

УДК 533.92 (575.2) (04)

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХПЛАЗМАТРОННОГО РЕАКТОРА

*А.Т. Татыбеков* – канд. техн. наук

---

The analysis of three-plasmatron reactor energetic features during dispersed cerium oxalates processing is given.

**Введение.** В последние десятилетия в промышленности стран мира возник кризис дальнейшего совершенствования традиционных металлургических, химических и иных производств. Появилась острая потребность в принципиально новых процессах, которые обеспечили бы снижение металло- и энергоёмкости, повысили глубину переработки исходного сырья в целевой продукт и не усложнялись бы многоступенчатостью. Кроме того, необходимо было коренным образом улучшить состояние экологической обстановки, т.е. благодаря новым процессам снизить вредные выбросы в атмосферу, существенно уменьшить площади для складирования отходов производства, обеспечить полную автоматизацию всего технологического цикла [1].

Один из путей решения перечисленных проблем – использование в новых процессах низкотемпературной плазмы, генерируемой в электродуговых плазматронах или плазмотехнологических реакторах.

В настоящее время имеются несколько отличных друг от друга схем электродуговых реакторов. Специфика их применения состоит в получении максимально экономического, экологического и социального эффектов при переработке химико-металлургического и энергетического сырья.

**Конструкция установки.** Переход к использованию реакторов с камерой смешения, к которой подключено несколько плазматронов, позволит решить проблему создания плаз-

технологических установок практически любой мощности с хорошим полем температур и большим ресурсом работы. В силу этого в последние три десятилетия привлекают к себе внимание разработки многоструйных подогревов [2, 3], в которых при большой суммарной мощности, единичная мощность плазматрона может быть снижена пропорционально числу плазматронов, присоединенных к камере смешения, являющейся здесь естественным элементом в установке. Многоструйный подогреватель с общей камерой смешения, в которую одна часть потребного расхода газа поступает через плазматроны, а другая (газ, смесь газов, смесь газа с порошком) – через торец камеры непосредственно в реактор.

Такая кинематическая схема подачи газа позволяет довольно простыми средствами установить нужное соответствие между располагаемыми напряжениями стандартного источника питания и потребным напряжением горения дуги. Дополнительная возможность подавать газ, минуя плазматроны, упрощает регулирование параметров реактора. Плазматроны многоструйного подогревателя включаются в цепь электропитания параллельно, и это позволяет достаточно просто регулировать вкладываемую в газ мощность, сохраняя суммарный расход газа при симметричности расположения плазматронов по периметру камеры. Камера смешения с многодуговыми подогревателями (рис. 1) обладает достаточно высокими кинематическими и динамическими

характеристиками и высоким КПД, в настоящее время является наиболее перспективной для практического применения с целью создания на их основе реакторных устройств, предназначенных для переработки дисперсных видов сырья.

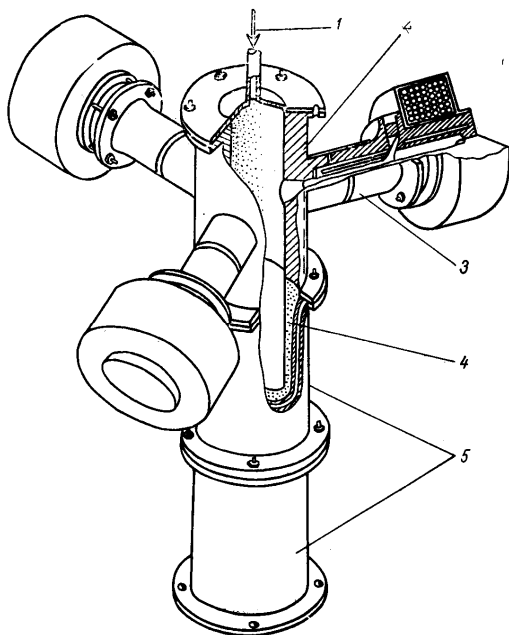


Рис. 1. Камера смешения с тремя плазматронами:  
1 – патрубок для ввода дисперсного материала;  
2 – камера смешения; 3 – плазматроны;  
4 – футеровка; 5 – секции реактора

Как следует из рассмотрения кинематической схемы процесса смешения, неравномерность поля температур плазменных струй в данном случае не может оказать сколь угодно существенного влияния на формирование поля температур результирующего газового потока на выходе из камеры смешения. Это одно из основных достоинств выбранной схемы, которое подтверждено экспериментально. Кроме того, в процессе смешения гасятся окружающие составляющие скорости, которые имеют струи, выходящие из плазматронов. Исследование температурных полей камеры при смешении в ней струи холодного газа и трех плазменных струй показало интенсивное протекание процессов тепло- и массообмена по всему объему, в результате чего уже на расстоянии двух калибров температурное поле обладает высокой степенью равномерности.

**Анализ результатов.** Рассмотрим тепловые параметры трехплазматронного реактора при обработке оксалатов церия. Ниже приведены результаты измерений и расчета усредненных значений основных узлов реактора (см. таблицу).

Основные тепловые потери, как видно из рис. 2, уходят на узлы реактора плазматрона и камеру смешения, а на стенки секции реактора – одна третья часть всех тепловых потерь.

На рис. 2 б и 3 отражены усредненная электрическая мощность и КПД реактора по его длине. Определено, что мощность и КПД отдельных узлов по длине реактора теряется равномерно, а суммарный КПД реактора растет по длине канала.

Результаты расчета усредненных значений трехплазматронного реактора  
 $N_{cp}=130,6$  кВт;  $G_{r+m}=12,85$  г/с;  $S=2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>

	Плазматрон	кс	1 секц.	2 секц.	3 секц.	4 секц.
$Q_{w\text{ уср.}}$ , кВт	35,30	15,7	11,75	4,6	3,9	2,6
$N_{\text{уср.}}$ , кВт	95,3	79,6	67,9	63,25	59,35	56,75
$H_{\text{инд}}$ , %	72,9	60,9	51,9	48,4	45,4	43,45
$\eta_{\Sigma}$ , %	72,9	83,5	85,3	93,1	93,8	95,6
$h$ , кДж/кг	10,2	7,42	6,19	5,28	4,92	4,6
$T$ , К	5000	3900	3600	3400	3300	3200
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	0,058	0,078	0,088	0,096	0,098	0,104
$v$ , м/с	110,8	82,4	73,0	67,0	65,6	62,0
$f$ , %	27,0	12,0	9,0	3,5	3,0	2,0

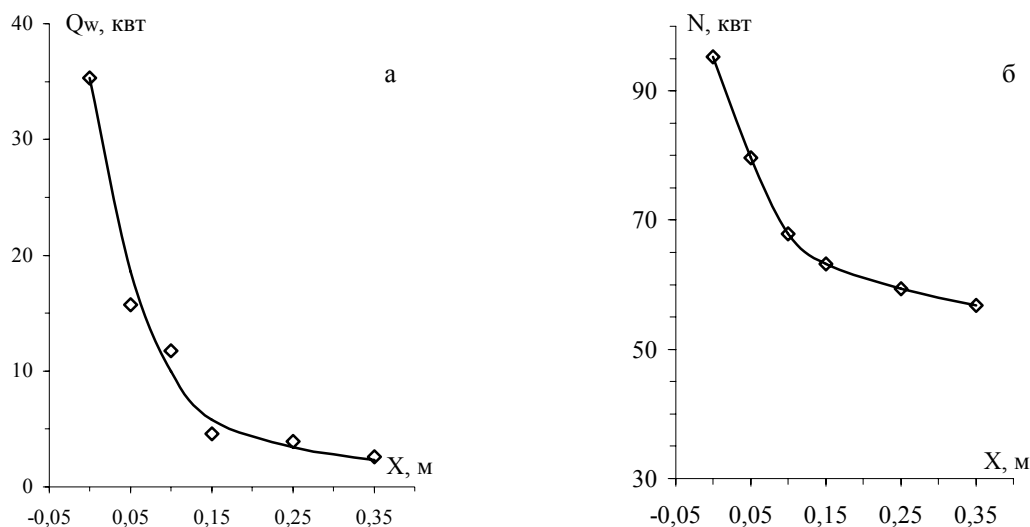


Рис. 2. Зависимость тепловых потерь (а) на стенках реактора и электрической мощности (б) от длины реактора.

Тепловые потери приходятся на основные узлы плазмотрона и камеру смешения, температура плазменного потока при 8–10 калибров достигает  $2000^{\circ}\text{C}$  (рис. 3).

Равномерное убывание потери электрической КПД по каналу реактора приведено на рис. 3 д.

Исследования проводили на трехплазмотронном реакторе, суммарная мощность которого составляла  $\sim 130$  кВт. Футеровка рабочих поверхностей отсутствовала. Плазменные струи к оси реактора составляли  $90^{\circ}$ . На начальном участке длиной 4–5 калибров тепловой поток к стенкам имеет высокую плотность, что снижает возможности реактора по нагреву и испарению дисперсного сырья. Уменьшения тепловых потерь можно достигнуть футеровкой поверхности канала теплоизолирующим материалом [3–5].

Оценим эффективность тепловой защиты реактора при различных вариантах футеровки его канала. Теплоизолирующие футеровки по способу устройства подразделяются на искусственные и естественные, или гарниссажные [6]. Применение гарниссажных футеровок в условиях растущего дефицита огнеупоров высокого качества экономически и технологически более целесообразно.

Использование футеровок с теплоизолирующими слоями обеспечивает снижение плотности теплового потока и повышение температуры внутренней поверхности стенки, способствуя максимальному приближению характеристик реактора к характеристикам соответствующего идеального реактора. Учитывая высокую теплопроводность графитовых экранов, можно предположить, что использование в качестве футеровки материалов с меньшей по сравнению с графитом теплопроводностью приведет к повышению температуры внутренней поверхности футерованного канала [7, 8]. Действительно, замена графита корундом при начальной энтальпии потока  $5,55 \cdot 10^3$  кДж/кг обеспечивает снижение теплового потока к стенке и повышение ее температуры в среднем на 10–20%. Однако искусственные футеровки для плазмохимических реакторов отличаются сложностью изготовления, особенно при использовании материалов на основе плавящихся оксидов, и, как показал опыт эксплуатации, недостаточно стойкие.

Рассмотрим особый класс линейных плазмотронов – двухструйные. Их особенностью является не только вынесенная в открытое пространство значительная часть дуги, но также независимость газоснабжения электродных узлов и рабочего пространства [9].

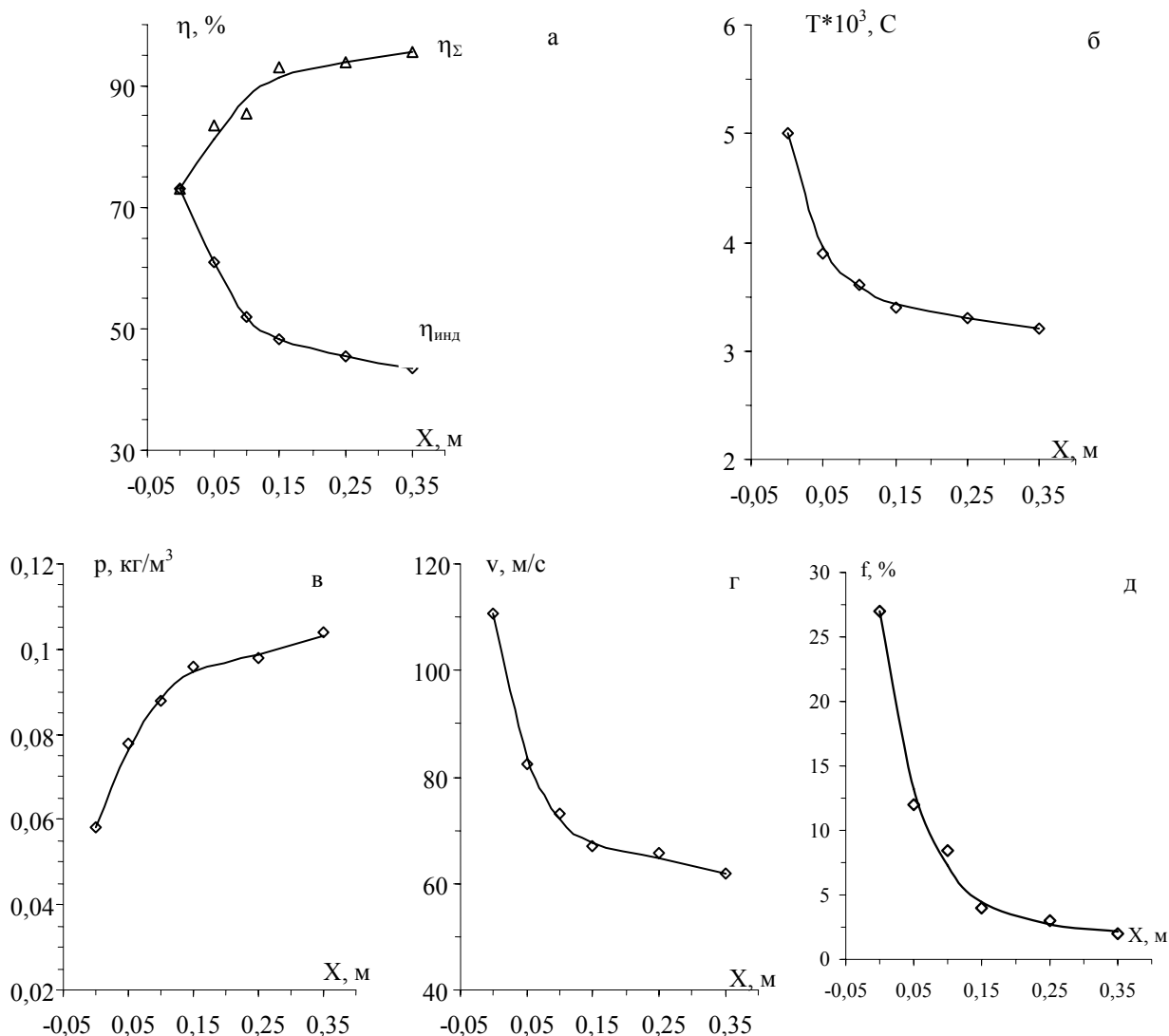


Рис. 3. Влияние длины реактора на: а – КПД отдельных узлов и суммарный КПД реактора; б – температуру плазменного потока; в – плотность; г – скорость; д – суммарный электрический КПД.

Разработанные и исследованные в Институте физики Национальной академии наук Кыргызской Республики двухструйные плазмотроны имеют электродные узлы с неподвижными опорными дугами. Его основные характеристики: потребляемая мощность  $5 \div 50$  кВт; ток дуги  $50 \div 250$  А; расход защитного газа (аргона)  $0,03 \div 0,05$  г/с; расход плазмообразующего газа (воздуха, аргона, водорода и др.)

$0,1 \div 0,6$  г/с; коэффициент полезного действия  $\sim 90\%$ .

Широко известно применение модифицированной конструкции двухструйного плазмотрона для распыления прутковых материалов, разработанного ранее для возбуждения спектров веществ при эмиссионном спектральном анализе и термической обработки порошков [9, 10].

Существующие конструкции плазменных аппаратов обладают различной потенциальной способностью обработки конкретных порошков, которая определяется в основном ресурсом непрерывной работы и эрозионными характеристиками электродов плазмотронов. Последнее условие приобретает особое значение, поскольку предъявляются соответствующие требования к загрязненности конечного продукта, материалами, содержащимися в электродах (медь) [11].

Поэтому целесообразно в перспективе использовать двухструйные плазмотроны для получения оксидов РЗЭ из их оксалатов и нитратов без примеси материала электрода, которые по чистоте плазмы отвечают требованиям, предъявляемым ГОСТом [12].

На основании исследований установлен оптимальный режим обработки дисперсных оксалатов редкоземельных элементов в трехплазмотронных реакторах, в частности для оксалата церия.

Выявлено, что для получения чистых оксидов РЗЭ плазменным способом наиболее подходит плазменный реактор с двухструйным плазмотроном.

#### Литература

1. Электродуговые генераторы термической плазмы / М.Ф. Жуков, И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский и др. Низкотемпературная плазма. – Т. 17. – Новосибирск: Наука, Сиб. предпр. РАН, 1999. – 712 с.
2. Жуков М.Ф., Сухинин Ю.И. Камера смешения многодугового подогревателя // Изв. СО АН СССР. Сер.техн.наук. – 1970. – № 8. – Вып. 2. – С. 12–19.
3. Моссэ А.Л., Буров И.С. Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах. – Минск: Наука и техника, 1980. – 208 с.
4. Галевский Г.В., Корнилов А.А., Крутский Ю.Л., Ламихов Л.К. Исследование энергетического баланса трехструйной плазмохимической установки // Исследование плазменных процессов и устройств. – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР, 1978. – С. 117–125.
5. Галевский Г.В., Крутский Ю.Л., Щужин В.Г. и др. Исследование возможности повышения химической селективности и тепловых КПД плазменного реактора при его футеровке // Высокотемпературные и плазмохимические процессы: Межвуз. сб. науч. тр. ЛТИ им. Ленсовета. – Л., 1984. – С. 142–148.
6. Электротермические процессы химической технологии: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.А. Ершова. – Л.: Химия, 1984. – 464 с.
7. Свойства получения и применения тугоплавких соединений: Справ. изд-е / Под ред. Т.Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986. – 928 с.
8. Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов. – Л.: Энергия, 1973. – 330 с.
9. Жеенбаев Ж., Энгельшт В.С. Двухструйный плазмотрон. – Фрунзе: Ин-т физики и математики АН Кирг.ССР, 1983. – 199 с.
10. Жеенбаев Ж., Самсонов М.А. Исследование и применение плазмотронов для спектрального анализа и нанесения покрытия // Генерация потоков электродуговой плазмы / Под ред. В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Наука, 1987. – С. 126–139.
11. Асаналиев М.К., Жеенбаев Ж.Ж., Моссэ А.Л., Татыбеков А. Плазмохимическая технология получения оксидов редкоземельных элементов // Плазмохимия–90. – М.: ИНХС АН СССР. – 1990. – С. 120–150.
12. Джанибеков Т.Дж., Асаналиев М.К., Татыбеков А. Плазмохимический реактор на основе двухструйных плазмотронов // Изв. НАН. – 1995. – № 3–4. – С. 125–126.