода  $C''_{CO_2}$  на единицу полезной тепловой энергии.

В основной области изменения концентрации доменного газа в смеси топлив  $0 < D_{BFG} < (75-80) \%$  (об.) достаточно слабо и полого меняет  $C''_{CO_2}$ :

$$\frac{\partial C''_{CO_2}}{\partial D_{BFG}} > 0; \frac{\partial^2 C''_{CO_2}}{\partial D_{BFG}^2} > 0, \quad (4)$$

а на участке  $(75-80) < D_{BFG} < 100 \%$  (об.) происходит существенное изменение тренда в сторону ухудшения парникового воздействия смешанного топлива, обогащенного доменным газом.

Изменение равновесных удельных концентраций оксидов азота  $C''_{NO_x}$  на единицу полезной тепловой энергии в зависимости от доли доменного газа  $D_{BFG}$  в смешанном газе при замещении природного газа доменным и при учете температуры подогрева компонентов горения представлено на рис.5. Так как доменный газ имеет намного более низкую температуру горения по сравнению с природным газом [5], то увеличение его доли в смеси топлив приводит к значительному снижению образования  $NO_x$ . При этом наблюдается тенденция, противоположная тренду изменения — монотонное прогрессивно нарастающее снижение  $C''_{NO_x}$  при росте  $D_{BFG}$ :

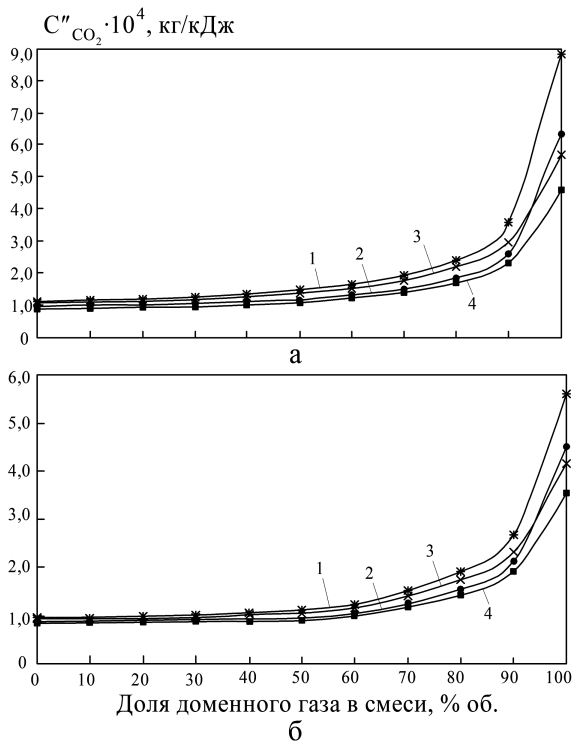


Рис.4. Зависимость отнесенных к единице полезной теплоты выбросов диоксида углерода  $C''_{CO_2}$  от доли доменного газа в смеси с природным газом. Обозначения как на рис.1.

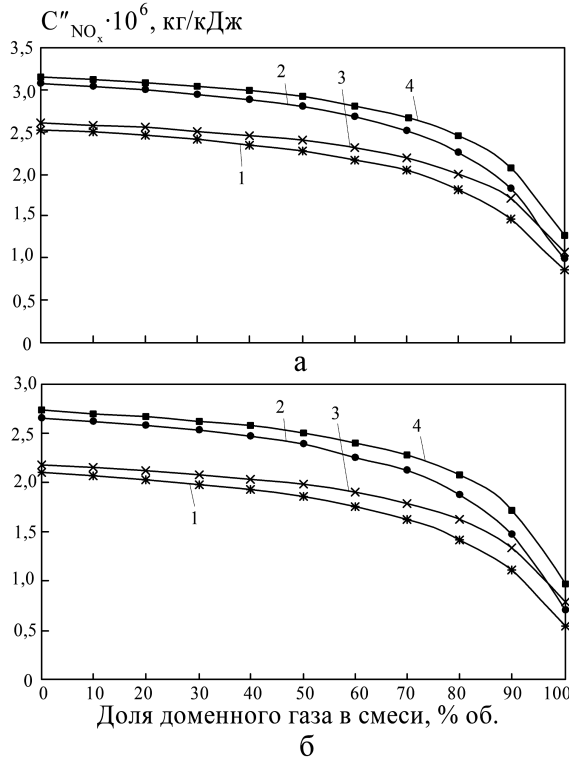


Рис.5. Зависимость отнесенных к единице полезной теплоты выбросов оксидов азота  $C''_{NO_x}$  от доли доменного газа в смеси с природным газом. Обозначения как на рис.1.

$$\frac{\partial C''_{\text{NO}_x}}{\partial D_{\text{BFG}}} < 0; \frac{\partial^2 C''_{\text{NO}_x}}{\partial D_{\text{BFG}}^2} < 0. \quad (5)$$

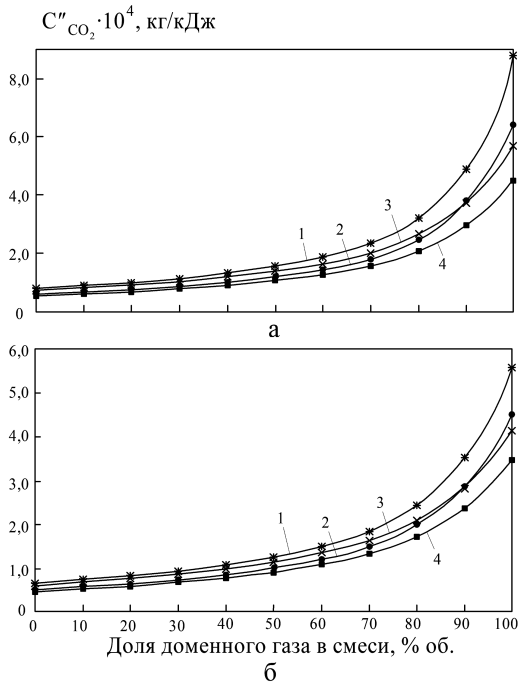


Рис.6. Зависимость отнесенных к единице полезной теплоты выбросов диоксида углерода  $C''_{\text{CO}_2}$  от доли доменного газа в смеси с коксовым. Обозначения как на рис.1.

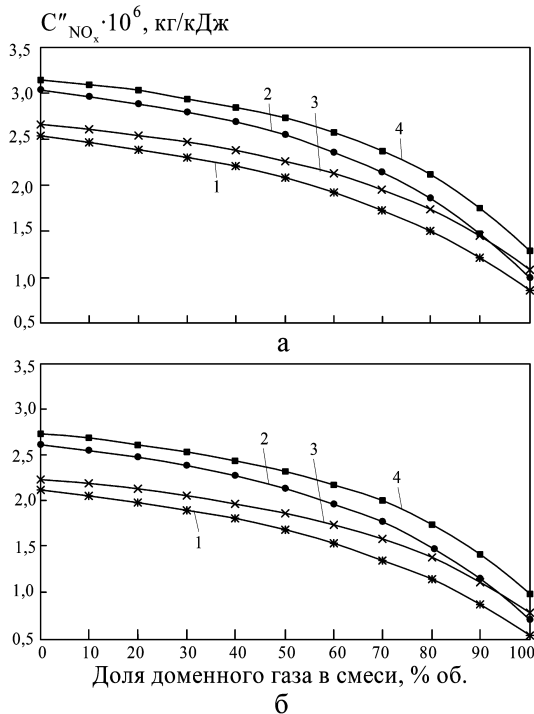


Рис.7. Зависимость отнесенных к единице полезной теплоты выбросов оксидов азота  $C''_{\text{NO}_x}$  от доли доменного газа в смеси с коксовым. Обозначения как на рис.1.

Аналогичные зависимости образования вредных веществ получены для случая использования смешанного коксодоменного газа при увеличении доли доменного газа в смеси. На рис.6 представлены зависимости для равновесных концентраций диоксида углерода  $C''_{\text{CO}_2}$ , отнесенных к единице полезной теплоты, а на рис.7 — кривые равновесных концентраций  $C''_{\text{NO}_x}$  для выбросов оксидов азота.

Из анализа результатов образования вредных веществ при использовании коксодоменной и природнодоменной смесей видно, что величины удельных выбросов  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$  для чистого коксового и природного газа являются очень близкими.

### Выводы

1. Развитая в работе методология замещения топлив для различных топливоокислительных смесей позволяет:

- оценить принципиальную возможность обеспечения рассматриваемого теплотехнологического процесса и стабильной работы печей при переходе на отопление печи газовым топливом определенного состава и параметров (замещающим газом  $s$ );

- определить расходы замещающего газа  $s$  при определенных параметрах газа  $s$  и воздуха-окислителя, соответствующие расходы энергии топлива и топливоокислительной смеси для условий заданного процесса и температурного режима печи;

- определить удельные расходы газа и удельную затраченную энергию (теплоту сгорания) на единицу производимой продукции (или полезно использованной энергии);

- определить удельные выбросы вредных веществ:  $\text{CO}_2$  как основного парникового газа, влияющего на глобальный климат, и  $\text{NO}_x$  как основного токсичного компонента — на единицу производимой продукции (или полезно использованной энергии);

- выполнить энергоэкологическую оптимизацию с выбором состава топлива для различных металлургических технологий и производств;

- выдать рекомендации по подогреву компонентов горения (воздух, низкокалорийный газ) и выбору температуры подогрева (режимы по температурам подогрева воздуха горения и (или) газовой смеси);

- выдать рекомендации по выбору оборудования для подогрева компонентов сгорания, включая варианты оборудования для обеспечения регламентированного подогрева воздуха и (или) замещающего газа.



2. Полная замена природного газа доменным исключена, если теоретическая температура горения доменного газа  $T_{T,BFG}$  ниже заданной технологической температуры процесса  $T_{ex}$  (при  $T_{T,BFG} < T_{ex}$ ), а при умеренных  $T_{ex}$  является нерациональной, поскольку сопровождается сильным перерасходом потребной располагаемой тепловой энергии топливоокислительной смеси по сравнению со случаем использования чистого природного газа. Повышение доли доменного газа в смеси  $D_{BFG}$  до 100 % приводит к значительному увеличению выбросов диоксида углерода  $C_{CO_2}''$ , отнесенных к единице полезно используемой тепловой энергии. Для обеспечения приемлемых энергоэкологических показателей замещения природного газа целесообразно использовать смеси доменного газа с природным или коксовым газом с одновременным подогревом обоих компонентов горения. Использование коксового газа как компонента, обогащающего топливо, обеспечивает близкие энергоэкологические характеристики по отношению к случаю использования природного газа.

### Список литературы

- Семененко Н.А., Куперман Л.И., Романовский С.А. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности : Учеб. для вузов. — Киев : Вища шк., 1979. — 296 с.
- Основные методические положения по планированию использования вторичных энергетических ресурсов. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 64 с.
- 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, Nice, France, 6–9 June 2000. — 15 p.
- Martin P. Optimising performance, energy efficiency and greenhouse gas emissions // Iron & Steel Today. — Nov. 2013. — P. 13–14.
- Сорока Б.С., Воробьев Н.В., Бершадский А.И. Экономия природного газа при его замене технологическими газами для отопления средне- и высокотемпературных печей. 1. Влияние характеристик низкокалорийных газов на расход топлива в печах // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2016. — № 1. — С. 11–22.
- Soroka B. Combined power and environmental optimization of fuel–oxidant composition and initial parameters : Thermodynamic approach and industrial validation // International Journal of Energy for a Clean Environment. — 2008. — Vol. 9, Iss. 1–3. — P. 65–89.
- Бретшнайдер Б., Курфюрст И. Охрана воздушного бассейна от загрязнений : Технология и контроль. — Л. : Химия, 1989. — 288 с.
- Chesnokov Y.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Models and analyses of the Emission of carbon dioxide in relation to metallurgical processes // International Journal of Energy for a Clean Environment. — 2015. — Vol. 16, Iss. 1–4. — P. 157–170.
- Сорока Б.С. Интенсификация тепловых процессов в топливных печах. — Киев : Наук. думка, 1993. — 416 с.
- Pirol L.S., Pirol I.L., Kostyuk T.O., Soroka B.S. Industrial application of submerged combustion melters. — Kiev : Fact Publ., 2006. — 240 p.
- Framework Convention on Climate Change / United Nations, Conference of the Parties Twenty-first session, Paris, 30 November to 11 December 2015. — 32 p. — Режим доступа: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
- Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change / United Nations, 1998. — 20 p. — Режим доступа: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>

Поступила в редакцию 07.07.16

**Сорока Б.С.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Шандор П.<sup>2</sup>**, PhD,  
**Воробйов М.В.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Карабчиевська Р.С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Інститут газу НАН України, Київ

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

<sup>2</sup> Optimum Energo-Ecology Ltd., Дунауйварош, Угорщина

## **Економія природного газу при його заміні технологічними газами для опалення середньо- та високотемпературних печей. 2. Чисельне визначення витрат, енергетичних та екологічних характеристик використання палива при задаванні його типу та складу**

У рамках нової авторської методології заміщення палив, що враховує 2-й початок термодинаміки поряд з 1-м, запропоновано спосіб визначення потрібної витрати палива та відповідної теплоти його згоряння. Розвинуто спосіб розрахунку потрібної наявної ентальпії паливоокислювальної суміші. Розглянуто вплив заміни палива на утворення шкідливих речовин при згорянні палив у печах. В основу концепції заміни палив покладено умову збереження потоку корисно застосованої повної ентальпії та врахування ККД використання палива. Виконано чисельні оцінки можливості економії або виникнення перевитрати природного газу (NG). Проведено розрахунки потоків наявної теплоти початкової паливоповітряної суміші та теплоти згоряння аналізованих низькокалорійних палив у залежності від вмісту доменного газу (BFG) у сумішах з природним (NG + BFG) та коксовим (COG + BFG) газами при заміні природного газу технологічними газами. Поряд з витратними та енергетичними характеристиками використання змішаних палив зроблено оцінку утворення питомих викидів шкідливих речовин: діоксиду вуглецю  $C''_{CO_2}$  як парникового газу та оксидів азоту  $C''_{NO_x}$  як токсичної речовини. *Бібл. 12, рис. 7, табл. 2.*

**Ключові слова:** альтернативне газове паливо, вторинні енергоресурси, доменний газ, заміщення палив, коксовий газ, наявна теплова енергія, термічна піч, економія природного газу, питомі викиди шкідливих речовин.

**Soroka B.S.<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences, **Shandor P.<sup>2</sup>**, PhD,  
**Vorobiov M.V.<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences **Karabchievskaya R.S.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> The Gas Institute of National Academy of Science of Ukraine, Kiev

39, Dehtiarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: boris.soroka@gmail.com

<sup>2</sup> Optimum Energo-Ecology Ltd., Dunaujvaros, Hungary

## **Natural Gas Saving by Replacement the Last for Process Gases While Heating Middle and High Temperature Furnaces. Part 2. Numerical Determination of Fuel Flow Rate, of Fuel Use Energy and Environmental Characteristics by Assignment of Fuel Type and Composition**

The technique for calculation of need fuel flow rate and for proper combustion heat flow has been advanced in frame of new author's (B.S. Soroka) methodology of fuel replacement that takes the second law of thermodynamics into account along with the first law. Method for calculation the rate of available enthalpy flow of fuel-oxidant mixture has

been developed. An impact of fuel replacement on formation the harmful substances by gas fuels combustion in the furnaces has been studied. The concept of new approach to interchangeability of fuel gases is grounded upon condition of conservation the rate of useful total enthalpy flow under fuels substitution. The last value accounts the fuel use efficiency. Numerical calculations of saving or overexpenditure the natural gas (NG) for the cases of total or partial NG substitution by process gases have been fulfilled. The calculations of the available heat flows of fuel-oxidant mixture and of combustion heat flow of the analyzed low-calorific fuels have been carried out for the cases of NG replacement with the process gases depending on the content (volume fraction) of blast furnace gas (BFG) in mixtures with natural (NG + BFG) or coke oven (COG + BFG) gases. Evaluation of formation and of specific effluents of pollutants: carbon dioxide  $C''_{CO_2}$  as a greenhouse gas and nitrogen oxides  $C''_{NO_x}$  as the most representative harmful substance – has been carried out along with computations of fuel flow rate and with energy using characteristics of low calorific mixed fuels. *Bibl.12, Fig. 7, Tab. 2.*

**Key words:** alternative gas fuels; available thermal energy, blast furnace gas; substitution of fuels; coke oven gas, heat-treating furnace, natural gas saving, secondary energy resources, specific emissions of harmful substances.

### References

1. Semenenko N.A., Cooperman L.I., Romanovsky S.A. Secondary energy sources and combination of energy-technologies in industry, Kiev : High School Publishing House, 1979, 296 pp. (Rus.).
2. Basic methodical positions on planning the use of secondary energy resources, Moscow : Energoatomisdat Publishing House, 1987, 64 pp. (Rus.).
3. 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*, Nice, Fr., 6–9 June 2000, 15 pp.
4. Martin P. Optimising performance, energy efficiency and greenhouse gas emissions, *Iron & Steel Today*, Nov. 2013, pp. 13–14.
5. Soroka B.S., Vorobiov M.V., Bershadskyi A.I. 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, [*Energy technologies and resource saving*], 2016, (1), pp. 11–22. (Rus.).
6. Soroka B. Combined power and environmental optimization of fuel-oxidant composition and initial parameters: thermodynamic approach and industrial validation, *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2008, 9, Iss. 1–3, pp. 65–89.
7. Bretschneider B., Kurfurst J. Air pollution control technology (fundamental aspects of pollution control and environmental science), Amsterdam : Elsevier Publishing House, 1987, 296 pp. (Rus.).
8. Chesnokov Yu.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Models and analyses of the Emission of carbon dioxide in relation to metallurgical processes, *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2015, 16, Iss. 1–4, pp. 157–170.
9. Soroka B.S. Intensification of Processes in Fuel Furnaces, Kiev : Naukova Dumka, 1993, 416 p. (Rus.).
10. Pioro L.S., Pioro I.L., Kostyuk T.O., Soroka B.S. Industrial Application of Submerged Combustion Melting, Kiev : Fact publishers, 2006, 240 pp. (Rus.).
11. Framework Convention on Climate Change, *United Nations, Conference of the Parties Twenty-first session*, Paris, 30 November to 11 December 2015, 32 p. — Access mode: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
12. Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change, United Nations, 1998, 20 p. — Access mode: [kpeng.pdf](#)

Received July 7, 2016