

## ПЕРЕРАБОТКА МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА

© 2005 О.Т. Данилова<sup>1</sup>

В данной статье приводится исследование проблемы плазменной технологии утилизации и регенерации металлсодержащих отходов систем промышленной водоподготовки. Как показывают результаты, термодинамические расчеты и экспериментальные данные находятся в качественном соответствии.

### 1. Согласование контрагированного индукционного разряда с высокочастотным генератором

Анализ морфологического состояния основных видов вторичных ресурсов показывает, что из них только 20% образуются в крупногабаритных формах, основную же массу составляют диспергированные формы — вентиляционные пыли, стружка, донные отложения рек и других водоемов, шламы различного происхождения и т.д. В этой связи представляет интерес процесс переработки металлсодержащего вторичного сырья с целью получения дисперсных порошков (ДП) на основе оксидов металлов в плазме высокочастотного индукционного разряда (ВЧИР), поскольку отличительной чертой плазменных технологий является способность рационально трансформировать в порошковую форму сырье, находящееся в недиспергированном состоянии.

Плазменное выделение дисперсных порошков состоит из следующих стадий:

- 1) генерация плазмы необходимого состава в требуемом диапазоне температур и давлений;
- 2) ввод реагентов — веществ в твердом или жидком состояниях и обеспечение необходимого времени их контакта с плазмой;
- 3) вывод целевого продукта из зоны реакции.

Основным элементом любой плазменной ВЧИ-установки является высокочастотный (ВЧ) генератор, в котором происходит преобразование тока

---

<sup>1</sup>Данилова Ольга Тимофеевна ([danilova@univer.omsk.su](mailto:danilova@univer.omsk.su)), кафедра информационной безопасности Омского государственного университета, 644077, Россия, г. Омск, пр. Мира, 55А.

промышленной частоты в ток высокой частоты. Второй элемент — плазмотрон, основное назначение которого оптимальное поглощение колебательной мощности ВЧ-генератора с минимальными потерями. Таким образом, для определения оптимальных режимов плазменного процесса следует определить параметры управления температурой ВЧИР и обозначить конструктивные изменения ВЧ-генератора.

Для представления модели был выбран нескинированный (с толщиной скин-слоя  $> 0,5 R_0$ ) ВЧИР контрагированной формы. Контрагированный разряд позволяет значительно повысить ресурс работы генератора из-за меньших тепловых нагрузок на стенки камеры, а геометрия плазмы в нем удобна для проведения плазмохимических реакций непосредственно в зоне генерации. Температура ВЧИ-разряда для заданного диапазона температур определяется из условия баланса энергий [1]: выделяемой за счет поглощения плазмой электромагнитной энергии  $S_0$  и отводимой теплопроводностью  $W$ . Для случая большого скин-слоя  $S_0$  и  $W$  могут быть рассчитаны как

$$S_0 = \frac{4\pi\sigma f^2 r^2 (I_0 n)^2}{c^2}, \quad (1.1)$$

$$W = \frac{8\pi\lambda k T^2}{eU}, \quad (1.2)$$

где  $f$  — частота ВЧ-поля;  $\sigma$  — электропроводность плазмы;  $I_0$  — число ампервитков на единицу длины индуктора;  $r$  — радиус разряда;  $\lambda$  — теплопроводность.

Расчеты показывают, что в режиме генерации ВЧИ-разряда с большой глубиной скин-слоя возможны температуры от 3400 до 6700 К. Однако при таких температурах для эффективного поглощения мощности ВЧ-генератора нужно увеличивать объем разряда, чего можно добиться, применяя длинный индуктор. Разряд в этом случае должен вытягиваться и переходить в контрагированную форму. Для поддержания такого нескинированного разряда необходимо решить две задачи:

- 1) найти способ стабилизации разряда в неустойчивом состоянии;
- 2) согласовать ВЧ-генератор с достаточно длинным индуктором, позволяющим получать разряд в контрагированной форме и вкладывать в него большие энергии.

Работа ВЧ-генератора на такую нагрузку, как плазма, предъявляет к устройству ряд специфических требований:

— в генераторах должна быть предусмотрена широкая регулировочная характеристика, обеспечивающая изменение мощности от номинальной почти до нуля;

— необходимо обеспечение устойчивой работы в режиме холостого хода (т.е. до возбуждения разряда) и автоматическое получение заданного режима после его возбуждения;

— для целого ряда случаев требуется получение значительной напряженности магнитного поля в заданном диапазоне температур;

— генераторы должны удовлетворять требованиям стабильности частоты в пределах разрешенных узких радиоканалов.

Выполнение перечисленных требований обеспечивается выбором схемы высокочастотной части автогенератора. В настоящей работе исследовались режимы генераторов, работающих с самовозбуждением мощностью 40 и 60 кВт и рабочими частотами 0,44; 5,28; 13,56 МГц.

Расчет частоты генерации основывается на выполнении двух критериев:

- условие баланса фаз;
- условие баланса амплитуд:  $K\beta \geq 1$ .

Первое условие сводится к выполнению соотношения

$$Z_{ak} + Z_{ag} + Z_{gk} = 0, \quad (1.3)$$

где  $Z_{ak}, Z_{ag}, Z_{gk}$  — соответственно комплексные сопротивления, действующие на участках "анод-катод", "анод-сетка" и "сетка-катод".

Условие баланса амплитуд фактически означает, что коэффициент обратной связи  $\beta > 1$ , так как обычно коэффициент усиления  $K \gg 1$ . С учетом этого условие баланса может быть записано как

$$\frac{Z_{gk}}{Z_{ak}} > 0. \quad (1.4)$$

Алгоритм расчета ВЧ-генератора на заданную рабочую частоту сводится к следующему:

- 1) задаются реактивные сопротивления элементов схемы ВЧ-генератора;
- 2) рассчитываются частота генерации и коэффициент обратной связи;
- 3) корректируются значения реактивных сопротивлений для получения требуемой частоты;
- 4) по результатам расчета вносятся изменения в конструкцию генератора.

Поскольку при корректировке значений реактивных сопротивлений имеется некоторый произвол, в ходе расчета и настройки генератора учитывались требования, вытекающие из анализа результатов численного моделирования ВЧИ-разряда. Суть этих требований заключается в следующем. Для получения устойчивого режима генерации нескинированного разряда необходимо обеспечить поглощение подводимой ВЧ-мощности областью относительно прозрачной для ВЧ-поля плазмы. А это возможно лишь за счет увеличения объема этой области, т.е. при фиксированном радиусе разрядной камеры — за счет увеличения длины плазменного столба. Следовательно, необходимо увеличивать длину индуктора, а значит и его индуктивность. Поэтому критерием, устраняющим произвол в выборе реактивных сопротивлений, является условие максимального значения индуктивности анодного контура автогенератора. В табл. 1 приведены результаты расчетов параметров эквивалентных схем ВЧ-генераторов с разными рабочими частотами.

Исследования режимов схем генераторов показали устойчивость генерации, возможность изменения выходной мощности и напряжения на индук-

Таблица 1

МГц	$K_{oc}$	$L_a$	$L_{oc}$	$L_e$	$C_a$	$C_{ca}$	$C_{oc}$
0.44	-	55	80	14	2200	65	1500
5.28	0.15	6.5	2.2	-	65	65	2200
13.56	1.7	1.3	1	-	30	65	200

торе за счет регулирования коэффициента обратной связи путем изменения емкости  $C_{oc}$ .

## 2. Экспериментальная часть

При проведении экспериментов в качестве исходного сырья был выбран шлам очистительных систем промышленной водоподготовки. Идентификация шлама методом рентгеноспектрального анализа показала присутствие до 46%  $Fe(OH)_3$ , не имеющей кристаллической структуры, а также наличие оксидов  $Si$ ,  $Ti$ ,  $Ca$ ,  $K$  и др.

Результаты термодинамических расчетов позволили сделать вывод, что для системы "шлам-плазма" конденсация оксидов железа наблюдается при температуре  $\sim 3000$  К, в интервале температур 2200–3000 К основной конденсированной фазой является  $FeO$ . При температурах ниже 2200 К образуются конденсированные фазы  $Fe_2O_3$  и  $Fe_3O_4$ . Очевидно, что для получения порошков оксидов в ультрадисперсном виде реагенты необходимо нагревать до температуры 3000–4000 К, а закалку производить при температуре 2000 К.

При обработке дисперсных материалов в плазменных струях возникает проблема нагрева частиц, объединяющих в своем объеме два или несколько веществ с различными теплофизическими свойствами. Нагрев частиц сырья из целевых продуктов в общем случае является нестационарным тепловым процессом и включает две стадии передачи тепла: конвективную теплоотдачу от газовой фазы к поверхности частицы и передачи тепла от поверхности частицы к ее центру путем нестационарной теплопроводности. Условие расплавления частиц исходного материала в модели определяется из ряда обычных допущений, а также на основании имеющихся расчетных и экспериментальных данных, что нагрев и разгон частиц происходят на начальном участке струи [2]:

$$\frac{T_g \lambda_g^2}{\mu_g (1+r)(1+\alpha) v_g} \geq \frac{d_p^2 D}{1092 Nu^2 \pi R_0^2 (l_k + 6(R_0 - R))}, \quad (2.1)$$

где  $T_g$  — это температура плазмообразующего газа (ПГ);  $\lambda_g$  — теплопроводность ПГ;  $\mu_g$  — коэффициент кинематической вязкости;  $v_g$  — расход ПГ;  $r$  — степень ионизации ПГ;  $\alpha$  — степень диссоциации ПГ;  $d_p$  — диаметр частицы;  $l_k$  — расстояние от места подачи порошка до среза сопла;  $R_0$  — радиус сопла плазмотрона;  $R$  — расстояние от оси трубки до траектории движения

частицы;  $D$  — константа, зависящая от комплекса теплофизических свойств частицы, как то: характер компонентов и их соотношения.

Для оценки минимальной электрической мощности плазмотрона, необходимой для полного расплавления материала частицы в плазменной струе, используется аппроксимирующее выражение:

$$P = 2.99 \frac{v_g^{1.5} d_p D^{0.5}}{\eta R^{1.25} (l_k + 6(R_0 - R))^{0.6}} \quad (2.2)$$

где  $\eta$  — тепловой КПД плазмотрона.

Согласно расчетам, полное расплавление исходных частиц по всему объему происходит за время порядка  $10^{-3} - 10^{-4}$  с.

Экспериментальная установка состояла из высокочастотного индукционного плазмотрона, используемого в качестве источника низкотемпературной плазмы, питаемого от ВЧ-генератора мощностью 30 кВт с частотой 5,28 МГц. ВЧИ-разряд возбуждался при атмосферном давлении в кварцевой разрядной камере диаметром 68–72 мм, помещенной в индуктор. Реагенты в реактор транспортировались с помощью пневматической форсунки, позволяющей распылять реагенты в виде однородного аэрозольного облака. Процесс перемешивания осуществлялся спутной подачей струи сырья в плазменный поток. Продукты реакции фиксировались методом объемной закалки в закалочном устройстве, которое одновременно выполняло функции теплообменника. Для улавливания получаемых порошков был сконструирован фильтр барботажного типа, через который продувался поток выходящих газов в смеси с остатками дисперсных частиц, прошедших через рукавный фильтр. При изменении режима работы генератора, расхода плазмообразующего газа, а также расхода транспортирующего газа наблюдалось изменение цветности получаемого порошка. Увеличение времени пребывания сырья в реакционной зоне не внесло значительных изменений в состав конечного продукта. Оксиды железа, полученные в результате переработки, представляли собой порошки, дисперсность которых, согласно данным микроскопического анализа на установке ПМ-100, составляла 0,03 мкм. В табл. 2 представлены результаты элементного анализа в условных процентах исходного сырья и целевого продукта. Содержание различных примесей объясняется присутствием последних в конденсированной фазе при температуре закалки  $\sim 2200$  К.

На основании результатов проведенных экспериментов можно сделать вывод, что применение в ресурсосберегающих технологиях по переработке металлосодержащих отходов плазмохимического способа позволяет получать порошки на основе оксидов металлов в дисперсной форме, причем модельные представления процесса хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Таблица 2

Вещество	Исходное сырье, %	Целевой продукт, %
$Fe(OH)_3$	46	-
$Fe_2O_3$	-	25
$Fe_3O_4$	-	49
$SiO_2$	20	3
$TiO_2$	1.5	1.2
$CaO$	2.5	2
$K_2O$	7	3
$MgO$	8	4
$Na_2O$	5	3

## Литература

- [1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда: Учеб. руководство. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 92 с.
- [2] Плазмохимическая технология / В.Д. Пархоменко, П.И. Сорока, Ю.И. Краснокутский и др. Новосибирск, 1991.

Поступила в редакцию 18/XI/2005;  
в окончательном варианте — 25/II/2005.

## PROCESSING WASTES WITH METAL INCLUSION BY MEANS OF HF-DISCHARGE

© 2005 O.T. Danilova<sup>2</sup>

In the present paper an applied problem of plazma utilization and regeneration of water conditioning system wastes with metal inclusion is discussed. The results of our study show that thermodynamics accounts and experimental data qualitatively correspond each other.

Paper received 18/II/2005.  
Paper accepted 25/II/2005.

---

<sup>2</sup>Danilova Olga Timofeevna ([danilova@univer.omsk.su](mailto:danilova@univer.omsk.su)), Dept. of Computer Science, Omsk State University, Omsk, 644077, Russia.