

Деструкция токсичных отходов в плазменном реакторе**Ложечник А.В., Моссэ А.Л., Хведчин И.В., Савчин В.В., Никончук А.Н.***Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук
Беларуси, 220072, Беларусь, Минск, ул. П. Бровки 15. lozhechnikav@mail.ru*

Альтернативой обычным методам низкотемпературного сжигания токсичных отходов является их уничтожения в термической плазме. Плазменная технология позволяет эффективно обрабатывать органические и неорганические соединения. Одним из основных достоинств данного метода является хорошее перемешивание обрабатываемого материала с плазмой. Этот процесс может быть эффективно реализован в многоструйном плазменном реакторе [1,2,3,4]. В данной работе предлагается установка с реактором с трехструйной камерой смешения. Она содержит систему подачи отходов в плазменный реактор и подключается к системам электро-, водо- и газоснабжения. Переработка отходов происходит по следующему принципу: при взаимодействии трех плазменных струй с подаваемым материалом в камере смешения образуется гетерофазный поток, который затем формирует зону реакции по всей длине реактора.

В работах [1,2] показано, что использование различных плазмообразующих газов, различных по составу отходов и добавок к ним влияет на конечный состав продуктов плазменной переработки органических и хлорорганических отходов. Состав хлоруглеродов и других хлорсодержащих отходов, в том числе и пестицидов, достаточно разнообразен. Соотношение элементов С, Н, Cl, N и О в них может варьироваться в достаточно широких пределах. В работе [2] выполнены расчеты для дихлорметана CH_2Cl_2 в интервале температур 300-4000 К, при давлении 10^5 Па с учетом образования в системе 165 компонентов, в том числе 35 хлорсодержащих. В работе [5] отмечается вероятность конденсации углерода при плазменном пиролизе хлоруглеродов, даже при высоких соотношениях водород/дихлорметан. При использовании метановой плазмы наблюдается высокая степень превращения Cl в HCl, но также увеличивается и сажеобразование. В системе с массовым соотношением $\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{CH}_4 = 1$, образование конденсированного углерода вероятно в интервале температур 3000-3100 К.

Плазменный реактор.

На основании анализа результатов исследований плазмохимических процессов уничтожения токсичных промышленных отходов, а также других работ по исследованию процессов смешения и теплообмена в плазменных реакторах [5] показаны эффективность и перспективность плазменных реакторов с многоструйной камерой смешения для обработки дисперсных материалов и диспергированных растворов. Этот выбор подтверждается и достаточно широким использованием реакторов такого типа в опытно-промышленных и промышленных условиях.

Плазменные реакторы с многоструйной камерой смешения характеризуются равномерным профилем температуры и скорости в начальном сечении канала, т. е. в плоскости ввода плазменных струй. Кроме того, эти реакторы дают возможность организации осесимметричного или распределенного ввода перерабатываемого материала, повышения мощности реактора за счет увеличения числа плазмотронов и единичной мощности каждого из них. К перечисленным преимуществам плазменных реакторов такого типа следует отнести возможность компоновки на основе многоструйной камеры смешения одно-, двух- и многоступенчатых (многомодульных) схем реакторов, что способствует повышению уровня их мощности и эффективности, а также расширяет возможности

технологического использования за счет формирования структуры плазменного потока с определенным и даже предварительно заданным распределением температур по сечению и длине канала реактора.

Более того, многоструйное смешение допускает сплошную и непрерывную подачу пылегазовой или жидкой струи, эмульсии или суспензии. Этим способом, как показано экспериментально, можно подавать и перерабатывать концентрированные суспензии плохо растворимых веществ. Это относится и к смесям различных пестицидов, образовавшимся в результате длительного хранения в поврежденной таре.

Технология переработки. В соответствии с предлагаемой технологией в плазменном реакторе происходят процессы смешения, нагрева и переработки утилизируемого материала. Последняя осуществляется под воздействием высоких температур потока воздушной плазмы. Зольный остаток продуктов переработки собирается в промежуточном бункере, а поток отходящих дымовых газов (ОДГ) поступает в систему газоочистки, на выходе из которой осуществляется отбор газов на анализ с последующим удалением их вытяжным вентилятором в атмосферу [3,4].

Особо следует отметить возможность управления структурой плазменного потока, формируемого в камере смешения, путем изменения ее геометрии, способа ввода в нее плазменных струй и параметров работы плазмотронов. Основным элементом плазменного реактора является электродуговой плазмотрон постоянного тока.

С целью оптимизации и управления процессом термической переработки отходов, а также для предотвращения повторного образования токсичных веществ производится закалка продуктов реакции (резкое снижение температуры до 300–400 °С) путем ввода охлаждающего агента (воздуха или воды) через специально разработанное закалочное устройство. При этом токсичные соединения в виде фенолорганических соединений хлора или других галогенов после их плазмотермического разложения и охлаждения должны фиксироваться в виде галоген водородов (например, HCl), которые хорошо поглощаются и нейтрализуются при конечной очистке газа в скруббере. При наличии наполнителя (каолина) возможно образование хлоридов, и в первую очередь хлорида железа, которые после конденсации могут улавливаться на фильтре.

Плазменная установка состоит из агрегатной части, системы электрообеспечения, системы очистки отходящих газов, а также системы газо- и водоснабжения (рисунок 1).

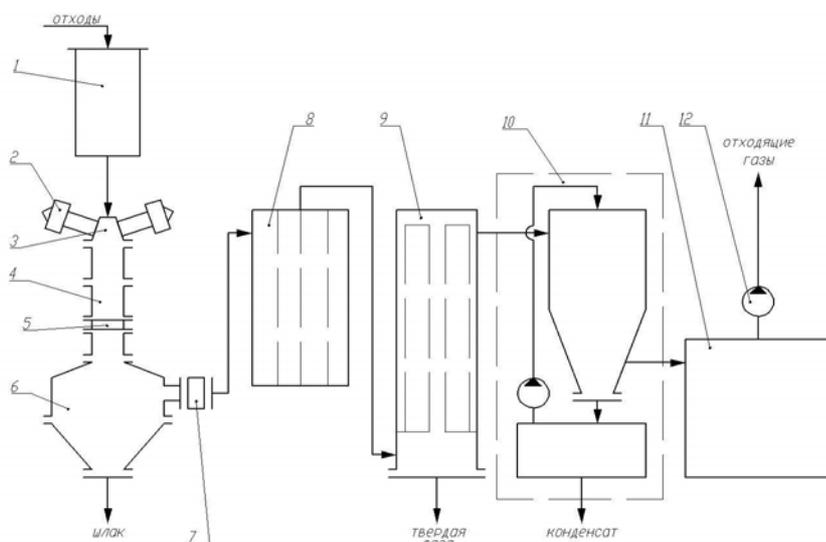


Рис.1. Технологическая схема установки для плазменной деструкции непригодных пестицидов: 1 – устройство для подачи отходов, 2 – плазмотрон, 3 – камера смешения, 4 – секции реактора, 5 – закалочное кольцо, 6 – промежуточный бункер, 7 – изолятор, 8 – теплообменник, 9 – рукавный фильтр, 10 – скруббер, 11 – ионообменный фильтр, 12 – вытяжной вентилятор.

Агрегатная часть установки состоит из: устройства для подачи отходов (жидкие – форсунка, твердые – дозатор); трех плазмотронов; плазменного реактора, который включает в себя камеру смешения и набор охлаждаемых секций реактора; закалочного устройства и промежуточного бункера.

Система очистки отходящих газов включает в себя следующие основные элементы: теплообменник; сетчатый рукавный фильтр; скруббер; ионообменный фильтр; вытяжной вентилятор.

Плазменная переработка токсичных отходов реализована в плазменном реакторе с трехструйной камерой смешения, а в качестве плазмообразующего газа используется воздух. При этом воздействие всех трех плазменных струй направлено на струю подачи исходного сырья – пестицидов или других отходов, что способствует лучшему перемешиванию теплоносителя и перерабатываемого материала. В результате повышается эффективность переработки сырья.

Для сбора и обработки данных использовался специально разработанный программно-аппаратный комплекс (рисунок 2).



Рис.2. Программно-аппаратный комплекс по управлению установкой.

Сигналы с датчиков 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 им 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.

Для управления экспериментальной установкой и контроля параметров работы разработана программа в среде графического программирования LabView 8.6 компании National Instruments.

Моделирование процесса переработки.

При проведении термодинамического расчета использовалась модель плазменного реактора со следующими параметрами:

- Диаметр реактора – 0,1 м;
- Длина реактора – 0,5 м;
- Тепловой КПД реактора – 70 %;
- Плазмообразующий газ – воздух;
- Среднемассовая температура в реакционной зоне – 1000 - 3000 К;
- Давление – 1 атм.

Модель представляет собой реактор, разделенный на 3 элемента: камера смешения, реактор и закалочный модуль. В первом элементе происходит перемешивание плазменного потока с перерабатываемым материалом. В закалочном модуле происходит охлаждение продуктов реакции.

На рисунке 3 представлен равновесный состав продуктов реакции при различных температурах реагирующей смеси.

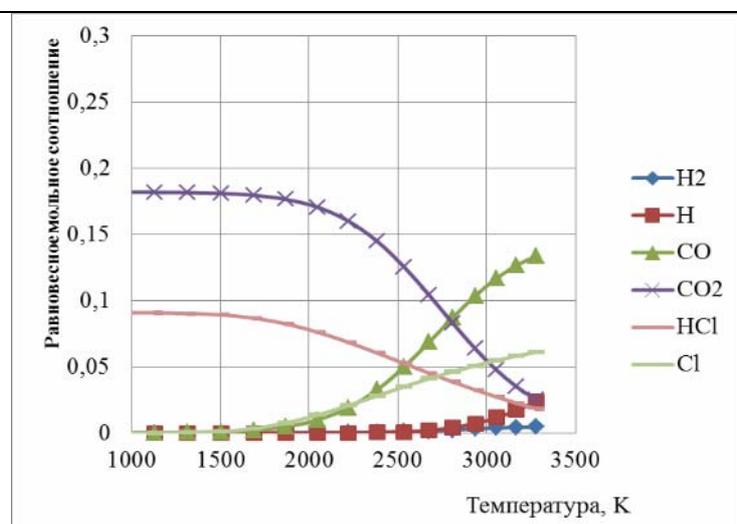


Рис.3. Равновесный состав продуктов реакции. ($N_2:O_2:C_6H_6:C_6Cl_6 = 48:12:1:1$ мольное соотношение)

В качестве модельного вещества была выбрана смесь, состоящая из бензола и гексахлорбензена, взятых в равных долях.

Проведено моделирование процесса переработки данной смеси в плазменном реакторе с использованием воздуха в качестве плазмообразующего газа. Модельный состав воздуха: кислород – 20%, азот – 80%.

Экспериментальные исследования проводились на различных режимах работы установки с подачей в реактор пестицидов – изофена и концентрата бутилового эфира 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты. Пестициды содержат 50–60 % основного вещества и 50–40 % вспомогательного вещества - наполнителя, в состав которого входят каолин, аэросил и силикагель. Наличие в составе пестицидов органических и хлорорганических соединений в указанных количествах может оказывать существенное влияние на процессы в плазменном реакторе.

Переработка хлорорганических пестицидов осуществлялась при следующих параметрах:

- Расход материала: 15 кг/ч;
- Подведенная электрическая мощность: 90 кВт;
- Общая тепловая мощность: 58,5 кВт;
- Общий расход воздуха: 15 г/с;

- Среднемассовая температура плазменного потока на входе в камеру смешения: 3000 К;
- Температура газа на выходе из реактора (после закалки): 800 К.
- Перерабатываемое вещество - бутиловый эфир 2,4- дихлорфеноксиуксусной кислоты, наполнитель - каолин.

По данным калориметрических измерений среднемассовая температура высокотемпературного потока перед закалочным кольцом плазменного реактора составляет 3500 °С. В соответствии с известными термодинамическими данными, содержание NO в такой плазме составляет 4–5 об. %. В отсутствие закалки движение плазменного потока в реакторе сопровождается снижением температуры газа до $T \sim 1200$ °С и, вследствие термического разложения NO, уменьшением его концентрации до 0,3%. Быстрое охлаждение плазменного потока ($\Delta T/\Delta t \sim 10^6 - 10^8$ К/с) в закалочной камере до температур ~ 300 °С приводит к фиксации объемного содержания NO в отходящей газовой смеси на уровне около 1,5%.

Анализ твердого остатка, получаемого после переработки дихлордифенилтрихлорэтана, проведенного на Mobile IR:FT-IR Spectrometer показал отсутствие исходного вещества. Анализ отходящих газов проводился на спектрометре ионной подвижности RAID S2. Анализ показал, что в отходящих газах не обнаружены: исходное вещество (порог чувствительности 360 ppb), хлор (Cl₂) (порог 2600 ppb), цианиды (порог 1600 ppb).

Заключение

Предложен плазмотермический метод переработки токсичных галогенсодержащих отходов в плазменном реакторе с трехструйной камерой смешения. В результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что плазменный метод уничтожения и переработки токсичных отходов является эффективным и экологически приемлемым, в частности при переработке сильно хлорированных и трудно горючих соединений.

Литература

1. Красовская Л.И., Моссэ А.Л. (2000). Плазмохимические процессы в трехструйных электродуговых реакторах. Минск, ИТМО, 169 стр.
2. Красовская Л.И. (1995). Термодинамический анализ деструкции дихлорметана в различных газовых средах. Весці АН Беларусі, Т.3. С. 51-54.
3. Ложечник А.В., Моссэ А.Л., Савчин В.В., Скоморохов Д.С., Хведчин И.В. Утилизация непригодных пестицидов в плазменном реакторе. Инженерно-физический журнал, 2011. Т. 84, № 5. С. 1034-1039.
4. A.V. Lozhechnik, A. L. Mossé, V. V. Savchin, D. S. Skomorokhov and I. V. Khvedchin. Utilization of useless pesticides in a plasma reactor. Journal of Engineering Physics and Thermophysics: Volume 84, Issue 5, (2011), Page 1114-1119.
5. Моссэ А. Л., Горбунов А. В., Ермолаева Е. М. Плазменная переработка токсичных органических и галогеносодержащих отходов. Проблемы и перспективы их обезвреживания. Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. Минск, 2003. Препринт №2, 52 с.