

УДК 620.9:662.613.5:66.041

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВА И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ЧАСТЬ 1

Энергоэкология использования топлива и нормирование вредных выбросов

Докт. техн. наук, проф. СОРОКА Б. С.

Институт газа НАН Украины

Начало XXI ст. пришлось на период обострения мировой топливно-энергетической ситуации и роста цен на энергоносители. В этой связи пересматривается структура производства энергии и потребления топлива, которая была разработана и схематизирована в виде различных сценариев, подготовленных, в частности, усилиями специалистов ИААА (Международный институт прикладного системного анализа, Вена) и рассчитанных до конца XXI ст. [1].

Топливо-энергетические проблемы являются приоритетными и для восточноевропейских стран – бывших республик СССР, в частности для Беларуси и Украины, учитывая чрезвычайно высокую энергоемкость национального ВВП и зависимость от поставок первичного топлива, прежде всего из России.

В XXI ст. прогнозируется многократное увеличение энергопотребления, в связи с чем особое значение имеет структура первичных энергоресурсов и топливного баланса – нынешняя и ожидаемая. Доступность первичных топливных источников не является единственным критерием, определяющим выбор вида топлива. Возможность использования того или иного топлива зависит от потенциала (температурного уровня) процесса, для обеспечения которого сжигается топливо: температурный режим эксплуатации должен быть увязан с температурой горения топливно-окислительной смеси. Кроме того, отмечается серьезная зависимость уровня загрязнения – состава вредных выбросов и парниковых газов (прежде всего CO₂) – от вида топлива. Наиболее экологически благополучным видом топлива является природный газ, потребность в котором и его стоимость растут опережающими темпами.

Так, по данным [2], до 70 % всего прироста энергетического рынка вплоть до 2012 г. определяется ростом газового рынка, несмотря на то, что при производстве 70 % энергии, выработанной в 2004 г., были использованы более дешевые источники, чем природный газ [2].

С учетом изложенного особое значение приобретает проблема энергосбережения и экономии топлива. Ситуация изменилась даже в такой благополучной стране, как США, где до последнего времени в качестве определяющих рассматривались экологические задачи, а эффективность использования топлива выступала лишь как сопутствующая проблема. Так, на 16-м годовом форуме по энергоэффективности (Вашингтон, 15 июня 2005 г.) было заявлено, что первым шагом по сокращению зависимости Америки от зарубежной нефти являются мероприятия по энергосбережению и повышению энергоэффективности использования топлива, разработка новых источников энергии и альтернативных путей поставки энергии [3].

Проблемы энергосбережения и охраны окружающей среды для топливоиспользующих агрегатов (котлов, печей и т. п.) взаимосвязаны и взаимозависимы, причем не только при выработке электроэнергии и теплоты (парогенераторы, котельные установки) [4], но и в процессах сжигания топлива в технологии (промышленные печи и котлы, сушильные агрегаты и др.).

Действительно, суммарный уровень выбросов вредных веществ в топливоиспользующих агрегатах зависит от объемов производства продукции и энергии, удельных расходов топлива и удельных выбросов токсичных веществ на единицу производимой продукции и энергии [5]. В то же время производство зависит от рыночной конъюнктуры, однако его развитие имеет ограничения, которые регламентируются национальными и региональными нормативами вредных, в том числе токсичных, выбросов. Поскольку до 80 % общего потребления первичных энергоресурсов в Украине, как и в других странах СНГ, приходится на котельно-печное топливо [6], упомянутый комплекс проблем приобрел для СНГ и восточноевропейских стран значение, определяющее состояние и перспективы развития национальных экономик. С учетом этого обстоятельства прикладные вопросы, касающиеся энергоэкологического анализа, экономии топлива и снижения вредных выбросов, будут иллюстрироваться примерами, относящимися к технологическим печам.

В числе перерабатывающих отраслей – металлургическое производство, являющееся крупнейшим потребителем топлива и энергии, а также одним из основных загрязнителей атмосферы. В перечне заметных источников выбросов существенная роль принадлежит высокотемпературным технологическим агрегатам, включая печи прокатного производства.

В фундаментальной работе специалистов ведущей печестроительной компании Italimpianti представлена концепция топливоэнергосбережения в печах для нагрева металла [7]. Обобщение результатов экспериментальных и расчетных исследований, опыта проектирования и освоения мощных печей прокатного производства сохраняет свою актуальность до настоящего времени.

Вместе с тем экологическая характеристика печных агрегатов, не учитываемая в концепции [7], с позиций современных представлений и крите-

риев оценки эффективности использования топлива и топливоиспользующих агрегатов как таковых является столь же важным аспектом их эксплуатации, как энергетическая составляющая.

Энергоэкология использования топлива – новое научное направление в энергетике. В Институте газа НАНУ разработаны основы нового комплексного научного направления – энергоэкологии топливоиспользования, накоплен опыт энергоэкологического совершенствования топливоиспользующих агрегатов на основе их математического моделирования, термодинамического анализа и прямых энергоэкологических испытаний [5, 8–19].

Особенностями энергоэкологии использования топлива как новой научной дисциплины являются:

1. Рассмотрение энергетических (эффективность топливоиспользования) и экологических (уровень вредных выбросов при сжигании топлива) с единых термодинамических позиций, т. е. получение характеристик топливоиспользования и загрязнения атмосферы в расчете на единицу полезно использованной теплоты или на единицу производительности печи (на единицу выработанной энергии – для парогенераторов и котлоагрегатов). Отличие такого единого подхода от традиционного состоит в том, что до последнего времени процессы топливоиспользования и сопутствующие экологические процессы рассматривались либо отдельно, либо в сочетании, но без количественной оценки их взаимного влияния.

2. Использование избыточных полных энтальпий компонентов топливо-окислительной смеси и продуктов сгорания и соответствующих смесей в качестве универсальной меры располагаемой и полезной энергии при расчете эффективности топливоиспользования (удельный расход топлива b_f , КПД использования топлива и теплоты) и характеристики экологического совершенства использования топлива в условиях его сжигания (удельный выброс вредных веществ).

3. Комплексная энергоэкологическая оптимизация процессов использования топлива в печах на основе определения опытным путем зависимостей удельного расхода топлива b_f от производительности печи G_{fur} (основная энергетическая характеристика агрегата) и удельного уровня вредных выбросов H_i ($H_i \equiv \text{NO}_x, \text{CO} \dots$)($C_{\text{H},i}$) от производительности печи G_{fur} (основная экологическая характеристика), установление подобия зависимостей $b_f - G_{\text{fur}}$ и $C_{\text{H},i} - G_{\text{fur}}$ и поиск оптимальных по этим критериям (b_f и $C_{\text{H},i}$) значений: $G_{\text{fur,opt}}(b_{f,\text{min}})$ и $G_{\text{fur,opt}}(C_{\text{H},i,\text{min}})$.

Впервые предлагается учет выхода CO_2 как основного парникового газа по удельному параметру C_{CO_2} , а также рассмотрение этого показателя в качестве меры экологического совершенства использования топлива.

Оценка данных по использованию топлива исходит из требования минимизации вредных выбросов и безусловного выполнения международных и национальных экологических нормативов, динамика изменения которых за последнее десятилетие рассматривается в настоящей работе.

Структура мировой добычи и потребления углеводородного топлива. Наиболее значимые факторы загрязнения атмосферы, обусловленные сжиганием топлива, включают следующие выбросы и их источники [1]:

1) относящиеся к сжиганию неугольного твердого топлива (древесина и биомасса – «загрязнение от бедности») и топлива в двигателях («современное загрязнение»);

2) соединения углерода, серы и азота, а также обусловленные ими кислотные дожди как результат использования углеродсодержащего минерального топлива в стационарных установках;

3) парниковые газы, преимущественно CO_2 , приводящие к глобальному потеплению климата.

Из числа перечисленных факторов к котлоагрегатам и промышленным, в том числе высокотемпературным, печам имеют отношение позиции 2 и 3.

В связи с предложенной классификацией источников загрязнений особый интерес представляет региональная структура добычи и использования различных углеводородных топлив [19], суммарная доля использования которых в мировом топливном балансе превышает две трети. Соответствующие данные по отдельным регионам мира и странам представлены в табл. 1–4 в форме информации по объемам добычи и использования нефти и природного газа. Из всего используемого углеводородного топлива более 58 % приходится на жидкое топливо, свыше 40 % – на природный газ [19].

Анализ табличных данных (табл. 1–4) показывает существенную нерациональность добычи и потребления топлива по странам и регионам мира. Так, наиболее индустриально развитая страна – США – потребляет втрое больше нефти, чем добывает, а основной поставщик нефти – Саудовская Аравия – при довольно существенном внутреннем потреблении добывает в шесть раз больше нефти, чем сама потребляет или в дальнейшем экспортирует в виде продуктов нефтепереработки. Даже Российская Федерация – второе в мире государство по нефтедобыче – основной объем добываемого жидкого топлива экспортирует.

Добыча нефти в промышленно развитых государствах Европы (Германия, Франция, Великобритания) и Азии (Япония) практически не сказывается на структуре мирового топливного баланса.

Что касается природного газа, то здесь различия в добыче и внутреннем потреблении в основных газодобывающих странах – Российской Федерации и США – не столь существенны: экспортные возможности составляют не более одной трети добычи, а нехватка собственной добычи не превышает 15–20 % внутренних потребностей.

В последнее время отмечается сокращение объема используемого углеводородного топлива в государствах с высоким энергопотреблением и развитой экономикой: США, Канаде – нефти, природного газа; Германии, Франции, Италии, Турции и др. – жидкого топлива; в отдельных странах ЕС – природного газа. Из числа стран СНГ единственным, по существу, государством, где снизилось потребление углеводородного топлива, является Беларусь: отмечено сокращение потребления жидкого топлива более чем на 10 %. В ряде европейских государств (например, Финляндии) растет потребление биотоплива и продуктов газификации.

Очевидно, что загрязнение атмосферы определяется как видом и объемом сжигаемого топлива, так и экологическим совершенством его использования: организацией низкоэмиссионного сжигания, прежде всего, а также установкой аппаратов, улавливающих вредные выбросы, и очистных

сооружений. Благодаря мерам предупреждения загрязнения окружающей среды, принимаемым в странах с наиболее высоким уровнем топливно-энергопотребления, включая оптимизацию структуры топливного баланса, в США, Японии, ведущих европейских государствах удается обеспечивать выполнение жестких нормативов выбросов вредных веществ в атмосферу.

Информация по годовому уровню мировой добычи и потребления энергоносителей – углеводородных топлив сведена в табл. 1–4.

Таблица 1

Добыча нефти*, млн т

Регион	2004 г.	2005 г.	Изменение в 2005 г. в сравнении с 2004 г., %	Доля общего, %
США	329,2	310,2	–5,5	8,0
Канада	147,6	145,2	–1,3	3,7
Мексика	190,7	187,1	–1,6	4,8
Вся Северная Америка	667,4	642,5	–3,5	16,5
Аргентина	37,8	36,2	–3,9	0,9
Бразилия	76,5	84,7	11,1	2,2
Колумбия	27,3	27,1	–0,4	0,7
Эквадор	27,3	27,6	1,1	0,7
Венесуэла	153,4	154,7	1,1	4,0
Вся Центральная и Южная Америка	341,3	350,6	3,0	9,0
Азербайджан	15,7	22,4	42,8	0,6
Дания	19,1	18,4	–3,3	0,5
Италия	5,5	6,1	12,2	0,2
Казахстан	60,6	63,0	4,3	1,6
Норвегия	149,9	138,2	–7,5	3,5
Румыния	5,7	5,4	–4,5	0,1
Российская Федерация	458,8	470,0	2,7	12,1
Туркменистан	9,6	9,5	–0,5	0,2
Великобритания	95,4	84,7	–11,0	2,2
Узбекистан	6,6	5,5	–16,9	0,1
Все страны Европы и Евразии	850,2	845,0	–0,3	21,7
Иран	202,6	200,4	–0,8	5,1
Ирак	99,2	89,5	–9,5	2,3
Кувейт	122,5	130,1	6,5	3,3
Оман	38,9	38,5	–0,6	1,0
Катар	44,9	48,8	9,0	1,3
Саудовская Аравия	506,1	526,2	4,3	13,5
Сирия	26,4	23,3	–11,4	0,6
ОАЭ	124,7	129,0	3,7	3,3
Йемен	19,9	20,1	1,3	0,5
Весь Ближний Восток	1187,3	1208,1	2,0	31,0
Алжир	83,6	86,5	3,8	2,2
Ангола	48,7	61,2	26,0	1,6
Египет	35,4	33,9	–3,9	0,9
Гвинея	16,3	17,6	7,9	0,5
Габон	11,8	11,7	–0,2	0,3
Ливия	75,8	80,1	5,9	2,1

Окончание табл. 1

Регион	2004 г.	2005 г.	Изменение в 2005 г. в сравнении с 2004 г., %	Доля общего, %
Нигерия	121,9	125,4	3,1	3,2
Судан	16,1	18,7	16,6	0,5
Вся Африка	441,0	467,1	6,2	12,0
Австралия	23,0	23,3	2,0	0,6
Китай	174,1	180,8	4,2	4,6
Индия	37,9	36,2	-4,1	0,9
Индонезия	55,9	55,0	-1,4	1,4
Малайзия	38,5	36,8	-4,3	0,9
Вьетнам	20,8	19,1	-8,2	0,5
Весь Азиатско-Тихо-океанский регион	378,1	381,7	1,2	9,8
ВЕСЬ МИР	3865,3	3895,0	1,0	100,0
ОЕСР	976,0	927,7	-4,7	23,8
ОРЕК	1590,5	1625,5	2,5	41,7
Не-ОРЕК+	1716,2	1692,0	-1,1	43,4
Бывший СССР	558,6	577,4	3,7	14,8

* Включая сырую нефть и ЛПГ (жидкие составляющие природного газа там, где они добываются отдельно). Не включая жидкое топливо из других источников, например из угля.

+ Не учитывая бывший СССР.

Примечание. Из-за округления некоторые суммарные данные могут не равняться сумме их составных частей.

Таблица 2

Потребление нефти*, млн т

Регион	2004 г.	2005 г.	Изменение в 2005 г. в сравнении с 2004 г., %	Доля общего, %
США	948,8	944,6	-0,2	24,6
Канада	100,6	100,1	-0,2	2,6
Мексика	85,2	87,8	3,3	2,3
Вся Северная Америка	1134,6	1132,6	0,1	29,5
Аргентина	18,7	20,1	7,6	0,5
Бразилия	81,9	83,6	2,4	2,2
Чили	11,3	11,9	5,5	0,3
Венесуэла	24,2	25,4	5,3	0,7
Вся Центральная и Южная Америка	217,9	223,3	2,8	5,8
Австрия	13,8	14,2	3,4	0,4
Азербайджан	4,6	5,1	11,3	0,1
Беларусь	7,5	6,7	-10,4	0,2
Бельгия и Люксембург	38,4	39,5	3,1	1,0
Болгария	4,7	5,0	6,7	0,1
Чехия	9,5	9,9	4,1	0,3
Дания	9,1	9,1	0,2	0,2
Финляндия	10,6	11,0	4,2	0,3
Франция	94,0	93,1	-0,7	2,4
Германия	124,0	121,5	-1,7	3,2
Греция	21,3	20,9	-1,5	0,5
Венгрия	6,3	7,0	10,6	0,2
Исландия	1,0	0,9	-2,4	#
Ирландия	8,9	9,4	5,4	0,2

Окончание табл. 2

Регион	2004 г.	2005 г.	Изменение в 2005 г. в сравнении с 2004 г., %	Доля общего, %
Италия	89,7	86,3	-3,5	2,2
Казахстан	9,0	10,0	11,4	0,3
Литва	2,6	2,7	4,0	0,1
Нидерланды	46,2	49,6	7,7	1,3
Норвегия	9,6	9,8	1,8	0,3
Польша	21,1	21,9	4,1	0,6
Португалия	15,4	15,3	-0,5	0,4
Румыния	10,9	11,3	4,5	0,3
Российская Федерация	128,5	130,0	1,4	3,4
Словакия	3,2	3,5	9,6	0,1
Испания	77,6	78,8	1,7	2,1
Швеция	15,3	15,1	-1,2	0,4
Швейцария	12,0	12,2	2,1	0,3
Турция	32,0	30,0	-5,9	0,8
Туркменистан	4,6	4,9	6,8	0,1
Украина	13,9	13,9	0,4	0,4
Великобритания	81,7	82,9	1,7	2,2
Узбекистан	7,5	7,8	4,3	0,2
Все страны Европы и Евразии	957,6	963,3	0,9	25,1
Иран	74,6	78,4	5,4	2,0
Кувейт	13,7	14,4	5,2	0,4
Саудовская Аравия	83,7	87,2	4,5	2,3
ОАЭ	17,4	18,3	5,5	0,5
Весь Ближний Восток	260,7	271,3	4,4	7,1
Алжир	10,6	11,2	6,0	0,3
Египет	26,8	29,2	9,3	0,8
Южная Африка	24,8	24,9	0,6	0,6
Вся Африка	124,2	129,3	4,4	3,4
Австралия	38,8	39,7	2,7	1,0
Бангладеш	3,9	4,0	2,8	0,1
Китай	318,9	327,3	2,9	8,5
Гонконг	15,3	13,8	-9,6	0,4
Индия	120,2	115,7	-3,5	3,0
Индонезия	54,7	55,3	1,4	1,4
Япония	241,4	244,2	1,4	6,4
Малайзия	22,8	22,0	-3,3	0,6
Новая Зеландия	7,0	7,0	1,1	0,2
Пакистан	16,0	17,4	8,8	0,5
Филиппины	15,8	14,7	-6,9	0,4
Сингапур	38,1	42,2	11,0	1,1
Южная Корея	104,9	105,5	0,8	2,7
Тайвань	41,7	41,6	0,2	1,1
Таиланд	44,0	45,6	4,0	1,2
Весь Азиатско-Тихо- океанский регион	1103,6	1116,9	1,5	29,1
ВСЕЬ МИР	3798,6	3836,8	1,3	100,0
ОЕСР	2267,3	2270,7	0,4	59,2
ЕС-25	697,3	700,4	0,7	18,3
Бывший СССР	183,2	186,3	1,9	4,9

* Спрос внутри страны плюс международная авиация и морские хранилища, топливо на нефтепереработку и потери.

Менее 0,05 %.

Таблица 3

Добыча природного газа*, млрд куб. м

Регион	2004 г.	2005 г.	Изменение в 2005 г. в сравнении с 2004 г., %	Доля общего, %
США	539,4	525,7	-2,3	19,0
Канада	183,6	185,5	1,3	6,7
Мексика	37,4	39,5	6,0	1,4
Вся Северная Америка	760,4	750,6	-1,0	27,2
Аргентина	44,9	45,6	1,9	1,7
Бразилия	11,0	11,4	3,1	0,4
Тринидад и Тобаго	28,1	29,0	3,5	1,0
Венесуэла	28,1	28,9	3,2	1,0
Вся Центральная и Южная Америка	129,7	135,6	4,8	4,9
Азербайджан	4,7	5,3	13,9	0,2
Дания	9,4	10,4	11,1	0,4
Германия	16,4	15,8	-3,2	0,6
Италия	13,0	12,0	-7,3	0,4
Казахстан	20,6	23,5	14,2	0,9
Нидерланды	68,8	62,9	-8,4	2,3
Норвегия	78,5	85,0	8,6	3,1
Польша	4,4	4,3	-0,8	0,2
Румыния	12,8	12,9	1,3	0,5
Российская Федерация	591,0	598,0	1,5	21,6
Туркменистан	54,6	58,8	7,9	2,1
Украина	19,1	18,8	-1,2	0,7
Великобритания	96,0	88,0	-8,1	3,2
Узбекистан	55,8	55,7	-0,2	2,0
Все страны Европы и Евразии	1055,9	1061,1	0,8	38,4
Иран	84,9	87,0	2,8	3,1
Оман	17,2	17,5	2,0	0,6
Катар	39,2	43,5	11,4	1,6
Саудовская Аравия	65,7	69,5	6,1	2,5
ОАЭ	46,3	46,6	0,9	1,7
Весь Ближний Восток	280,4	292,5	4,6	10,6
Алжир	82,0	87,8	7,3	3,2
Египет	26,9	34,7	29,4	1,3
Нигерия	21,8	21,8	0,3	0,8
Вся Африка	144,3	163,0	13,3	5,9
Австралия	35,3	37,1	5,5	1,3
Бангладеш	13,3	14,2	7,1	0,5
Бруней	12,2	12,0	-1,5	0,4
Китай	41,0	50,0	22,2	1,8
Индия	30,1	30,4	1,3	1,1
Индонезия	75,4	76,0	1,1	2,8
Малайзия	53,9	59,9	11,6	2,2
Новая Зеландия	3,8	3,7	-3,8	0,1
Пакистан	26,9	29,9	11,5	1,1
Таиланд	20,3	21,4	6,0	0,8
Весь Азиатско-Тихо- океанский регион	333,0	360,1	8,4	13,0
ВЕСЬ МИР	2703,8	2763,0	2,5	100
ЕС-15	215,3	199,7	-7,0	7,2
ОЭСР	1096,6	1079,4	-1,3	39,1
Бывший СССР	746,1	760,3	2,2	27,5

* Не включая газ, который сжигается на факеле, или тот, который рециркулирует.

Примечание. Из-за округления некоторые суммарные данные могут не совпадать с суммами их составляющих. Данные представлены в стандартных м³ (при 15 °С и 1013 мбар). Значения получены пересчетом через тонны нефтяного эквивалента.

Таблица 4

Потребление газа в нефтяном эквиваленте*, млрд куб. м

Регион	2004 г.	2005 г.	Изменение в 2005 г. в сравнении с 2004 г., %	Доля общего, %
США	645,0	633,5	-1,5	23,0
Канада	92,7	91,4	-1,1	3,3
Мексика	48,6	49,6	2,3	1,8
Вся Северная Америка	786,3	774,5	-1,2	28,2
Аргентина	37,9	40,6	7,4	1,5
Бразилия	19,0	20,2	6,7	0,7
Чили	8,3	7,6	-8,2	0,3
Колумбия	6,3	6,8	7,5	0,2
Венесуэла	28,1	28,9	3,2	1,1
Вся Центральная и Южная Америка	117,7	124,1	5,7	4,5
Австрия	9,5	10,0	5,7	0,4
Азербайджан	8,6	8,8	3,0	0,3
Беларусь	18,5	18,9	2,8	0,7
Бельгия и Люксембург	16,5	16,8	2,3	0,6
Болгария	2,9	3,2	11,4	0,1
Чехия	8,7	8,5	-1,1	0,3
Дания	5,2	5,0	-3,7	0,2
Финляндия	4,3	4,0	-7,1	0,1
Франция	44,5	45,0	1,3	1,6
Германия	85,9	85,9	0,3	3,1
Греция	2,5	2,5	2,3	0,1
Венгрия	13,0	13,4	3,6	0,5
Ирландия	4,1	3,9	-4,6	0,1
Италия	73,6	79,0	7,7	2,9
Казахстан	15,4	17,8	15,8	0,6
Литва	3,1	3,2	5,1	0,1
Нидерланды	41,1	39,5	-3,6	1,4
Норвегия	4,6	4,5	-2,1	0,2
Польша	13,1	13,6	4,1	0,5
Португалия	3,1	3,0	-0,5	0,1
Румыния	17,5	17,3	-0,7	0,6
Российская Федерация	401,9	405,1	1,1	14,7
Словакия	6,1	5,9	-3,1	0,2
Испания	27,4	32,3	18,2	1,2
Швеция	0,8	0,8	-4,5	
Швейцария	3,0	3,1	2,9	0,1
Турция	22,1	27,4	24,1	1,0
Туркменистан	15,5	16,6	7,5	0,6
Украина	72,9	72,9	0,3	2,6
Великобритания	97,0	94,6	-2,2	3,4
Узбекистан	44,8	44,0	-1,4	1,6
Все страны Европы и Евразии	1101,2	1121,9	2,2	40,8
Иран	86,5	88,5	2,5	3,2
Катар	14,9	15,9	6,8	0,6
Саудовская Аравия	65,7	69,5	6,1	2,5
ОАЭ	40,2	40,4	0,8	1,5
Весь Ближний Восток	242,3	251,0	3,9	9,1
Алжир	22,0	24,1	9,8	0,9

Окончание табл. 4

Регион	2004 г.	2005 г.	Изменение в 2005 г. в сравнении с 2004 г., %	Доля общего, %
Египет	26,2	25,5	-2,6	0,9
Южная Африка	—	—	—	—
Вся Африка	68,6	71,2	4,0	2,6
Австралия	25,3	25,7	1,6	0,9
Бангладеш	13,3	14,2	7,1	0,5
Китай	39,0	47,0	20,8	1,7
Гонконг	2,2	2,2	-1,3	0,1
Индия	32,7	36,6	12,2	1,3
Индонезия	36,9	39,4	7,2	1,4
Япония	78,7	81,1	3,3	2,9
Малайзия	33,9	34,9	3,4	1,3
Новая Зеландия	3,7	3,6	-3,3	0,1
Пакистан	26,9	29,9	11,5	1,1
Сингапур	6,6	6,5	-1,2	0,2
Южная Корея	31,5	33,3	6,1	1,2
Тайвань	10,2	10,7	5,1	0,4
Таиланд	27,4	29,9	9,5	1,1
Весь Азиатско-Тихо-океанский регион	378,5	406,9	7,8	14,8
ВСЕЬ МИР	2694,7	2749,6	2,3	100,0
ЕС-25	463,4	471,2	2,0	17,1
ОЕСР	1411,5	1416,8	0,7	51,5
Бывший СССР	588,1	595,9	1,6	21,7

* Данные представлены в стандартных м³ (при 15 °С и 1013 мбар). Значения пересчитаны через тонны нефтяного эквивалента.

Загрязняющие вещества в процессах горения. Экологические требования к топливоиспользующему оборудованию постоянно ужесточаются. Они регламентируются большим числом международных и национальных стандартов. По-видимому, наибольшее количество нормативов разработано и регулирует токсичные выбросы в США, где действуют федеральные (общенациональные) и региональные стандарты. Из них основными являются нормативы NAAQS (National Ambient Air Quality Standards) [20], регулирующие выбросы по шести загрязняющим веществам, включая газообразные: оксиды углерода (CO), азота (NO₂), серы (SO₂) и озон, а также по свинцу и дисперсным частицам, до 2010 г., а также указания о необходимости соответствия региональных требований по выбросам федеральным стандартам [21]. Существенным регулирующим документом являются Дополнения СААА (Clean Air Act Amendments) [22, 23], включающие четыре направления снижения выбросов и учитывающие региональные особенности образования и переноса озона и смога. Самые жесткие в мире требования к качеству окружающей среды, в частности по выбросам NO_x, предъявляет законодательство Южной Калифорнии [21] – правила SCAQMD (South Coast Air Quality Management District).

К числу загрязняющих веществ в процессах горения углеводородного топлива, концентрации которых регламентируются, относятся оксиды азо-

та (NO_x), монооксид углерода (CO), несгоревшие углеводороды (УНС), в том числе полиароматические (ПАН), летучие органические соединения (VOC) и дым с частицами меньше 10 мкм (PM_{10}) [24].

Основным загрязнителем атмосферы при сжигании природного газа являются оксиды азота (NO_x), включающие оксид (NO) и диоксид (NO_2) азота. При этом в большинстве случаев (95 % всех выбросов) NO_x , образующиеся в результате горения, состоят из NO , который в атмосфере трансформируется в NO_2 [25]. Более 80 % NO_x , присутствующих в атмосфере, являются результатом процессов горения. В США около 40 % всех NO_x генерируются автомобилями и двигателями (позиция 1 источников загрязнения), а остальные – обусловлены промышленными, бытовыми и коммунальными источниками [25].

За прошедшее десятилетие нормативы выбросов оксидов азота (NO_x), регламентируемые национальными стандартами в США и Западной Европе, для отдельных агрегатов, например газотурбинных установок, понижены более, чем на порядок [24].

Для реализации этих норм введены Правила 1146 и 1109, в соответствии с которыми для любых топливоиспользующих установок (котлов, печей) регламентируются удельные выбросы (на единицу тепловой мощности по высшей теплоте сгорания) или концентрации NO_x в пересчете на NO_2 [21]. В соответствии с Правилами 1146, которые распространяются на установки мощностью от 5 до 40 млн $\text{BTU}^*/\text{ч}$ (1,5–11,7 МВт), предельные выбросы составляют 0,05 pounds (фунта) на 1 млн BTU (0,0248 кг/ГДж), а концентрации NO_x – до 40 ppm (объемных) в продуктах сгорания при 3 % O_2 . По правилам 1109, относящимся к установкам мощностью более 40 млн $\text{BTU}/\text{ч}$ (11,7 МВт), в качестве предельных оговариваются удельные выбросы NO_x до 0,03 pounds (фунта) на 1 млн BTU (0,0132 кг/ГДж) и концентрации NO_x – до 24 ppm продуктов сгорания.

Известны основные приемы понижения выбросов NO_x при сжигании газового топлива, однако только их сочетание и оптимизация конструктивных и режимных параметров могут обеспечить выполнение требований охраны окружающей среды в ближайшем будущем, во всяком случае для обеспечения особо жестких требований, оговариваемых законодательством США. Так, если нынешние требования к жаротрубным бытовым котлам на газе ограничиваются следующими верхними значениями: $[\text{NO}_x] = 20 \text{ ppm}$, $[\text{CO}] = 50 \text{ ppm}$, а ГТУ: $[\text{NO}_x] = 25 \text{ ppm}$, $[\text{CO}] = 25 \text{ ppm}$, то уже в ближайшем будущем для упомянутых устройств ожидается понижение уровня предельных $[\text{NO}_x]$ до 9 ppm [24].

Об ужесточении требований можно судить по чрезвычайно амбициозным задачам на 2020 г., предусмотренным к исполнению министерством энергетики США (US Department of Energy) [25]: довести концентрации NO_x в котельных на газовом топливе до 2 ppm, CO – до 5 ppm, выбросы дисперсных частиц при сжигании газового топлива – до $0,003 \text{ lbs}/10^6 \text{ BTU} \approx 1,3 \text{ г/ГДж}$. Что же касается горелочных устройств промышленных нагревательных систем и устройств, то к 2020 г. предполагается сократить объем загрязняющих выбросов на 90 % [25].

* BTU – Britic Termal Unit.

В странах ЕС допустимые нормы выбросов несколько выше, чем в США, однако соответствующие стандарты ужесточены в последние годы. В соответствии с современными нормативами TA-Luft (Германия) в диапазоне температур печи до 1600 °С, температур подогрева воздуха горения до 1000 °С предельное значение $[\text{NO}_x] \approx 160 \text{ ppm}$ независимо от указанных температур [26].

Этот стандарт сменил нормативы TA-Luft, 1986, которыми предусматривалось, что предельные уровни $[\text{NO}_x]$ зависят от температуры подогрева воздуха горения и могут возрасти до 600 ppm при подогреве воздуха до 600 °С.

В соответствии с материалами [27] согласно германским техническим предписаниям по охране воздуха от загрязнений (TA Luft) предельная концентрация $[\text{NO}_x]_{5\% \text{O}_2} = 500 \text{ мг/м}^3 \approx 250 \text{ ppm}$.

Более жесткие нормы связаны со стандартом BImSchV, 1997, по которому для малых топочных устройств регламентируется предельное содержание $[\text{NO}_x] = 45,7 \text{ ppm}$ [28], а также Blauen Engels, 1998, в соответствии с которым для специальных и отопительных котлов предусмотрено ограничение по $[\text{NO}_x]$, равное соответственно 40 и 34,3 ppm [28]. В соответствии со стандартом Blauen Engels предусмотрены предельные выбросы $[\text{NO}_x] \approx 31 \text{ мг/МДж}$, $[\text{CO}] \approx 17 \text{ мг/МДж}$, или относительные значения концентраций соответственно 110 и 60 [26].

Согласно нормативам России [29] применительно к вновь разработанным после 01.01.1997 газогорелочным устройствам мощностью до 2 МВт и предназначенным для нагревательных печей предельная концентрация $[\text{NO}_x]_{\alpha=1}$ в условиях стендовых испытаний при сжигании природного газа с холодным воздухом составляет 120 мг/м³. Предельная норма концентрации NO_x в продуктах сгорания вновь разработанных агрегатов – проходных нагревательных печей металлургической промышленности – составляет $[\text{NO}_x]_{\alpha=1} = 580 \text{ мг/м}^3 \approx 290 \text{ ppm}$ (с 01.01.1997) в условиях сжигания газового топлива (природный, коксовый, природно-коксовый газы) с воздухом, подогретым выше 340–365 °С.

ВЫВОДЫ

1. Развита концепция комплексного энергоэкологического анализа эффективности использования топлива. Показано, что с этих позиций уровень загрязнения атмосферы при сжигании топлива следует оценивать удельными выбросами вредных соединений (топочных веществ и парниковых газов) на единицу произведенной продукции (для промышленных печей) и удельной выработанной энергии (для паронагревателей и котлоагрегатов).

2. В связи с высокой (свыше двух третей всего минерального топлива) долей углеводородного топлива (нефть и природный газ) в структуре мирового топливного баланса приведена статистическая информация по мировой добыче и потреблению жидкого топлива и природного газа. Анализ данных позволяет предположить, что в будущем опасность загрязнения окружающей среды будет ослабевать в Северной Америке и Западной Ев-

ропе, но сохранится и даже будет усугубляться в динамично развивающихся странах Азии (Китай, Индия), а также СНГ.

3. К числу загрязняющих веществ в процессах горения углеводородного топлива, концентрации которых регламентируются, относятся оксиды азота $[NO_x]$, монооксид углерода (CO), несгоревшие углеводороды (УНС), в том числе полиароматические (ПАН), летучие органические соединения (VOC) и дым с частицами меньше 10 мкм (PM10). Основным загрязнителем атмосферы при сжигании природного газа являются оксиды азота (NO_x), включающие оксид (NO) и диоксид (NO_2) азота. При этом в большинстве случаев (95 %) NO_x , образующиеся в результате горения, состоят из NO, который в атмосфере трансформируется в NO_2 . Существуют различные нормативы на выбросы топливоиспользующих агрегатов, которые относятся к различным по назначению агрегатам. Нормы представляют предельные значения концентраций либо удельных выбросов вредных веществ на единицу теплоты сжигания топлив. Международные и национальные нормативы вредных выбросов существенно разнятся иногда на порядки. Вместе с тем технически обоснованные нормы выбросов в странах СНГ и ЕС отличаются незначительно. Так, для промышленных печей они составляют соответственно 290 ppm ($\alpha = 1,0$; Россия) и 160–250 ppm ($[O_2] = 5 \%$, $\alpha \approx 1,27$; Германия).

ЛИТЕРАТУРА

1. Global Energy Perspectives: IASA – WEC // Ed. N. Nakicenovic, A. Grubler, A. McDonald. – Cambridge University Press, 1998. – 299 p.
2. Ziff Analyzes Gas Market // Energy & Power Management. – August, 2005.
3. President Promotes Energy Efficiency // Energy & Power Management. – August, 2005.
4. Степанов, А. В. Достижения энергетики и защита окружающей среды / А. В. Степанов, В. П. Кухарь. – Киев: Наук. думка, 2004. – 206 с.
5. Сорока, Б. С. Интенсификация тепловых процессов в топливных печах / Б. С. Сорока. – Киев: Наук. думка, 1993. – 413 с.
6. Карп, И. Н. Ресурсная база энергетики Украины / И. Н. Карп // Региональные проблемы энергосбережения в производстве и потреблении энергии: междунар. науч.-практ. конф.: 25–29 окт. 1999 / НАНУ, Минэнерго и др. – Киев, 1999. – С. 19–22.
7. Fontana, P. Energy cost savings as applied to the design of reheat furnaces / P. Fontana, G. Carrara, T. Bruno // Iron and Steel Engineers. – 1977. – Т. 54, № 7. – Р. 40–51.
8. Сорока, Б. С. Экономия топлива в печах и образование оксидов азота / Б. С. Сорока, Л. И. Валь. – Киев: Институт газа АН УССР, 1990. – 67 с.
9. Сорока, Б. С. Анализ возможности экономии топлива в высокотемпературных агрегатах с учетом ограничений по выходу оксидов азота / Б. С. Сорока, Л. И. Валь, В. П. Куминский // Проблемы контроля и защиты атмосферы от загрязнения / АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1990. – Вып. 16. – С. 64–71.
10. Энергоэкологические испытания печей с шагающими балками / Б. С. Сорока [и др.] // Сталь. – 1991. – № 7. – С. 52–56.
11. Сорока, Б. С. Энергоэкологический анализ режимов работы нагревательных печей / Б. С. Сорока, В. И. Тимошпольский, Д. Г. Седяко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1992. – № 2. – С. 89–93.
12. Сорока, Б. С. Повышение энергоэкологической эффективности нагревательных печей непрерывного производства // Химическая технология. – 1992. – № 6. – С. 18–27.
13. Soroка, B. Az ipari kemencek energookolomint az optimalizalasuk eszkoze / B. Soroка, P. Shandor // TUZELESTECHNIKA-92. XXVIII Ipari Szeminarium. – 1992, augusztus 26–28. – Miskolc: Tudomány és Technika Háza – Old. 124–144 (венг.).

14. S o r o k a, B. Methods and computer codes for efficiency analysis of fuel burning in industrial furnaces and boilers / B. Soroka. – VI. International Scientific Conference on Combustion and Heat Technics: Univ. of Miskolc. June 8–10, 1994. – Commission of the European Communities. – P. 271–282.
15. 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 Combustion and Heat Technics: Univ. of Miskolc, May 27–29, 1998. – P. 103–113.
16. S o r o k a, B. Option of the type of fuel for firing of the reheating furnaces founded upon efficiency, maintenance and environmental points of view (A tuzeloanyag kiválasztásának lehetőségei a hevítő kemenceknél, tekintettel a gazdaságosságra, a karbantartási igényekre és a környezetvédelmi szempontokra) / B. Soroka, P. Shandor // The 8th Metallurgical Conference on Energy – Environmental Materials Management. Balatonszeplak, 9–10 September, 1999. – Dunaferr – OMBKE. – P. 15–42 (англ. и венг.).
17. С о р о к а, Б. С. Развитие методов математического моделирования при энергоэкологическом анализе эффективности использования газового топлива / Б. С. Сорока // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 1999. – № 3. – С. 96–106.
18. С о р о к а, Б. С. Термодинамический анализ энергоэкологической эффективности использования топлива / Б. С. Сорока, П. Шандор // Промышленная теплотехника. – 1999. – Т. 21, № 6. – 43–50.
19. С т а т и с т и ч н і дані видобування та споживання енергоносіїв // Енергетика та електроніка, 2006 листопад. – № 1(П). – С. 9–10.
20. N a t i o n a l Ambient Air Quality Standards, Code of Federal Regulations / Boiler Emission Reference Guide. – Part 3: Pollutants. – Cleaver – Brooks, 2/92. – P. 9–15.
21. C r o c e, G. P. Control of Nitrogen Oxide Emissions in Gas-Fired Heaters – the Retrofit Experience / G. P. Croce, R. Patel, R. Sahu // Preprint – Paper, 1992. – № 52. – 18 p.
22. Impact of Clean Air Act Amendment of 1990 / Boiler Emission Reference Guide. – Cleaver – Brooks, 2/92. – P. 4–7, 16.
23. G e m m e r, R. V. Low NO_x Burners to Meet Title I of the Clean Air Act: A Road Map / R. V. Gemmer // 1995 North American Gas Efficiency Exposition & Conference Southern California Gas Company Energy Resource Center. – May 10–11, 1995. – P. 259–267.
24. V e n i n g e r, A. Practical Consideration for the Development of Industrial Low Emissions Combustor Study / A. Veninger [et al.] // Proceedings of US – Ukrainian Workshop on Advanced Aerothermal & Power Systems. May 20–25, 2001, Kiev. – CRDF. – 9 p.
25. I n d u s t r i a l Combustion Technology Roadmap: A Technology Roadmap by and for the Industrial Combustion Community / Facilitated by the US Department of Energy. – April 1999. – 46 p.
26. L e u c k e l, W. Combustion Fundamentals and Concepts of Advanced Burner Technology: Keynote Lecture / W. Leuckel // 6th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers: Estoril – Lisbon, 2–5 April, 2002. – INFUB. – 36 p.
27. В ы с о к о т е м п е р а т у р н ы е (HTR) сводовые излучающие горелки Bloom low- NO_x серии 2080, 2180, 2110. Горелки Ultra low- NO_x серии 1530, low- NO_x серии 1100 / Проспект. – Bloom Engineering // Информационные материалы. – Дюссельдорф; Фрейберг; Генуя; Париж, 2000. – 11 p.
28. A l l - H a l b o u n i, A. Kontinuierliche Luftstufung: Ein neuer Weg zur Beherrschung des Verbrennungs – und Schadstoffverhaltens von Gasflammen / A. All-Halbouni // Gas Wärme. – 2000. – 49J. – H. 4/5. – S. 207–212.
29. Г о р е л к и газовые промышленные. Предельные нормы концентраций NO_x в продуктах сгорания: ГОСТ Р 50591–93. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – С. 1–6.

Представлена научным семинаром
отдела процессов горения

Поступила 10.01.2007