

УДК 537.523;533.9

## **Исследование состава и свойств шлака при плазменном переплаве золы мусоросжигательных заводов**

**Х.С. Пак**

*Университет Дженджу, Дженджу, Республика Корея*

E-mail: hnsepark@unitel.co.kr

В статье представлены результаты исследования плазменного переплава смеси подовой и летучей золы мусоросжигательных заводов при различном соотношении ее компонент. Различными методами выполнен анализ химического состава подовой и летучей золы, а также получаемого из них шлака, определено содержание в них токсичных компонент. Показано что прямое захоронение летучей и подовой золы мусоросжигательных заводов может привести к загрязнению окружающей среды диоксинами и тяжелыми металлами. Проведено исследование влияния основности переплавляемой золы на химический состав получаемого шлака. Определен массовый баланс процесса переплава. Проведены тесты на выщелачивание тяжелых металлов из золы и шлака. Показано, что в результате плазменного переплава получается свободный от диоксинов, экологически безопасный шлак.

**Ключевые слова:** плазменный переплав, зола мусоросжигательных отходов, диоксины, экология, химический состав, тяжелые металлы, выщелачивание.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из путей переработки опасных отходов является разработка технологий их стабилизации или отверждения. Стабилизация означает снижение реакционной способности или растворимости вследствие изменения химических или поглощающих свойств, в то время как отверждение переводит отходы в твердое состояние для удобства дальнейшей обработки и снижает опасность испарения, выщелачивания, утечки и т. д. Однако эти методы увеличивают объем отходов и, кроме того, не могут полностью предотвратить выбросы тяжелых металлов. Поэтому созданы мусоросжигательные заводы различных типов, на которых происходит многократное сокращение [1, 2] объема и веса перерабатываемых отходов. Однако при этом выделяются вторичные загрязняющие вещества. Так, например, зола мусоросжигательных заводов содержит токсичные вещества, такие, как диоксины, фураны, тяжелые металлы и др., что может приводить к вторичному загрязнению почв или грунтовых вод [3, 4]. Кроме того, из-за нехватки земель существует проблема с ее захоронением. В связи с развитием технологий сжигания бытовых отходов являются актуальными исследования, направленные на переработку золы мусоросжигательных заводов. Плавление представляется наиболее перспективной из существующих в этой области технологий. Плавление снижает

объем золы и переводит ее в химически инертный шлак, что блокирует последующее выщелачивание из него токсичных веществ. Большая часть легкокипящих компонентов золы при этом испаряется из расплавленного шлака [5, 6, 7].

Для развития технологий переработки нужно знать такие свойства золы и шлака, как основность, вязкость, температура плавления, изменение этих свойств во времени, а так же в зависимости от степени смешения подовой (ПЗ) и летучей золы (ЛЗ) и т. д. Поэтому серия экспериментов была направлена на исследование свойств и состава шлака получаемого при плазменном плавлении различных смесей подовой и летучей золы.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема плазменной плавильной установки представлена на рис. 1. Как видно из рисунка, печь состоит из плавильной камеры 1, плазмотрона 2, который формирует поток плазмы, источника питания плазмотрона 3 и системы его запуска 4, устройств 5, 6, 7, 8, 9 для анализа, очистки и удаления газа, образующегося в результате процесса плавления. Для анализа отходящих газов использовалось устройство непрерывного контроля выбросов (Greenline 9000) 8, а сбор пыли и испарившихся в плавильной камере легкокипящих компонент производился циклоном 5 системы газоочистки.

Плавильная камера имеет огнеупорную подовую футеровку из  $MgO-Cr_2O_3$  и футеровку стен из  $Al_2O_3$ . Ее конструкция допускает поворот на  $180^\circ$  для слива шлака. Для плавления использовался плазмотрон струйного типа мощностью до 70 кВт. В качестве плазмообразующего газа использовался азот. В табл. 1 приведены условия экспериментов.

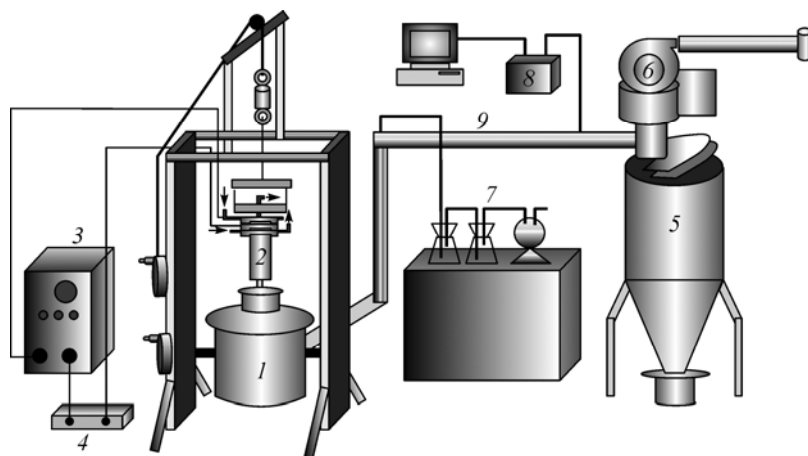


Рис. 1. Схема плазменной плавильной установки.

Таблица 1

Условия эксперимента по плавлению золы

Параметр		Значение		
Соотношение компонентов	Подовая зола (ПЗ)	5	4	3
	Летучая зола (ЛЗ)	5	6	7
Температура плавления		1400 ± 50		
Время плавления		10 мин/30 мин		
Интервал забора проб		10 мин		
Количество переплавляемой золы		500 г		

В табл. 2 приведены результаты компонентного анализа использованных в экспериментах подовой и летучей золы, а также содержание в них диоксинов. В экспериментах менялось соотношение подовой и летучей золы ПЗ: ЛЗ = 5: 5; 4: 6 и 3: 7.

Плавление проводилось порциями по 500 грамм. Предварительно смесь подовой и летучей золы течение 8 часов размалывалась в шаровой мельнице до состояния полной гомогенности, после чего гранулировалась для предотвращения ее распыления при плавлении. Температура плавления смеси замерялась при помощи термопары, и была определена как  $1400 \pm 50$  °С.

Поведение компонентов шлака в ходе плавления, определялось путем забора его проб через смотровое окно и последующего анализа рентгенолюминесцентным прибором XRF (Philips Co. PW 2400). В качестве плазмообразующего газа использовался азот. Компонентный анализ шлака проводился после его охлаждения в изложнице на воздухе. Для анализа наличия тяжелых металлов использовался метод атомно-эмиссионной спектроскопии в индуктивно связанной плазме (Jobin Yvon Co. Ultima), а для замеров концентрации диоксинов в летучей и подовой золе применялся масс-спектрометр высокого разрешения HRGC-HRMS (Waters Co. Autospec Ultima).

#### Формулы для анализа состава шлака

В связи с тем, что при плавлении смеси подовой и летучей золы мусоросжигательных заводов значительная доля ее компонентов испаряется, трудно оценить характеристики полученного шлака, если изменение его состава описывается только в процентах. Более адекватным параметром, позволяющим оценить поведение компонентов шлака, получаемого при плавлении золы, является эквивалентный состав. При этом рассматривается изменение состава шлака не в абсолютных значениях, а относительно некоторого компонента, потери которого в процессе плавления золы отсутствуют или несущественны.

Кальций является одним из элементов в составе золы мусоросжигательных заводов, пригодным для этих целей. Окись кальция при плавлении золы практически не испаряется. Хотя в исходной золе и существует  $\text{CaCl}_2$ , он имеет высокую температуру кипения и также незначительно теряется при переплаве. Кроме того, отсутствует его вымывание из огнеупорных материалов. Потери Ca при загрузке пропорциональны потерям других элементов. Поэтому Ca может быть использован как эталон эквивалентного состава. Кальциевый эквивалент определяется следующим образом:

$$N^{\text{eg}} = \frac{w_{T,\text{Ca}}^0}{w_{T,\text{Ca}}}, \quad (1)$$

где  $N^{\text{eg}}$  — кальциевый эквивалент,  $w_{T,\text{Ca}}^0$  — общее содержание Ca в исходной смеси,  $w_{T,\text{Ca}}$  — общее содержание Ca в полученном после плавления золы шлаке.

Таблица 2

Химический состав золы мусоросжигательных заводов																
	$T_{\text{Ca}}$ (CaO)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	T.Fe	T.Cr	T.Na	T.K	C	Cl	S	Zn	Cu	Cd	Pb	Диоксины (нг-TEQ/t)
П.З.	16,6 (23,6)	32,9	7,3	2,1	5,1	0,02	1,7	1,1	4,8	3,5	1,3	0,6	0,38	0,007	0,1	0,0019
Л.З.	17 (5,6)	10	3,4	2,2	0,7	0,02	6,7	6,9	2,5	39,2	4,8	1	0,43	0,027	0,37	3,5

Эквивалентный состав  $i$ -й компоненты шлака:

$$w_i^{\text{eq}} = w_i \times N^{\text{eq}}, \quad (2)$$

где  $w_i^{\text{eq}}$  — эквивалентное содержание  $i$ -той компоненты,  $w_i$  — содержание  $i$ -той компоненты в полученном шлаке. Уравнение (2) позволяет учесть потери легкокипящих компонент золы при анализе изменения состава шлака.

Изменение эквивалентного состава:

$$\Delta w_i^{\text{eq}} = w_i^{\text{eq}} - w_i^0, \quad (3)$$

где  $w_i^0$  — содержание  $i$ -той компоненты в исходном сырье.

Относительное изменение эквивалентного состава  $i$ -той компоненты шлака:

$$R_i^{\text{eq}} = \frac{\Delta w_i^{\text{eq}}}{w_i^0} \times 100 (\%) = (N^{\text{eq}} \times \frac{w_i^j}{w_i^0} - 1) \times 100 (\%). \quad (4)$$

Коэффициент конверсии шлака определяется согласно уравнению:

$$\text{Степень преобразования шлака} = \frac{\sum w_i^{\text{eq}}}{(\text{Вес влаги в смеси золы}) + \sum w_i^0}. \quad (5)$$

Эквивалентное содержание  $i$ -той компоненты в шлаке определялось по уравнению:

$$w_i^* = \frac{w_i^{\text{eq}}}{\sum w_i^{\text{eq}}} \times 100 (\%). \quad (6)$$

Уравнение (6) использовалось для расчетов скорректированного компонентного состава получаемого шлака.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТА

### Изменение исходного состава золы после ее расплавления

Изменение концентрации составляющих шлак оксидов влияет на его физические характеристики, такие как температура плавления, плотность, вязкость, электропроводность и поверхностное натяжение. Поэтому знание состава шлака, получаемого в непрерывном процессе плавления золы мусоросжигательных заводов, является важным технологическим параметром. Концентрация составляющих шлак оксидов не является величиной постоянной. Она меняется по сравнению с исходной величиной вследствие их вымывания из футеровки, протекания окислительно-восстановительных процессов, уноса легкокипящих компонент в процессе плавления золы.

На рис. 2 и 3 представлены результаты изменения состава шлака относительно исходного состава переплавляемой смеси с соотношением подовой и летучей золы 3:7. Как видно из рисунков, концентрация большей части составляющих основу компонент шлака, таких как  $T.Ca$  (общее содержание кальция),  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$  и  $T.Fe$ , растет по сравнению с исходной, в то время как содержание легколетучих составляющих ( $Na$ ,  $K$ ,  $C$ ,  $Cl$ ,  $S$ ) и тяжелых металлов ( $Zn$ ,  $Cu$ ,  $Cd$ ,  $Pb$ ) уменьшается. Величина потери легкокипящих компонент определялась по их остаточному содержанию в получаемом после плавления золы шлаке. В связи со значительной потерей массы золы в процессе ее плавления возникает необходимость

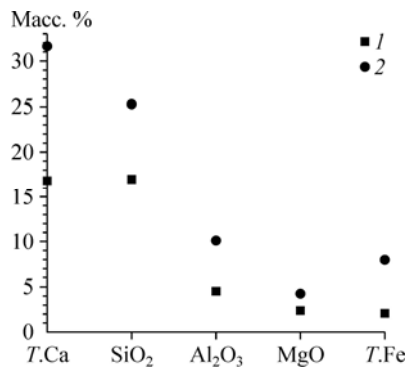


Рис. 2. Изменение содержания основных компонентов золы после ее плавления, соотношение ПЗ:ЛЗ = 3:7.

1 — концентрация компонентов в исходной золе, 2 — концентрация компонентов в шлаке.

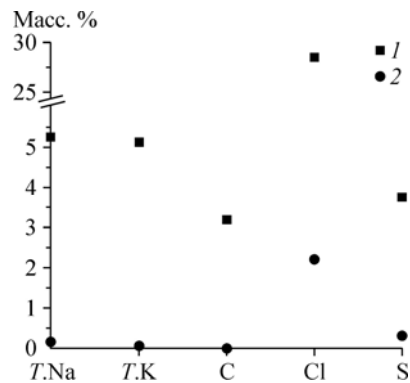
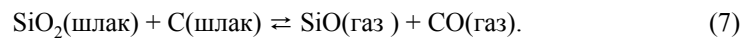


Рис. 3. Изменение содержания легкокипящих компонентов золы после ее плавления, соотношение ПЗ:ЛЗ = 3:7.

1 — концентрация элементов в исходной золе, 2 — концентрация элементов в шлаке.

коррекции полученных данных. Скорректированные по уравнениям (1)–(6) кальциевого эквивалента результаты эксперимента представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, после эксперимента эквивалентное количество  $\text{SiO}_2$  уменьшилось на  $\approx 5\%$ , по-видимому, в соответствии с уравнением реакции:



Эквивалентная концентрация  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{T.Cr}$  в шлаке увеличилась на 37%, 25% и 75%, соответственно. Это можно объяснить эрозией материала футеровки.

Таблица 3

Изменение эквивалентного состава шлака при плавлении золы						
		До эксперимента ( $w_i^o$ , вес.%)	После эксперимента ( $w_i^{eq}$ , вес.%)	(%)	Результат эксперимента	Примечание
Основные компоненты	T.Ca	16,89	16,89	–	–	
	SiO <sub>2</sub>	16,82	15,95	–5	снижено	Образование газа (SiO)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,51	6,16	+37	увеличено	Выход жаропрочных компонентов
	MgO	2,20	2,74	+25		Эрозия футеровки
	T.Fe	2,03	5,68	+180		Эрозия мельничных шаров
	T.Cr	0,02	0,16	+721		Эрозия футеровки
Газообразные компоненты	T.Na	5,23	0,13	–98	снижено	Образование газа (NaCl)
	T.K	5,13	0,03	–99		Образование газа (KCl)
	C	3,17		–		Образование газа (CO, CO <sub>2</sub> )
	Cl	28,51	0,63	–98		Образование газа (хлориды)
	S	3,77	0,20	–95		Образование газа (SO <sub>x</sub> )
Тяжелые металлы	Zn	0,882	0,258	–71	снижено	Образование газа (ZnCl, Zn)
	Cu	0,410	0,053	–87		Образование газа (CuCl)
	Cd	0,022	0,001	–95		Образование газа (Cd, CdCl)
	Pb	0,284	0,002	–99		Образование газа (PbO, PbCl)

По результатам анализа в шлаке значительно повысилось содержание  $T.Fe$  относительно его концентрации в исходной переплавляемой смеси. В составе футеровки отсутствуют соединения железа, поэтому увеличение его содержания нельзя объяснить эрозией футеровки, как это происходит в случае с  $MgO$ ,  $Cr_2O_3$  и  $Al_2O_3$ . Увеличение содержания железа, по-видимому, объясняется износом мелющих шаров в процессе размола исходной смеси. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Как и ожидалось, концентрация легкокипящих компонентов, таких как  $T.Na$ ,  $T.K$ ,  $C$ ,  $Cl$ ,  $S$  снизилась более чем на 95 %. Это вызвано их испарением в виде  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $HCl$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_x$  и т. д.

Как видно из табл. 3 потери тяжелых металлов:  $Cd$  и  $Pb$  составляют более 95 %, а количество  $Zn$  и  $Cu$  уменьшилось на 71 % и 87 %, соответственно.

#### Влияние длительности плавления шлака на его состав

Существует ряд параметров, влияющих на время плавления золы мусоросжигательных отходов в плавильной печи. Среди них такие, как теплота плавления, растворение тяжелых металлов в шлаке, коррозия футеровки, скорость плавления и так далее. В табл. 4 представлено изменение эквивалентного состава шлака в процессе плавления. Данные были получены для времени плавления 10 и 30 минут.

Как видно из табл. 4, содержание  $Al_2O_3$ ,  $MgO$  и  $T.Cr$  в шлаке увеличилось с увеличением времени плавления. Причиной может быть эрозия материала футеровки в процессе плавления. В случае  $SiO_2$  не наблюдалось заметного влияния увеличения времени плавления.

Таблица 4

Изменение эквивалентного состава шлака от времени его плавления

Номер теста	тест 1	тест 2	Зависимость от времени плавления	Примечание	
Время плавления	10 мин	30 мин			
Компоненты шлака	$R_i^{eq}$ (%)	$R_i^{eq}$ (%)			
Основные компоненты	$T.Ca$	–	–	–	
	$SiO_2$	–3,1	–5,2	○	Потери в виде $SiO$
	$Al_2O_3$	19,2	36,4	○	Рост выхода материала футеровки с увеличением времени плавления
	$MgO$	6,5	24,7	○	Рост выхода материала футеровки с увеличением времени плавления
	$T.Cr$	646,9	721,1	○	Рост выхода материала футеровки с увеличением времени плавления
Газообразные компоненты	$T.Na$	–97,6	–98,0	×	Быстрое испарение в начале
	$T.K$	–99,3	–99,5	×	Быстрое испарение в начале
	$C$	–100	–100	×	Потеря в результате реакций восстановления
	$Cl$	–95,8	–97,8	○	Быстрое испарение в начале
	$S$	–94,8	–95,1	×	Быстрое испарение в начале
Тяжелые металлы	$Zn$	–70,7	–72,5	×	Быстрое испарение в начале Остается устойчивый оксид
	$Cu$	–87,1	–91,5	×	Быстрое испарение в начале
	$Cd$	–94,6	–95,1	×	Быстрое испарение в начале
	$Pb$	–99,4	–99,7	×	Быстрое испарение в начале

○: зависящий от времени плавления, ×: независящий от времени плавления.

Потеря легкокипящих компонент золы:  $T.Na$ ,  $T.K$ ,  $S$  и  $Cl$  слабо зависит от времени плавления в печи. Практически полное испарение эти элементов происходит в течение первых десяти минут плавления. Тяжелые металлы, такие как  $Zn$ ,  $Cu$ ,  $Cd$  и  $Pb$  также быстро испарялись в начале процесса, и далее их содержание слабо зависело от времени плавления.

### Влияние основности переплавляемой золы на состав шлака

Для исследования влияния основности переплавляемой золы на состав шлака менялось соотношение подовой и летучей золы. На рис. 4, 5 и 6 представлено изменение содержания основных оксидных компонентов, легкокипящих компонентов и тяжелых металлов в шлаке в зависимости от основности переплавляемой смеси. Из рисунков видно, что концентрация  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $T.Fe$ ,  $MgO$  и  $T.Cr$  в шлаке уменьшается по мере увеличения основности переплавляемой смеси, определяемой содержанием в ней летучей золы. Причина уменьшения содержания  $MgO$  и  $T.Cr$ , по-видимому, в уменьшении эрозии футеровки по мере увеличения основности смеси.

Что касается легкокипящих компонентов, концентрация  $T.Na$  и  $T.K$  снижается по мере увеличения основности, а содержание  $Cl$  и  $S$  растет. Рост концентрации  $Cl$  и  $S$  вызван, по-видимому, увеличением содержания летучей золы и, как следствие, более длительным процессом ее возгонки.

Большинство тяжелых металлов показали тенденцию к снижению их содержания в шлаке при увеличении основности смеси (см. рис. 6), как следствие роста давления насыщенных паров.

Влияние основности переплавляемой золы на материальный баланс процесса и состав получаемого шлака представлено в табл. 5.

При плавлении золы с газами и пылью теряется от 35 % до 54 % ее исходной массы. Соответственно, в шлак переходит от 65 % до 46 % переплавляемой смеси. С ростом содержания летучей золы увеличивается основность смеси и уменьшается выход шлака, что связано с высоким содержанием в летучей золе легкокипящих компонент.

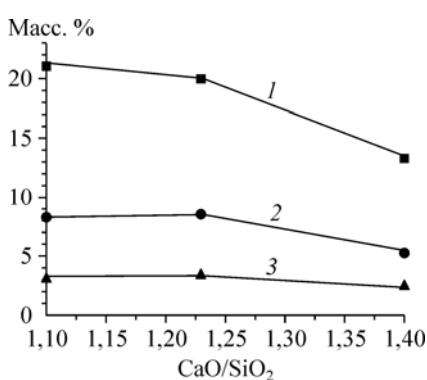


Рис. 4. Влияние основности золы на содержание основных компонентов в шлаке.

1 —  $SiO_2(w^{eq})$ , 2 —  $Al_2O_3(w^{eq})$ , 3 —  $MgO(w^{eq})$ .

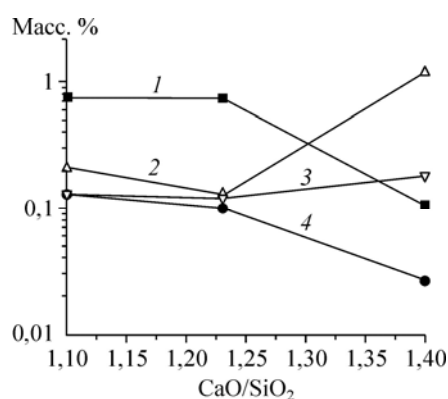


Рис. 5. Влияние основности золы на содержание легкокипящих компонентов в шлаке.

1 —  $T.Na(w^{eq})$ , 2 —  $Cl(w^{eq})$ , 3 —  $S(w^{eq})$ , 4 —  $T.K(w^{eq})$ .

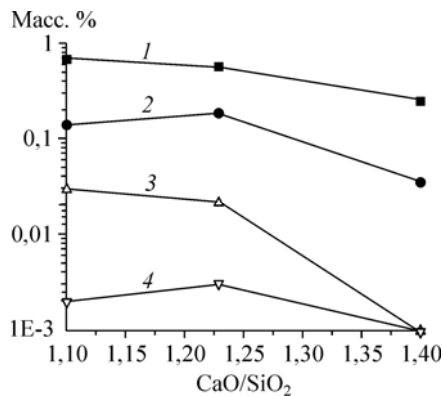


Рис. 6. Влияние основности золы на содержание тяжелых металлов в шлаке.

1 —  $Zn(w^{eq})$ , 2 —  $Cu(w^{eq})$ , 3 —  $Pb(w^{eq})$ , 4 —  $Cd(w^{eq})$ .

Таблица 5

Состав шлака для различного соотношения компонентов переплавляемой золы

Компоненты	CaO/SiO <sub>2</sub> = 1,10			CaO/SiO <sub>2</sub> = 1,23			CaO/SiO <sub>2</sub> = 1,4		
	ПЗ:ЛЗ = 5:5			ПЗ:ЛЗ = 4:6			ПЗ:ЛЗ = 3:7		
	$N^{eq} = 0,737$			$N^{eq} = 0,746$			$N^{eq} = 0,533$		
	$w_i^o, \%$	$w_p, \%$	$w_i^{eq}, \%$	$w_i^o, \%$	$w_i, \%$	$w_i^{eq}, \%$	$w_i^o, \%$	$w_p, \%$	$w_i^{eq}, \%$
T.Ca (CaO)	16,81 (14,60)	22,80 (31,90)	16,81 (23,51)	16,85 (12,80)	22,58 (31,60)	16,85 (23,57)	16,89 (11,10)	31,66 (42,80)	16,89 (22,81)
SiO <sub>2</sub>	21,40	29,00	21,38	19,11	27	20,15	16,82	25,25	13,47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,30	11,40	8,41	4,91	11,4	8,51	4,51	10,09	5,38
MgO	2,18	4,30	3,17	2,19	4,43	3,31	2,2	4,39	2,34
T.Fe	2,90	12,20	8,99	2,46	11,9	8,88	2,03	7,85	4,188
T.Cr	0,02	0,18	0,13	0,02	0,19	0,14	0,02	0,28	0,149
T.Na	4,24	1,00	0,74	4,74	1,01	0,75	5,23	0,2	0,107
T.K	3,97	0,18	0,13	4,55	0,14	0,10	5,13	0,05	0,027
C	3,64	0,00	0,00	3,41	0,00	0,00	3,17	0,00	0,000
Cl	21,4	0,29	0,21	25,0	0,18	0,13	28,5	2,23	1,190
S	3,07	0,18	0,13	3,42	0,16	0,12	3,77	0,34	0,181
Zn	0,080	0,890	0,66	0,84	0,740	0,55	0,88	0,46	0,245
Cu	0,040	0,190	0,14	0,41	0,250	0,19	0,41	0,07	0,037
Cd	0,017	0,003	0,002	0,019	0,004	0,003	0,02	0,002	0,001
Pb	0,230	0,040	0,03	0,26	0,030	0,022	0,28	0,002	0,001
H <sub>2</sub> O	17,5	–	0,0	18,5	–	0,0	19,4	–	0,0
Шлак(max)	65%			62%			46%		

### Поведение тяжелых металлов и диоксинов в расплавленном шлаке

В табл. 6 представлены результаты тестов на выщелачивание тяжелых металлов из шлака и из исходных компонент переплавляемой смеси.

Согласно данным, приведенным в таблице, выщелачивание Cu из подовой золы и Pb из летучей золы превышает экологические нормативы Республики Корея. Тесты на шлаке, полученном после плазменного переплава золы, показали, что выщелачивание Cu и Pb составило в среднем 0,42 ppm и 0,03 ppm соответственно, что много ниже установленных нормативов, а вымывание прочих тяжелых металлов отсутствовало совсем.



Таблица 6

## Результаты теста на выщелачивание тяжелых металлов из шлака и золы

Элемент*		Cu	Hg	Pb	Cd	Cr <sup>6+</sup>	As	Диоксины (нг-ТЕQ/г)
Соотношение ПЗ: ЛЗ	Экологические нормативы Р. Корея	≤ 3	≤ 0,005	≤ 3	≤ 0,3	≤ 1,5	≤ 1,5	0,5(0,1)
3 : 7	шлак	0,57	Н.Д.	0,04	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.
4 : 6	шлак	0,49	Н.Д.	0,04	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.
5 : 5	шлак	0,82	Н.Д.	0,04	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.
6 : 4	шлак	0,14	Н.Д.	0,02	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.
7 : 3	шлак	0,11	Н.Д.	0,01	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.	Н.Д.
Подовая зола		3,24	Н.Д.	0,28	0,01	0,04	0,01	0,0019
Летучая зола		0,02	0,2	4,24	0,4	0,08	0,01	3,5

\* — результаты приведены в ppm.

Содержание диоксинов в исходных подовой и летучей золах, составляло 0,0019 нг-ТЕQ/г и 3,514 нг-ТЕQ/г, соответственно, а в полученном после плавления шлаке отсутствовало совсем, что в таблице обозначено как (Н.Д.).

### ВЫВОДЫ

Исследование поведения шлаковых оксидов в процессе плазменной переработки подовой и летучей золы позволило получить следующие результаты:

1. Так как зола мусоросжигательных заводов содержит легкокипящие компоненты, анализ изменения состава шлака при плавлении золы необходимо проводить на основе эквивалентного показателя по кальцию.

2. При плавлении смеси летучей и подовой золы с соотношением 7:3 эквивалентные концентрации  $Al_2O_3$ , MgO и  $T.Cr$  увеличились, а более 95 % таких компонентов как  $T.Na$ ,  $T.K$ , C, Cl и S испарилось.

3. При плавлении золы мусоросжигательных заводов происходит возгонка основной массы легкокипящих веществ и тяжелых металлов.

4. С ростом основности переплавляемой золы содержание легкокипящих веществ и тяжелых металлов в шлаке снижается, а содержание S и Cl увеличивается.

5. При увеличении времени плавления шлака в нем растет содержание  $Al_2O_3$ , MgO и  $T.Cr$  за счет эрозии футеровки.

6. По мере увеличения доли летучей золы в смеси уменьшается выход шлака и при соотношении ЛЗ: ПЗ = 7: 3 он составляет 46 %.

7. Тесты на выщелачивание тяжелых металлов из шлака, полученного после плавления золы мусоросжигательных заводов, показали его экологическую безопасность. Установлено незначительное (много меньше экологических норм) выщелачивания свинца и меди и его полное отсутствие для других металлов.

8. Установлено, что диоксины содержащиеся в летучей и подовой золе разрушаются при ее плавлении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hyun-Seo Park, Cheol-Gyu Kim, Seong-Jung Kim. Characteristics of PE gasification by steam plasma // J. Ind. Engng. Chem. 2006. Vol. 12, No. 2. P. 216–223.

2. **Seung-Min Hwang, Fumiteru Akamatsu, Hyun-Seo Park.** Evaluation of Comb. Mech. of Droplet Cluster by Simultaneous Time-Series Measurement in Premixed Spray Flame // J. Ind. Engng. Chem. 2007. Vol. 13, No. 2. P. 206–213.
3. **LaGrega M.D., Buckingham Ph.L., Evans J.C.** Hazardous waste management. McGraw-Hill, Inc. 1994. P. 641–704.
4. **Ozawa M., Kitagawa S., Nakayama S., Takesono Y.** Reduction of FeO in molten slags by solid carbon in the electric arc furnace operation // Trans. ISIJ 26. 1986. Vol. 26. P. 621–628.
5. **Kwai Y., Mori K.** Metal-slag reaction (equilibrium and kinetic) // Tetsu to Hagane. 1982. Vol. 58, No. 7. P. 932–952.
6. **Hyun-Seo Park, Beom-Jae Lee, Seong-Jung Kim.** Medical waste treatment using plasma // J. Ind. Engng. Chem. 2005. Vol. 11, No. 3. P. 353–360.
7. **Hyun-Seo Park, Seong-Jung Kim.** Analysis of a plasma melting system for incinerated ash // J. Ind. Engng. Chem. 2005. Vol. 11, No. 5. P. 657–665.

*Статья поступила в редакцию 24 декабря 2010 г.*