

УДК 621.311:502.5

В. А. МАЛЯРЕНКО, д-р. техн. наук, профессор

Харківська національна академія міського господарства (г. Харьков, e-mail: malyarenko@ksame.kharkov.ua)

П. М. КАНИЛО, д-р техн. наук

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, e-mail: pmk@ipmach.kharkov.ua)

СЖИГАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ И ЭКОЛОГО-ХИМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Рассмотрены удельные интегральные показатели экологохимической опасности энергетических установок при сжигании органических топлив. Излагаются результаты комплексного исследования содержания канцерогенных веществ (включая и тяжелые металлы) в дымовых газах, сточных водах и золе энергоблоков угольной ТЭС при использовании мазутной и газовой подсветки.

Розглянуто питомі інтегральні показники екологіхімічної небезпеки енергетичних установок при спалюванні органічних палив. Викладаються результати комплексного дослідження вмісту канцерогенних речовин (включаючи і важкі метали) у димових газах, стічних водах і золі енергоблоків вугільної ТЕС при використанні мазутного та газового підсвічування.

Общие вопросы

Исторически сложилось, что долгое время экономика Украины развивалась в направлении преимущественного развития энергоемких отраслей промышленности: горнодобывающей, металлургической, химической, тяжелого машиностроения, энергетики. На первом этапе развития экономики Украины это было обусловлено наличием соответствующих ресурсов, развитой инфраструктурой, благоприятными климатическими и горно-геологическими условиями.

Украина, обладая достаточно мощным топливно-энергетическим комплексом (ТЭК), имеет в нем большую часть устаревшего, технически изношенного оборудования и установок [1–4]. Сегодня проблема энергообеспечения уже переросла в проблему национальной безопасности. От ее решения непосредственно зависит возможность окончательного решения внутренних и внешних кризисных процессов в экономике и политике. Чрезвычайно важным является всеобщее осмысление проблем энергообеспечения, технического и экономического обоснования мероприятий по энергосбережению. Проектом комплексной государственной программы энергосбережения Украины предусмотрено увеличить энергетическую эффективность электрических станций и снизить негативное влияние их на окружающую среду, увеличив КПД агрегатов, заменив старые агрегаты на новые образцы, внедрив парогазовые технологии.

Человечество волнуют две проблемы, которые непосредственно связаны с теплоэнергетикой:

- на какое время хватит топливно-энергетических ресурсов ?
- до какой грани возможно дальнейшее загрязнение окружающей среды?

Что касается первой проблемы, прогнозы не столь оптимистичны. Сейчас мировое использование энергоресурсов эквивалентно 30 млрд. т условного топлива. На современном уровне потребления энергии человечеству хватит органического топлива

электрической энергии вырабатывают на основе сжигания ископаемых органических топлив и преобразования их химической энергии в тепловую и электрическую.

Известно, что объекты теплоэнергетики являются определяющими в потреблении воды и кислорода, а также в тепловом загрязнении ОС. С продуктами сжигания топлив выбрасываются (от общего количества): ~ 30 % твердых аэрозольных частиц, ~ 60 % оксидов серы (SO₂) и азота (NO_x), а также основная доля CO₂ как определяющего фактора возникновения "парникового эффекта", приводящего к потеплению климата. В энергетике Украины широко используются низкосортные топлива, характеризующиеся низкой реакционной способностью, низкой теплотой сгорания и высокой зольностью. Это ведет к ухудшению экономичности электрических станций вследствие понижения их эффективной мощности и увеличения расхода высококалорийных топлив (природного газа и мазута) для покрытия тепловых нагрузок.

Разведанные запасы угля в Украине составляют более 47 млн т. На современном уровне добычи этого угля хватило бы на 100–200 лет. Но технология добычи угля не соответствует геологическим особенностям месторождений, почти 80 % тепловых электрических станций (ТЭС) физически и морально устарели, уровень потерь энергоресурсов выше уровня их добычи, увеличивается загрязнение окружающей среды.

Анализ экологохимической опасности энергетических установок

Потенциал электроэнергетики Украины на начало XXI ст. составил 44 мощных ТЭС, 7 ГЭС и 5 АЭС (табл.1) [3, 5].

Таблица 1

Технико-экономические показатели работы энергетики Украины

Тип электростанции	Установленная мощность		Производство электрической энергии	
	млн. кВт	доля, %	млн. кВт·ч	доля, %
ТЭС	36,4	67,5	33,98	39,1
ГЭС	4,7	8,7	9,73	11,2
АЭС	12,8	23,8	40,76	46,9
Другие источники энергии			2,43	2,8
Всего	53,9	100	86,9	100

Удельные показатели выбросов вредных веществ с дымовыми газами (ДГ) ТЭС и отработавшими газами (ОГ) газотурбинных установок (ГТУ) при использовании различных топлив приведены в табл. 2–5 [1–4].

Таблица 2

Удельные показатели загрязнения атмосферы (г/кВт·ч) от сжигания органических топлив (по данным Международного института прикладного системного анализа, г. Вена)

Выбросы	Вид топлива			
	каменный уголь	бурый уголь	мазут	природный газ
SO ₂	6,0	7,7	7,4	0,002
NO _x	2,8	3,4	2,4	1,9
Твердые частички	1,4	2,7	0,7	–
Фтористые соединения	0,05	1,11	0,004	–

Таблица 3

Валовые выбросы (тыс. т/год) и расход топлива на ТЭС мощностью 1000 МВт [2]

Выбросы	Вид и годовой расход топлива		
	природный газ (1,9 · 10 ⁹ м ³)	мазут (1,57 · 10 ⁶ т)	уголь (2,3 · 10 ⁶ т)
SO ₂	0,012	52,7	139,0
NO _x	12,0	22,0	21,0
CO	Незначительное	0,08	0,21

Продолжение таблицы 3

Твердые частицы	0,46	0,73	4,49
Гидрокарбонаты	Незначительное	0,67	0,52

Примечание. Содержимое: в мазуте $S^P = 1,6\%$; в угле $S^P = 3,59\%$.

Таблица 4

Параметры токсичности дымовых газов энергоустановок с котлоагрегатами и паровыми турбинами

Параметр	Тип котлоагрегата		
	ТП-100	ТПП-210	ТПП-210
Вид топлива	Уголь с мазутной подсветкой	Уголь с газовой подсветкой	Природный газ
$\bar{N}_{эл}$	1	1	1
α	2,13	1,89	1,49
$C_{NO_x}, \text{мг/м}^3$	555	627	664
$C_{SO_2}, \text{мг/м}^3$	2315	1670	следы
$C_{БП}, \text{мг/м}^3$	$0,16 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-3}$	следы
$(\overline{\text{ЭХО}}_{NO_x}), \%$	21	29	100
$(\overline{\text{ЭХО}}_{SO_2}), \%$	78	70,5	–
$(\overline{\text{ЭХО}}_{БП}), \%$	1,0	0,5	–
$\sum (\overline{\text{ЭХО}}_i)_j \cdot 10^{-3}$	~ 48	~ 39	~ 12
K_j	~ 2,3	~ 1,5	~ 1,7

* – Основная доля канцерогенных веществ и тяжелых металлов уносится со шлаком и золой, смываемой с электрофильтров. Нормативные данные: $[NO_x]_{ТП-100} = 600$; $[NO_x]_{ТПП-210} = 750$; $[NO_x]_{ТПП-210(\text{природный газ})} = 390 \text{ мг/нм}^3$.

Таблица 5

Параметры токсичности ОГ энергетических ГТУ

Параметр	Тип ГТУ							
	ГТ-100-750				ГТ-35-770			
Вид топлива	Газотурбинное ($S^P=1,0\%$)				Природный газ			
$\bar{N}_{э}$	0	1	0	1	0	1	0	1
L	7,0	4,0	8,0	4,5	8,5	4,5	9,0	5,5
$C_{NO_x}, \text{мг/м}^3$	100	300	70	170	60	170	40	220
$C_{SO_2}, \text{мг/м}^3$	292	511	250	445	–	–	–	–
$C_{БП}, \text{мкг/м}^3$	0,83	0,4	0,15	0,08	–	–	–	–
$C_{ТЧ}, \text{мг/м}^3$	100	30	8,0	15,0	–	–	–	–
$C_{CO}, \text{мг/м}^3$	375	62	625	62,0	430	10	500	–
$(\overline{\text{ЭХО}}_{NO_x}), \%$	15	34	19	27	71	100	57	100
$(\overline{\text{ЭХО}}_{SO_2}), \%$	39	54	63	65	–	–	–	–
$(\overline{\text{ЭХО}}_{БП}), \%$	9	4	4	1,5	–	–	–	–
$(\overline{\text{ЭХО}}_{ТЧ}), \%$	34	8	5	6	–	–	–	–
$(\overline{\text{ЭХО}}_{CO}), \%$	3	–	9	0,5	29	–	43	–
$\sum (\overline{\text{ЭХО}}_i)_j \cdot 10^{-3}$	~12	~15	~6	~11	~1,5	~3	~1,2	~4
K_j		~2,7		~2		~1,1		~1,5

При обобщении приведенных выше данных предложены удельные интегральные показатели экологохимической опасности (ЭХО) энергетических установок

$$\begin{aligned}
 (\text{ЭХО}_i)_j &= A_i \cdot C_i, \\
 \sum (\text{ЭХО}_i)_j &= \left\{ \sum A_i \cdot C_i \right\}, \\
 \overline{(\text{ЭХО}_i)_j} &= 100 \cdot \left\{ \frac{(\text{ЭХО}_i)_j}{\sum (\text{ЭХО}_i)_j} \right\}, \%,
 \end{aligned}$$

где A_i , C_i – соответственно относительный показатель уровня токсичности и концентрация (мг/м³) i -го вредного ингредиента в ДГ и ОГ ($A_{\text{NO}} = 15,0$; $A_{\text{NO}_2} = 41,5$; $A_{\text{SO}_2} = 16,4$; $A_{\text{ТЧ(сажа)}} = 41,5$; $A_{\text{БП}} = 12,6 \cdot 10^5$; $A_{\text{CO}} = 1,0$ [2]); $\sum A_i \cdot [C_i]$ – допускаемые в настоящее время условно нормативные (технологические) уровни токсичности ДГ или ОГ.

Так как суммарный уровень токсичности ДГ и ОГ энергоустановок при работе на номинальном режиме в основном определяется концентрациями NO_x ($0,9\text{NO} + 0,1\text{NO}_2$) и SO_2 , то $A_{\text{NO}_x} = (0,9 \cdot A_{\text{NO}} + 0,1 \cdot A_{\text{NO}_2}) = 17,7$.

Таким образом,

$$\begin{aligned}
 \sum (\text{ЭХО}_i)_j &= 17,7 \cdot C_{\text{NO}_x} + 16,4 \cdot C_{\text{SO}_2}, \\
 \text{а } \sum [\text{ЭХО}_i]_j &= 17,65 \cdot [C_{\text{NO}_x}] + 16,4 \cdot [C_{\text{SO}_2}].
 \end{aligned}$$

Учитывая, что относительные показатели уровней токсичности ДГ или ОГ энергоустановок ($A_{(\text{NO} + \text{NO}_2)}$ и A_{SO_2}) практически одинаковы, можно принять $[C_{\text{NO}_x}] = [C_{\text{SO}_2}]$. Тогда можем определить уровень превышения токсичности ДГ или ОГ энергоустановок относительно принятых (предложенных) нормативных уровней

$$K_j = \frac{A_{\text{NO}_x} \cdot C_{\text{NO}_x} + A_{\text{SO}_x} \cdot C_{\text{SO}_2}}{A_{\text{NO}_x} \cdot [C_{\text{NO}_x}] + A_{\text{SO}_x} \cdot [C_{\text{SO}_2}]}.$$

В странах СНГ для котлоагрегатов нормы $[\text{ПДК}_{\text{NO}_x}]$ устанавливаются исходя из концентрации кислорода в ДГ, и они зависят от категории котлов и вида топлив (табл. 6) [2, 6].

Таблица 6

Нормы $[\text{ПДК}_{\text{NO}_x}]$ (мг/м³) в дымовых газах котлоагрегатов (для стран СНГ, при $\alpha = 1,4$)

Вид топлива	Котлы I-й категории		Котлы высшей категории	
	Паровая мощность, т/ч			
	≤420	>420	≤420	>420
Природный газ	320	390	300	350
Мазут	340	440	300	350
Бурый уголь и сланцы	550	550	500	500
Каменный уголь	600	750	500	500

Для современных ГТУ нормы $[\text{ПДК}_{\text{NO}_x}]$ в ОГ составляют 150 мг/м³ (при содержании в них кислорода на уровне 15%).

Из представленных данных следует:

1. При работе ТЭС на угле определяющими вредными ингредиентами в ДГ являются SO_2 и NO_x , а при работе на природном газе – NO_x ; суммарная экологохимическая опасность ДГ при работе на природном газе примерно в 4 раза ниже, чем при работе на угле; рассмотренные блоки ТЭС примерно в два раза превышают установленные нормативные (технологические) требования к токсичности ДГ; основная доля канцерогенных веществ и тяжелых металлов уносится со шлаком и с золой, смываемой с электрофильтров;

2. При работе ГТУ на газотурбинном топливе определяющими вредными ингредиентами в ОГ являются SO_2 и NO_x , а при работе на природном газе – NO_x ; суммарная экологохимическая опасность ГТУ при работе на природном газе примерно в 3 – 4 раза ниже, чем при работе на нефтяном газотурбинном топливе; рассмотренные ГТУ в 1,1 – 2,7 раза превышают установленные нормативные (технологические) требования к токсичности ОГ.

Исследование содержания канцерогенных веществ в выбросах энергоблоков угольной ТЭС

Особо вредными для человека ингредиентами, выбрасываемыми с ДГ угольных ТЭС, являются: оксиды азота (NO_x) и серы (SO_2), мелкодисперсные аэрозоли, включающие золу, сажистые частицы, оксиды металлов и т.д., а также канцерогенные углеводороды. Причем канцерогенные углеводороды в значительной степени сорбируются на мелкодисперсных аэрозолях и могут накапливаться (как и тяжелые металлы) на значительных территориях вокруг ТЭС и в золоотвалах. Кроме того, в атмосфере под воздействием солнечной радиации из оксидов азота и канцерогенных углеводородов дополнительно могут синтезироваться нитроканцерогенные вещества, обладающие мутагенными свойствами и являющиеся предельно опасными для здоровья человека [2, 4, 5]. В международной практике в качестве индикатора присутствия канцерогенных веществ в атмосфере и продуктах сжигания топлив принят бенз(а)пирен (БП). Вышеизложенное определяет актуальность изучения ТЭС, работающих на угле с дополнительным использованием мазута или природного газа, как источников загрязнения атмосферного воздуха токсичными и канцерогенными веществами.

Были проведены комплексные исследования содержания токсичных и канцерогенных веществ (включая и тяжелые металлы) в ДГ, сточных водах и золе двух энергоблоков Змиевской ТЭС. Технические характеристики режимов их работы приведены в табл. 7 [3].

Таблица 7

Основные технические характеристики энергоблоков

Номер энергоблок	Мощность, МВт	Расход острог пара, т/ч	Топливо	Тип золоуловителя
6	178	530	Уголь с МП	Скруббер
10Б	135	450	Уголь с ГП	Электрофильтр

Где МП – мазутная подсветка, ГП – газовая подсветка.

Определение NO_x и SO_2 производилось за дымососами с помощью газоанализатора TESTO-350. Определение бенз(а)пирена в дымовых газах и сточной воде проводилось спектрально-флуоресцентным методом, пятиокиси ванадия (занимающего основную долю среди тяжелых металлов) – эмиссионным спектральным и фотометрическим методами.

С целью максимального улавливания БП из ДГ применялся отбор проб на аэрозольные фильтры типа АФА-РМА-20 (для улавливания аэрозолей) в сочетании с бензольными ловушками (для улавливания БП, находящегося в паровой фазе). Подготовка проб к анализу заключалась в извлечении БП из фильтров и проведении тонкослойной хроматографии. Количественный анализ БП в отобранных пробах проводился спектрально-флуоресцентным методом по квазилинейчатым спектрам люминисценции на спектрометре ДФС-12 методом добавок.

Результаты исследований уровней концентраций NO_x и SO_2 , БП и V_2O_5 в ДГ и сточной воде энергоблоков с мазутной и газовой подсветкой представлены в табл. 8 и 9.

Таблица 8

Концентрации токсичных и канцерогенных веществ в ДГ

Топливо	$\overline{NO_x}_{прив.}, \text{ мг/л}$	$\overline{SO_2}_{прив.}, \text{ мг/л}$	БП, мг/м^3	$V_2O_5, \text{ мг/м}^3$
Уголь с МП	844	3522	$(0,43*0,06)*10^{-3}$	$2,14*0,18$
Уголь с ГП	846	2254	$(0,41*0,04)*10^{-3}$	$1,61*0,41$

Таблица 9

Концентрации БП и V₂O₅ в сточной воде после золоуловителей

Топливо	Концентрация БП, мг/л		Концентрация V ₂ O ₅ , мг/л	
	в воде,	в осадке (золе)	в воде	в осадке (золе)
Уголь с МП	0,005*10 ⁻³	0,081*10 ⁻³	0,01	2,40
Уголь с ГП	0,002*10 ⁻³	0,034*10 ⁻³	0,01	2,27

Исследования показали, что степень улавливания бенз(а)пирена и пятиоксида ванадия золоуловителями – скрубберами составляет соответственно 61 % и 98 %, золоуловителями – электрофильтрами, соответственно, 67 % и 93 %. Таким образом, основная часть канцерогенных веществ и тяжелых металлов, содержащихся в дымовых газах, уносится в золоотвалы со сточной водой. Накопление указанных вредных веществ в золоотвалах является важнейшей составляющей экологической проблемы электростанций.

Экологический анализ полученных результатов целесообразно проводить с использованием показателя – уровня вредности ДГ [5]. Уровень вредности (Γ_i) – это отношение средней концентрации i -го вещества (\bar{C}_i) в ДГ к среднесуточной предельно допустимой концентрации этого вещества $[\text{ПДК}_i]_{\text{cc}}$ в атмосферном воздухе населенных мест:

$$\Gamma_i = \bar{C}_i / [\text{ПДК}_i]_{\text{cc}}.$$

Аналогично определяется уровень вредности исследуемых компонентов в сточной воде. Результаты исследований уровней вредности токсичных и канцерогенных веществ, выбрасываемых с дымовыми газами угольных котлоагрегатов Змиевской ТЭС, приведены на рис. 1.

На основании приведенных данных можно сделать вывод, что традиционные угольные блоки ТЭС существенно загрязняют атмосферу оксидами азота и серы, а также почву и воду канцерогенными составляющими и тяжелыми металлами. Решение этой проблемы может быть найдено на пути увеличения объемов углеобогащения, усовершенствования существующих технологий сжигания углей и внедрения новых угольных энерготехнологий, включая водородно-кислородно-плазменные.

Усовершенствование существующих методов сжигания углей, учитывая современное финансовое положение энергетики Украины, перспективно только на ближайшее десятилетие. При этом целесообразно выполнять: подачу угольной пыли высокой концентрации с подогревом воздуха до 600–700 К; модернизацию мельниц с увеличением тонкости помола; установку новых горелочных устройств, в том числе с предварительной термической подготовкой угля. Мероприятия, которые перечислены выше, наряду с капитальным ремонтом котлоагрегатов смогут продлить срок их эксплуатации на 10 – 20 лет и частично повысить энергетическую эффективность сжигания в них углей. Но эти мероприятия не позволят исключить природный газ или мазут из процессов сжигания углей, особенно высокозольных низкорекреационных углей, и существенно не изменят экологических показателей энергетических блоков ТЭС.

Для повышения эффективности использования указанных углей на ТЭС, повышения экологической чистоты процессов его термической переработки, обеспечения работы оборудования в маневренных режимах необходимо внедрение новых угольных энерготехнологий, к которым в первую очередь следует отнести: технологии с системами серо- и азотоочистки; методы сжигания углей в котлоагрегатах с плечевыми топками и вихревыми предтопками; технологии термической переработки углей, в том числе в различных модификациях кипящего слоя, а также плазменных технологий сжигания углей.

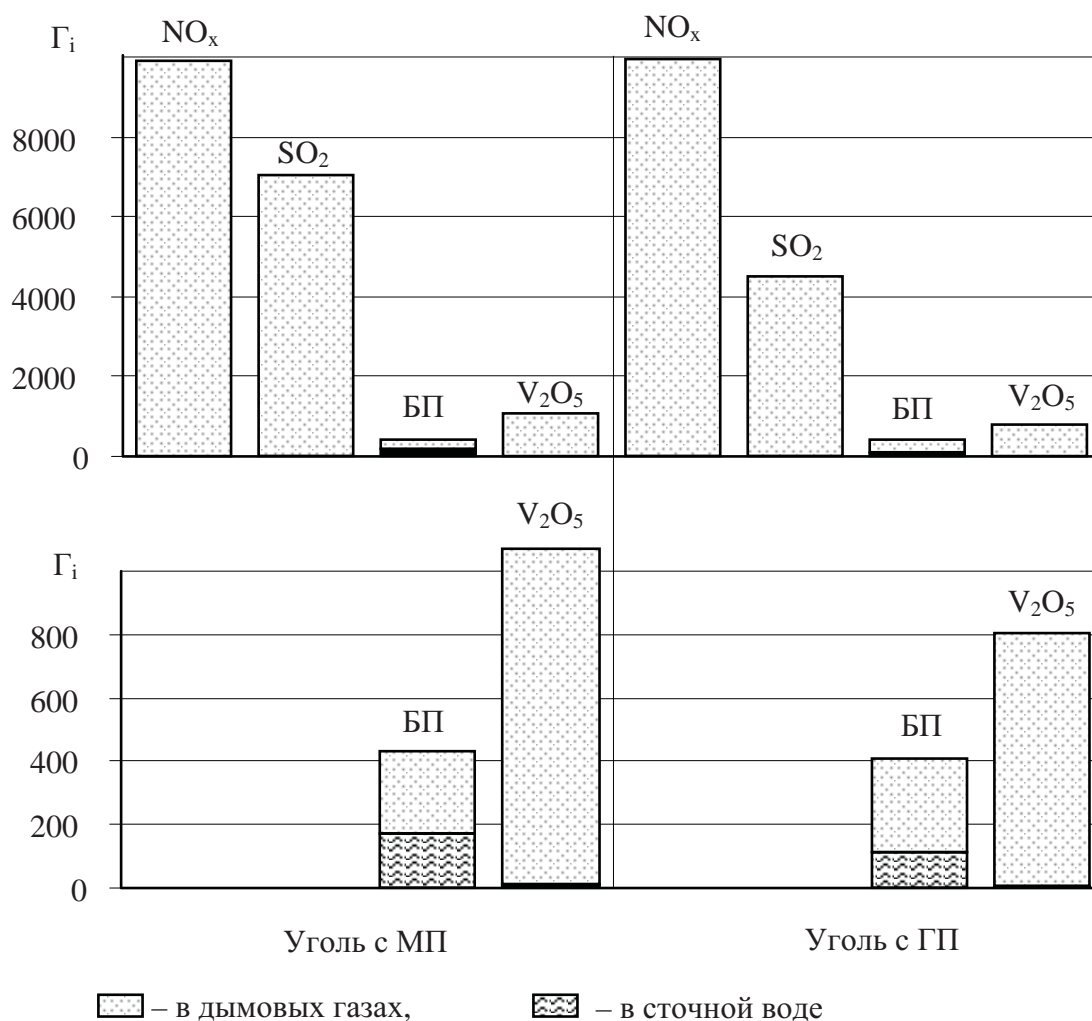


Рис. 1. Уровни вредности токсичных и канцерогенных веществ

Выводы

1. Особо вредными для человека ингредиентами, выбрасываемыми с дымовыми газами угольных тепловых электростанций, являются оксиды азота и серы; мелкодисперсные аэрозоли, включающие золу; сажистые частицы; оксиды металлов и т. д., а также канцерогенные углеводороды. Причем канцерогенные углеводороды в значительной степени сорбируются на мелкодисперсных аэрозолях и могут накапливаться (как и тяжелые металлы) на значительных территориях вокруг ТЭС и в золоотвалах.

2. Традиционные угольные блоки ТЭС существенно загрязняют атмосферу оксидами азота и серы, а также почву и воду канцерогенными составляющими и тяжелыми металлами. Эта проблема может быть решена путем увеличения объемов углеобогащения и внедрением новых угольных энерготехнологий.

3. Анализ внедрения ряда из указанных технологий в мире показывает, что существующие факельные технологии целесообразно использовать для термической переработки углей с зольностью менее 25 %, методы сжигания в плечевых топках и вихревых предтопках – с зольностью 20 – 30 %, а технологии кипящего слоя и возможно плазменные технологии – для использования высокозольных углей (с зольностью более 30 %).

Список литературы

1. Семиноженко В. П. Энергия. Экология. Будущее / В. П. Семиноженко, П. М. Канило, В. Н. Остапчук, А. И. Ровенский – Харьков: Прапор, 2003. – 464 с.
2. Варламов Г. Б. Теплоэнергетика та екологія / Г. Б. Варламов, Г. М. Любчик, В. А.

Маляренко. – Харків: САГА, 2008. – 234 с.

3. Маляренко В. А. Енергетика і навколишнє середовище / В.А. Маляренко. – Харків: САГА, 2008. – 364 с

4. Эффективность сжигания топлив и экология (энергоустановки и автомобили): Сб. науч. ст. / НАН Украины. Ин-т проблем машиностроения: Отв. ред. А.Н.Подгорный, П.М.Канило. – Харьков:, 1993. – Вып. 1. – 205 с.

5. Экология города. Учебник / Ф. В. Стольберг, В. Н. Ладыженский, В. А. Маляренко. – К: Либра, 2000. – 464 с.

6. Маршак Ю. Л., Артемьев Ю. П., Миронов С. Н. И др. Пути улучшения сжигания низкосортного антрацитного штыба на электростанциях. – Теплоэнергетика. – 1988. – № 9. – С. 2–10.

INCINERATION OF ORGANIC FUELS AND EKOLOGO-CHEMICAL SAFETY

V. A. MALIARENKO, Dr. Scie. Tech., Pf.

P. M. KANILO, Dr. Scie. Tech.

The specific integral indexes of ekologokhimicheskoy danger of the power settings are considered at incineration of organic fuels. The results of complex research of maintenance of carcinogenic matters (including heavy metals) are expounded in smoke gases, sewages and ash of power units of coal TES at the use of the oil-fired and gas illuminating from beneath.

Поступила в редакцию 12.10 2012