

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЯ НА ТЭС В СНГ И ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАНАХ**

**Кандидаты техн. наук ЗЕНИЧ Т. С., РОЗАНОВА Ф. А.**

*Институт радиационных физико-химических проблем НАН Беларуси*

Сегодня на долю Европы и Северной Америки приходится ~ 70 % мирового потребления энергии, причем 61 % обеспечивается за счет использования минерального сырья [1]. По прогнозам, в Европейских странах доля ископаемого топлива, используемого для выработки энергии, сократится с 89 % в 1985 г. до 83...84 % в 2010 г., но в то же время абсолютные объемы его потребления вырастут на 12...13% [1]. Для ряда Европейских стран, таких как Голландия, Бельгия, Англия, Германия, а также для России, Беларуси спрос на электроэнергию удовлетворяется прежде всего за счет тепловых электростанций (ТЭС). В Беларуси на сегодняшний день основными видами энергетического топлива являются природный газ и мазут. Однако нужно быть готовыми и к использованию угля в качестве топлива со всеми экологическими последствиями.

Исторически сложилось так, что уголь издавна был наиболее употребляемым топливом для выработки электроэнергии из-за большого числа месторождений и стабильной цены. Вследствие расширения торговли углем в мире строились ТЭС для всех типов угля, имевшихся на рынке, причем использовалось то топливо, которое было предпочтительнее с экономической точки зрения, но отнюдь не с экологической. В итоге доля выбросов ТЭС в суммарных антропогенных выбросах некоторых веществ весьма значительна. Так, вклад ТЭС мощностью свыше 300 МВт в выбросы  $SO_2$  составляет 85,6 %,  $NO_x$  – 81,4,  $CO_2$  – 79,  $N_2O$  – 35,7,  $CO$  – 16,8 % [2]. В последние годы большое внимание уделяется выбросам тяжелых металлов при работе ТЭС. В Германии оценили вклад выбросов тяжелых металлов от коммунальных электростанций, функционирующих на угле, в суммарные национальные выбросы. В 1990 г. они составили: для мышьяка – 27 %, ртути – 14, меди – 8, для кадмия – 7, для остальных тяжелых металлов – менее 6 % [2].

Существуют различные технологии снижения выбросов  $SO_2$ ,  $NO_x$ , а также тяжелых металлов. Например, чтобы уменьшить выбросы окислов серы, используют процессы десульфуризации дымового газа, которые обычно основаны на реакции  $SO_2$  со щелочным веществом; снижение выбросов окислов азота осуществляется методами денитрификации. Выбросы тяжелых металлов в основном сокращаются за счет использования пылеулавливающего оборудования, хотя меры, направленные на снижение выбросов окислов серы и азота, также способствуют уменьшению выбросов тяжелых металлов.

Выбросы тяжелых металлов в атмосферу зависят от многих параметров, которые могут изменяться в широком диапазоне (вплоть до нескольких порядков величины). В настоящее время в странах СНГ не существует

единых методических рекомендаций по расчету удельных выбросов тяжелых металлов при работе ТЭС, поэтому для расчетов используется соотношение, аналогичное предложенному в [2]. В этом случае выброс  $i$ -го тяжелого металла в атмосферу при сжигании 1 т угля определяется по формуле

$$m_i = G_i f_a f_{ei} (1 - f_{gi}) (1 - \eta) + G_i f_{gi}, \text{ г/т}, \quad (1)$$

где  $G_i$  – содержание  $i$ -го тяжелого металла в угле, г/т;  $f_a$  – доля летучей золы, покидающей зону в аэрозольном виде;  $f_{ei}$  – коэффициент обогащения для  $i$ -го тяжелого металла;  $f_{gi}$  – доля газообразной фракции для  $i$ -го тяжелого металла;  $\eta$  – доля летучей золы, улавливаемой в золоуловителе.

Таким образом, различия в удельных выбросах тяжелых металлов для Европейских стран и стран СНГ будут определяться различием в значениях параметров, входящих в (1).

**Содержание тяжелых металлов в топливе.** Как уже отмечалось, содержание тяжелых металлов в углях  $G_i$  значительно колеблется не только по бассейнам, но и по отдельным месторождениям одного бассейна и даже по угольным пластам одного месторождения. Размах колебаний может достигать четырех порядков [3]. Подобное положение характерно как для Европейских угольных бассейнов, так и для бассейнов СНГ, что подтверждается сведениями о содержании отдельных тяжелых металлов в углях разных стран, приведенными в [4–7].

**Свинец.** Содержание свинца в углях может изменяться в 1000 раз и более даже в пробах одного пластопересечения. Высокое его содержание (100...1000 г/т золы) наблюдается на ряде зарубежных месторождений (МНР, США). Значительные концентрации свинца имеются в пирите угольных пластов Англии, экстремально высокие – на территории бывшей ГДР (около 170 г/т угля и 2000 г/т золы).

**Кадмий.** Сведения о концентрации кадмия в углях СНГ практически отсутствуют. По зарубежным данным, повышенное содержание кадмия отмечается в углях, богатых цинком. Предполагается, что его фоновое содержание составляет около 0,5 г/т. Локальные концентрации Cd могут превышать фон на два порядка.

**Хром.** Содержание хрома в золе углей составляет: Англия – 114...177 г/т; США – 10...1000 г/т; Северная и Южная Дакота – 100...1000 г/т. В горючих сланцах наблюдаются более высокие концентрации по сравнению с углями. Есть данные об экстремально высоком содержании хрома в углях Англии – от 100 до 15000 г/т (по разным источникам). Неогеновые бурые угли Германии содержат 5...7 г/т Cr, а палеогеновые – 20 г/т Cr.

**Кобальт и никель.** Для этих элементов характерна тесная корреляция, поэтому они рассматриваются вместе. Данные об угольных включениях Англии содержат информацию о концентрациях никеля около 70 г/т. Каменные угли Германии богаты кобальтом: в шести из 22-х исследованных месторождениях он превышает 20 г/т. Для углей Рура характерно высокое содержание никеля –  $262 \pm 51$  г/т. Много кобальта и никеля в Островско-Карвинских углях: в среднем 150...200 г/т золы для никеля и 80...115 г/т для кобальта.

**Мышьяк.** Его содержание в углях изменяется в очень широких пределах (от 0,3 до 8000 г/т сухого угля) как для месторождений СНГ, так и для зарубежных бассейнов. В углях США среднее значение колеблется в пределах 0,5...93, в углях Англии – 60...220 г/т. Высоким содержанием мышьяка отличаются угли Чехии, Бельгии. В бурых углях Австрии концентрация As превышает 80 г/т, вазейские угли Германии содержат около 240 г/т, а в других месторождениях Германии его концентрация достигает около 400 г/т.

**Ртуть.** Среднее содержание ртути в углях также колеблется в широком диапазоне – от 0,001 до 1000 г/т. Есть отдельные данные о содержании Hg в углях Англии (0,012 г/т) и Германии (0,008 г/т в Саарском, 0,01 г/т в Рурском бассейнах). В молодых бурых углях Германии ее концентрация составляет около 0,046 г/т. Крайне высокое содержание ртути наблюдается в углях Пенсильвании – 10,5 г/т, Монтаны – 33 г/т, Западной Вирджинии – 22,8 г/т. На территории СНГ аномально высокое содержание ртути (до 10000 г/т) встречается в Донбассе.

**Цинк.** Цинк в углях составляет около 35 г/т, причем его концентрация в бурых углях существенно не отличается для различных месторождений. В зарубежных каменных углях количество цинка в среднем выше за счет богатых им углей Западной Европы, Внутренней провинции США, Австралии. Высокое содержание цинка характерно для каменных углей Германии, например в месторождении Крок встречаются концентрации выше 1500 г/т.

**Медь.** Среднее содержание меди в углях СНГ – порядка 10 г/т. Для зарубежных углей характерна приблизительно такая же картина. Так, среднее содержание меди в основных бассейнах США – 11–15 г/т. В некоторых месторождениях Германии концентрация меди превышает 100 г/т.

Сведения о тяжелых металлах в углях основных бассейнов СНГ наиболее детально изложены в [8]. В [5] даны средние значения содержания тяжелых металлов в углях СНГ, зарубежных стран и по всему миру. Результаты обработки данных по содержанию тяжелых металлов в каменном угле (г/т) приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Элемент	СНГ	Зарубежные страны	По всему миру
Cr	15 ± 2	17 ± 3	16 ± 2
Co	4,9	–	5,2 ± 0,3
Ni	10,4	–	16 ± 2
Cu	18 ± 2	19 ± 3	18,5 ± 2
Zn	20 ± 5	27 ± 7	22 ± 4
As	27,0	–	20 ± 3
Cd	6,8*	–	0,6 ± 0,3
Pb	18 ± 3	30 ± 5	25 ± 3
Hg	0,05 ± 0,01	–	–

\* Кузнецкий бассейн.

Анализ приведенных выше данных свидетельствует о значительном разбросе содержания тяжелых металлов в углях разных месторождений – он может различаться на два-три порядка. В месторождениях практически

всех стран встречается аномально высокое содержание отдельных тяжелых металлов. Такими яркими примерами служат донбасские угли (СНГ) – ртуть, кузнецкие угли (СНГ) – кадмий, угли пласта «Топ Квин» (Англия) – свинец, месторождения Крок (Германия) – цинк, Северной и Южной Дакоты (США) – хром [6]. Но тем не менее осредненные сведения о содержании тяжелых металлов в каменном угле (табл. 1) свидетельствуют о том, что расхождение в этих величинах для СНГ, зарубежных стран и всего мира варьируется в пределах 2...50 %. Таким образом, можно считать, что этот параметр не будет вносить существенное различие в расчет удельных выбросов, за исключением тех случаев, когда при работе ТЭС используются угли с явно аномальным содержанием какого-либо тяжелого металла.

Обобщенные данные по таким аномалиям и превышение их осредненных значений по всему миру (г/т), полученные на основе опубликованных данных, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Элемент	Англия		Германия		СНГ		США	
	$G_{i\max}^*$	$G_{i\max}/G_{i\text{ср}}^{**}$	$G_{i\max}^*$	$G_{i\max}/G_{i\text{ср}}^{**}$	$G_{i\max}^*$	$G_{i\max}/G_{i\text{ср}}^{**}$	$G_{i\max}^*$	$G_{i\max}/G_{i\text{ср}}^{**}$
Cr	330	20,6	–	–	46	2,9	400	25
Ni	670	41,9	262	16,4	21	1,3	60	3,7
Zn	–	–	1700	77,3	285	13	80	3,6
As	220	11	240	12	80	4	93	4,6
Pb	490	19,6	170	6,8	27	1,1	36	1,4
Hg	0,012	–	0,022	–	1,25	–	1,73	–
Cd	–	–	–	–	6,8	11,3	21	35
Co	34	6,5	66	12,7	9	1,7	90	17,3
Cu	36	1,9	370	20	26	1,4	180	9,7

\* Максимальное зафиксированное в литературе содержание данного тяжелого металла в углях страны.

\*\* Отношение максимального содержания данного тяжелого металла в углях страны к среднему значению по миру.

Как видно из табл. 2, максимальные содержания тяжелых металлов могут в 1,5...70 раз превышать средние значения по миру.

**Доля летучей золы, покидающей зону сгорания в аэрозольном виде.** Значения этого параметра существенным образом зависят от вида топлива, конструкции топki, производительности котла. Для камерных топок в СНГ с твердым шлакоудалением оно составляет 0,95; для котлов производительностью свыше 75 т/ч в случае жидкого шлакоудаления эта величина равна: 0,75 – открытые и полуоткрытые топки; 0,55 – двухкамерные топки и 0,15 – циклонные топки [9].

В Европейских странах используются следующие методы сжигания угля [2]:

1) котлы с твердым шлакоудалением, где температура в камере сгорания составляет 900...1200 °С. Этот тип котлов используется в основном для сжигания антрацита и лигнита; рекомендуемое для расчета значение  $f_a$  составляет 0,80 [10];

2) котлы с жидким шлакоудалением. Этот тип котлов используется для сжигания кокса с низким содержанием летучих веществ и широко распространен в Германии;

3) котлы с сжиганием в псевдоожиженном слое. Здесь используются сравнительно низкие температуры сгорания, около 750...950 °С. Этот метод применяется на нескольких крупных электростанциях; рекомендуемое для расчета значение  $f_a$  составляет 0,15 [10];

4) котлы с сжиганием на колосниковой решетке. При использовании этого метода температура сгорания составляет 1000...1300 °С. Рекомендуемое для расчета значение  $f_a$  составляет 0,50 [10].

Что касается котлов с жидким шлакоудалением, то в литературе сообщается, что их выбросы содержат сравнительно высокую долю мелкодисперсных частиц.

**Коэффициент обогащения, доля газообразной фракции.** Формула (1) получена для высокоэффективного улавливания летучей золы. В этом случае мелкодисперсная зола, которая не улавливается золоуловителем, будет содержать тяжелые металлы в концентрации, в несколько раз превышающей их содержание в исходном топливе. Такой процесс учитывается введением коэффициента обогащения.

Большинство металлов выбрасывается в виде аэрозоля. Однако ртуть, селен и мышьяк частично присутствуют в газовой фазе, что учитывается коэффициентом  $f_{gi}$ , который составляет 0,005 для As, 0,15 для Se и 0,90 для Hg [10]. Значения параметра  $f_{ei}$  приведены в табл. 3 [10].

Таблица 3

Элемент	As	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Se	Zn	Hg
$f_{ei}$	5,5	7,0	2,3	1,0	3,3	6,0	7,5	7,0	1,0

**Эффективность золоуловителя.** В общем случае величина КПД золоуловителя  $\eta$  является заданным параметром для конкретной ТЭС. Величины, соответствующие нормативам стран СНГ, приведены в табл. 4 [11].

Таблица 4

Мощность агрегата	Тип золоуловителя	$\eta$
Блоки 200 МВт	Электрофильтры	0,980
Блоки 200 МВт	Батарейные циклоны	0,940
Блоки 300 МВт	Электрофильтры	0,990
Блоки 500 МВт	Электрофильтры	0,995
Блоки 800 МВт	Электрофильтры	0,988
Котлы производительностью 35 т/ч	Электрофильтры	0,977
Котлы производительностью 35 т/ч	Рукавные фильтры	0,992

Однако, как показывает анализ эффективности работы пылегазоочистительного оборудования, нормативные значения КПД золоуловителей на ТЭС в СНГ практически не достигаются. Обычно это связано либо с износом очистного оборудования, либо с нарушениями технологии очистки.

В НИИ «Атмосфера» (г. Санкт-Петербург) получена усредненная величина КПД золоулавливания для энергетики, которая составляет около 0,91. Аналогичный результат получается при анализе данных, приведенных в [12]. В коммунально-бытовом хозяйстве и промышленности коэффициент золоулавливания значительно ниже и, по данным НИИ «Атмосфера», составляет около 0,70. Коэффициенты обогащения, приведенные в табл. 3, были получены для КПД золоуловителя, равного 0,99. Для определения этих величин в случае более низких КПД в первом приближении можно использовать линейную зависимость, полагая, что при  $\eta = 0$  коэффициенты обогащения равны 1 и при  $\eta = 0,99$  они определяются в соответствии с табл. 3.

В странах Западной Европы в качестве золоуловителей используются циклоны, мокрые скрубберы, электрофильтры и тканевые фильтры. Последние два типа весьма эффективны (0,99) для улавливания мелкодисперсных частиц. Минимальная эффективность очистки при использовании электростатических осадителей или тканевых фильтров составляет: 0,99 для Co, Cr и Zn; 0,98 для As, Cu и Ni; 0,95 для Cd, Pb, Se [2]. Что касается газообразных элементов, то исследования показали, что эффективность их удаления составляет 30...50 % для Hg и 60...75 % для Se [2].

Анализ возможных значений параметров, входящих в (1), позволяет сделать следующие выводы:

- среднее содержание тяжелых металлов как в углях СНГ, так и в углях зарубежных стран определяется величинами одного порядка, и этот параметр не оказывает существенного влияния на рассчитанные значения удельных выбросов. Поэтому для проведения сравнительных расчетов были использованы средние мировые данные. При сжигании на ТЭС углей с аномально высоким содержанием какого-либо тяжелого металла полученное значение удельных выбросов следует умножить на соответствующий коэффициент из табл. 2;

- доля летучей золы, покидающей зону горения в аэрозольном виде, изменяется в диапазоне от 0,15 до 0,95 для котлов, используемых в СНГ, и от 0,15 до 0,80 – в Европейских странах. Наиболее существенное отличие наблюдается для котлов с твердым шлакоудалением (0,95 для камерных топков СНГ и 0,80 для европейских котлов);

- доля газообразной фракции металла – это параметр, который связан с особенностями поведения того или иного вещества в процессе горения, и его можно считать одинаковым для всех ТЭС;

- эффективности золоуловителей на европейских ТЭС и ТЭС СНГ близки, если судить по нормативным параметрам (приблизительно 0,99), однако данные технико-экономических показателей ТЭС СНГ свидетельствуют о том, что на практике этот показатель обычно не достигается и в среднем составляет около 0,91. Отличие этого параметра автоматически ведет к изменению факторов обогащения.

Чтобы сравнить удельные выбросы, были проведены расчеты для европейских ТЭС и ТЭС СНГ. Содержание тяжелых металлов принималось одинаковым и равным среднемировому. Значения коэффициентов обогащения для  $\eta < 0,99$  находились путем линейной интерполяции, как это описано выше. Результаты расчетов (г/т) приведены в табл. 5.

Таблица 5

Элемент	ТЭС СНГ, $\eta = 0,91$		ТЭС Европейских стран, $\eta = 0,99$	
	$f_a = 0,95$	$f_a = 0,15$	$f_a = 0,80$	$f_a = 0,015$
Cr	1,37	0,21	0,13	0,024
Ni	1,70	0,27	0,42	0,079
Zn	3,00	0,48	1,29	0,23
As	2,58	0,49	0,98	0,26
Pb	3,23	0,51	1,20	0,22
Hg*	0,045	0,045	0,045	0,045
Cd	0,083	0,013	0,034	0,0063
Cu	1,79	0,28	0,34	0,064

\* Для ртути принято среднее содержание в углях СНГ.

В [2] приводятся значения удельных выбросов для европейских котлов с твердым шлакоудалением при сжигании антрацита для случаев: контроля пыли и контроля пыли и десульфуризации дымового газа (табл. 6).

Таблица 6

Элемент	Удельные выбросы, г/т	
	Контроль пыли	Контроль пыли + десульфуризация
Cr	0,04...0,2	0,02...0,06
Ni	0,03...0,4	0,01...0,5
Zn	0,03...1,3	0,01...0,5
As	0,03...0,3	0,01...0,1
Pb	0,02...1,1	0,007...0,5
Hg	0,05...0,2	0,02...0,08
Cd	0,003...0,01	0,0001...0,004
Cu	0,01...0,4	0,006...0,2

Сравнение наших расчетов для европейских ТЭС с  $f_a = 0,80$  (что соответствует котлам с твердым шлакоудалением) с данными табл. 6 показывает, что они в основном находятся в диапазоне, указанном в первой колонке (ближе к максимальному значению). Завышенное значение удельных выбросов для мышьяка, вероятно, свидетельствует о несоответствии среднего мирового содержания этого элемента в углях содержанию в углях европейских месторождений.

## ВЫВОДЫ

1. Приведена методика для оценки удельных выбросов тяжелых металлов при работе ТЭС и оценены возможные значения параметров, входящих в (1), а также диапазон их изменения.

2. Проведено сравнение удельных выбросов тяжелых металлов при работе ТЭС СНГ и Европейских стран, которое показывает, что практически

для всех металлов эти величины для ТЭС СНГ в 3...4 раза выше, чем для ТЭС Европейских стран.

3. Процесс десульфуризации, наряду со снижением выбросов SO<sub>2</sub>, позволяет в 2...3 раза снизить эмиссию тяжелых металлов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sustainable energy developments in Europe and North America / Econ. Comiss. For Europe / Geneva – N.-Y. UN, 1991. – VII. – 217 p.
2. Atmospheric Emission Inventory Guidebook. A joint EMEP/CORINAIR Production Prepared by the EMEP Task Force on Emission Inventories. – 1996.
3. Юровский А. Э. Минеральные компоненты твердых горючих ископаемых. – М., 1968. – 215 с.
4. Клер В. Р. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. – М., 1987. – 237 с.
5. Юдович Я. Т., Кетрис М. П., Мерц А. В. Элементы-примеси в ископаемых углях. – Л., 1985. – 238 с.
6. Юдович Л. Э. Грамм дороже тонны: Редкие элементы в углях. – М.: Наука, 1989. – 157 с.
7. Лебедев В. В. Комплексное использование углей. – М., 1980. – 238 с.
8. Шпирт М. Я., Клер В. Р., Перциков И. З. Неорганические компоненты твердых топлив. – М.: Химия, 1990. – 239 с.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. – М., 1973.
10. Emission factors manual PARCOM-ATMOS. Emission factors for air pollutants. Final version – TNO Report 92-233/112322. – 1992.
11. Розанова Ф. А., Зенич Т. С. Способы оценки выбросов от стационарных топливосжигающих устройств в Беларуси. Сравнение с «Руководством по инвентаризации выбросов ЕМЕП/СОРНАИР»: Докл. на междунар. семинаре по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. – Мн., 1–2 октября, 1997.
12. Обзор технико-экономических показателей и анализ топливоиспользования тепловых электростанций Минэнерго СССР за 1991 год. – М., 1992.

Представлена Ученым советом  
ИРФХП НАН Беларуси

Поступила 22.05.2001

УДК 536.24

### **ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ ВЫНУЖДЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ**

**Докт. техн. наук, проф. ИСАЕВ Г. И., канд. техн. наук ГУСЕЙНОВ Т. А.,  
инженеры АЛИЕВА С. Х., ВЕЛИЕВА Ш. А., ТАГИЕВА З. Г.**

*Азербайджанская государственная нефтяная академия*

Теплоотдача при ламинарном режиме вынужденного движения жидкости в условиях сверхкритических давлений (за исключением [1, 2]) практически не исследована. Причем в указанных работах экспериментальные данные по коэффициенту теплоотдачи углеводородов (толуол и бензол)