

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В ПЛАЗМЕННЫХ ПЕЧАХ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

А.Л. Моссе¹, В.В. Савчин²

^{1,2} *Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,
¹ mosse@itmo.by, ² v.sauchyn@gmail.com*

Все большие объемы накапливаемых отходов различного происхождения представляют серьезную опасность для здоровья человека и окружающей среды в целом. В настоящее время наиболее широко применяется метод сжигания отходов в печах с газовыми или топливными горелками. Однако он имеет значительные недостатки. Так, например, при сжигании отходов, содержащих хлор, в отходящих дымовых газах образуются вторичные токсичные продукты, такие как диоксины и фураны.

В качестве альтернативы низкотемпературному сжиганию предлагается производить утилизацию отходов в плазменных печах, где переработка материала производится под воздействие плазменной струи, генерируемой электродуговым плазмотроном.

В Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси разработана плазменная шахтная печь для плазмотермической переработки токсичных отходов. Настоящая печь реализует наиболее надежный и эффективный метод переработки различных несортированных токсичных твердых отходов. Проведены экспериментальные исследования по выводу печи на рабочие параметры, а также по переработке модельных отходов.

Работа плазменной печи

Технологический процесс переработки отходов может быть реализован по двум режимам в зависимости от состава отходов – соотношения органической и неорганической части и требований к технико-экономическим показателям процесса:

- режим сжигания, при преобладающей доле органической составляющей отходов и недостатке кислорода в подаваемом воздухе для стабилизации горения электрической дуги в плазмотроне; в этом случае для полного сжигания газа пиролиза в камеру дожигания подается дополнительный воздух.

- режим сжигания, при преобладающей доле неорганической составляющей отходов и достаточном количестве кислорода в воздухе, подаваемом для стабилизации горения электрической дуги в плазмотроне; в этом случае тепловой режим в камере печи обеспечивает плавление зольного остатка.

Одной из наиболее важных проблем, которые приходится решать при эксплуатации плазменных печей, является вывод печи на рабочие параметры за оптимальное время. Проведены исследования по выводу плазменной печи на рабочие параметры. Печь считается разогретой и готовой к работе, когда температура в камере сжигания печи достигает 800 °С. Нагрев печи осуществляется с помощью двух плазменных горелочных устройств, установленных на плазменный щит в камере сжигания. В качестве горелочных устройств были выбраны плазмотроны переменного тока (см. рис. 1 (а)) и плазмотроны постоянного тока ПДС50-03 (см рис. 1 (б)), установленные в специальный корпус.

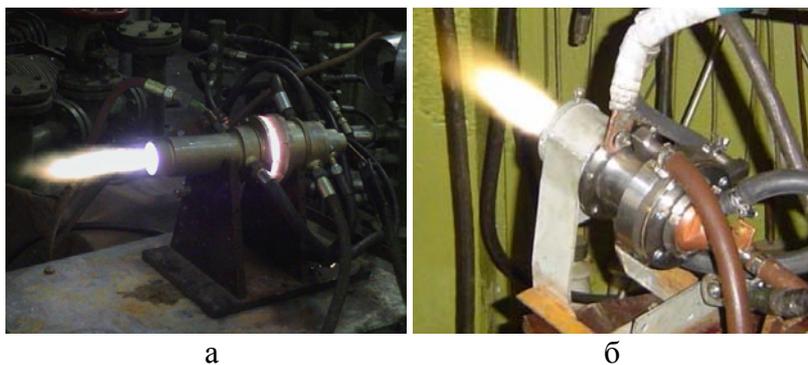


Рис. 1. Плазмотрон переменного тока (а), плазмотрон постоянного тока ПДС (б)

Измерительное оборудование

Во время проведения экспериментов для сбора и обработки данных использовался специально разработанный программно-аппаратный комплекс. Для сбора и обработки данных разработана программа с использованием среды графического программирования LabView 8.6 компании National Instrument. Схема системы автоматизации представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема системы автоматизации и сбора данных

Сигнал с термоэлектрических преобразователей с помощью системы сбора данных и управления, построенной на основе модулей ADAM-4000, преобразовывается в цифровой вид и затем передается на персональный компьютер. Модули ADAM-4000 предназначены для построения распределенных систем сбора данных и управления и представляют собой компактные интеллектуальные устройства обработки сигналов датчиков, специально разработанные для применения в промышленности. Наличие встроенного микропроцессора позволяет осуществлять нормализацию сигналов, операции аналогового и дискретного ввода-вывода, отображение данных и их передачу по интерфейсу RS-485. Данные модули имеют гальваническую развязку по цепям питания и интерфейса RS-485.

Результаты экспериментов

Однако, использование широко известных данных по теплопередаче для вычисления коэффициента теплоотдачи конвекцией в высокотемпературных теплотехнологических

устройствах, как правило, дает заниженные результаты, что связано с отсутствием учета специфических условий струйного движения газов в рабочем пространстве высокотемпературных теплотехнологических устройств.

Реальные условия теплообмена в печах не укладываются в классические схемы конвективного теплообмена (движение газов в канале, внешнее обтекание тел потоком и др.), поэтому для расчетов целесообразно пользоваться опытными данными, полученными непосредственно для условий теплообмена в высокотемпературных теплотехнологических устройствах. Согласно опубликованным данным [1] данным число Нуссельта можно определить из зависимости (см. рис. 3 прямые 1 и 2)

$$Nu = 0,57K_p^{0,25} \text{ при } 2 \cdot 10^5 < K_p < 1 \cdot 10^7 \quad (1)$$

$$Nu = 0,0717K_p^{0,565} \text{ при } 1 \cdot 10^7 < K_p < 1 \cdot 10^9 \quad (2)$$

где

$$K_p = \frac{I_{y\partial} R_V^3}{v_e \rho_e v_c}, \quad I_{y\partial} = \frac{G_p \omega_0}{V}$$

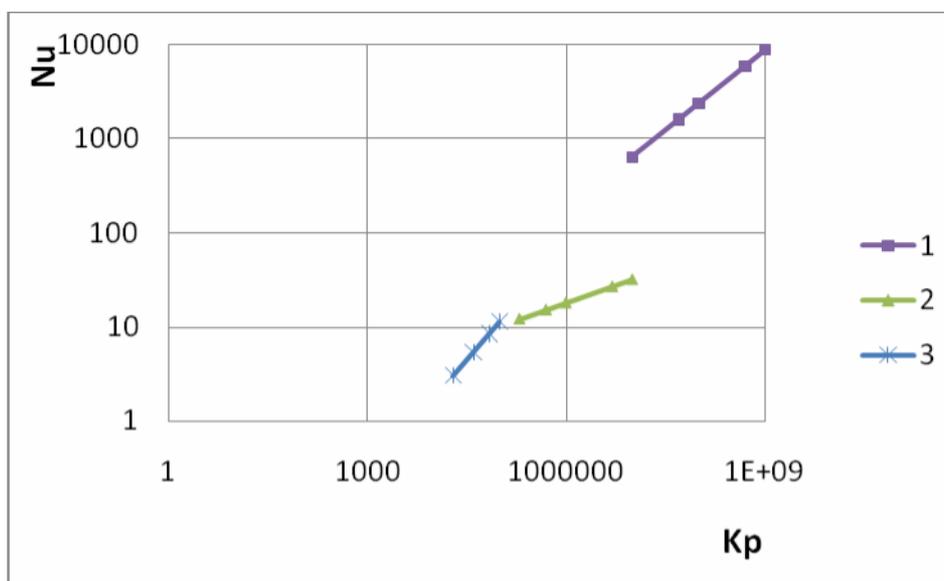


Рис. 3. Зависимость числа Nu от Kp

Однако, реальные условия теплообмена в плазменных печах не укладываются в классические схемы конвективного теплообмена, поэтому для расчетов необходима разработка методик теплового расчета, основанных на опытных данных, полученных непосредственно для условий теплообмена в высокотемпературных плазменных устройствах.

Основываясь на данных полученных в ходе проведения экспериментальных исследований были внесены изменения в данную теорию и расширены границы ее применимости ($10^4 < K_p < 10^5$). Решая сопряженную задачу теплообмена, был выполнен расчет α – коэффициента теплопередачи от газового потока стенке камеры сжигания плазменной печи. При этом в качестве известных параметров принималось распределение температурного поля в стенке печи в каждый момент времени, характеристики плазменного потока (мощность, расход, температура). Допускалось, что характеристики материала стенки постоянны. Характеристики потока воздушной плазмы принимались в функциональной

зависимости от локальной температуры на основе данных [3–4]. Задача решалась методом конечных разностей. Таким образом, согласно полученным экспериментальным данным (см. рис. 4) зависимость числа Нуссельта от функции удельного потока импульса, вносимого в камеру печи плазменной струей можно определить по зависимостям:

$$Nu = 0,009K_p^{0,82} \text{ при } 1 \cdot 10^4 < K_p < 1 \cdot 10^5 \quad (3)$$

При вычислении числа Nu в качестве определяющего размера входит усредненный размер пода печи, рассчитываемый как корень квадратный из площади пода.

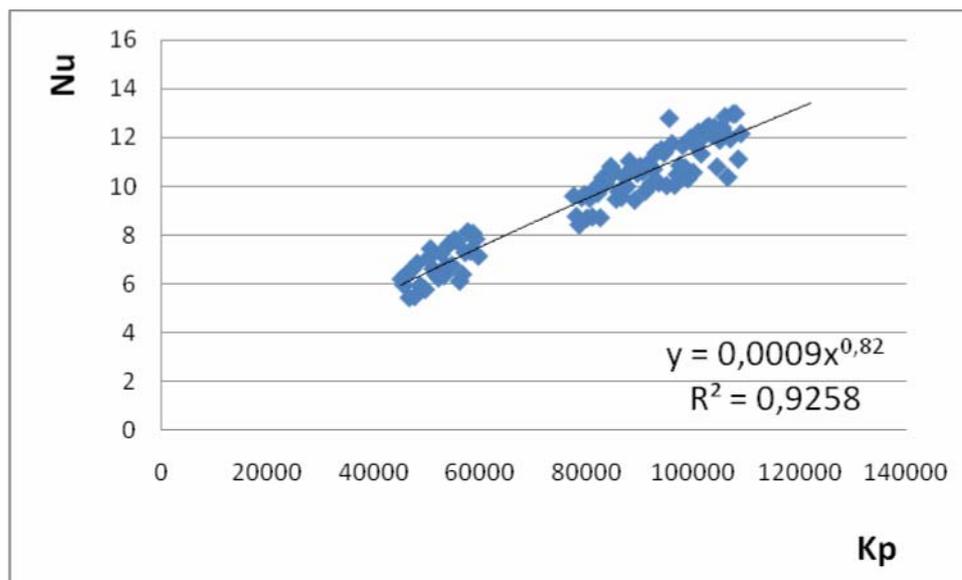
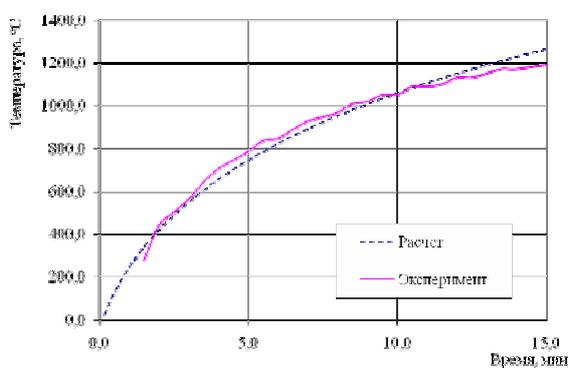


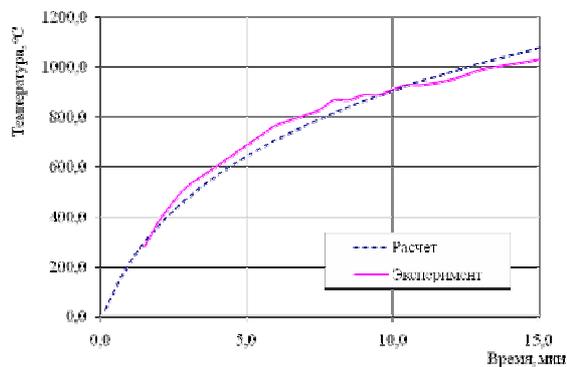
Рис. 4. Зависимость числа Nu от K_p (экспериментальные данные и аппроксимация)

На рис. 5 приведены результаты расчетов и данные экспериментов. Как видно из рисунков расхождение кривых нагрева незначительно и в большинстве случаев не превышает 10 %.



Тепловая мощность 78,2 кВт,
расход газа 14,2 г/с

(а)



Тепловая мощность 50,0 кВт,
расход газа 8,7 г/с

(б)

Рис. 5. Динамика нагрева камеры сжигания плазменной печи

Заключение

Разработан экспериментальный комплекс на базе плазменной шахтной печи. Печь работает в режиме окислительного пиролиза. Мощность установки до 100 кВт, производительность до 100 кг/ч. Проведены экспериментальные исследования режима нагрева печи и процесса сжигания модельных отходов. Определены теплотехнические параметры печи полупромышленной производительности, обусловленные параметрами рабочей среды на основе воздушной плазмы, генерируемой электродуговыми плазмотронами. Получены данные по теплопереносу от плазменного потока к конструкционным элементам печи. Разработана полуэмпирическая методика теплового расчета плазменных печей. На примере сжигания модельных отходов показана возможность вклада дополнительного количества тепла в процесс сжигания и возможность регулирования мощности генерируемой плазмотронами.

Обозначения

G_p — расход плазмообразующего газа через плазмотроны, кг/с; ω_0 — скорость выхода газов из сопла плазмотрона, м/с; ρ_0 и ρ_z — плотности газа соответственно при 0 °С и 1 атм и действительных условиях, кг/м³; V — объем рабочего пространства, м³; ν_z и ν_c — кинематические вязкости соответственно при температуре газа T_z и температуре пограничного слоя, равной $(T_m+T_z)/2$ (T_m — температура материала), м²/с; $R_V=V/F$, где F — площадь ограждения рабочего пространства, м².

1. Розенгарт Ю.И. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах : Учебное пособие для металлургических и теплотехнических специальностей металлургических ВУЗов и факультетов. – Киев: Вища школа, 1986. – 292 с.

2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – с. 560.

3. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

4. Егоров А.В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей. – М.: Мисис, 2000. – 270 с.