УДК 261.039.7:533

В. Е. Мессерле^{1,2}, А. Л. Моссэ³, А. Н. Никончук³, А. Б. Устименко⁴

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Выполнены работы по исследованию процесса переработки медицинских отходов плазменными методами. Проведены термодинамические расчеты переработки отходов на примере кости животного происхождения. Экспериментальные исследования выполнены в плазменной печи камерного типа с электродуговым плазмотроном мощностью 30 кВт.

Ключевые слова: медико-биологические отходы, плазменные методы, термодинамические расчеты, плазменная камерная печь.

Одной из наиболее важных экологических задач, стоящих перед многими странами, является загрязнение окружающей среды различными видами опасных отходов. Демографический взрыв и научно-технический прогресс привели к тому, что в окружающую среду поступает огромное количество отходов, которое превосходит возможности естественных экосистем. Острой проблемой остается утилизация отходов, содержащих токсичные вещества, а также отсутствие специально отведенных мест по уничтожению продуктов с просроченным сроком годности.

Переработка твердых бытовых и медико-биологических отходов (МБО) на территории Республики Казахстан в настоящее время практически не производится. Необходимость ежегодного обезвреживания опасных отходов медицинского происхождения в Казахстане составляет около 35 тонн. Проблема утилизации МБО вплоть до недавнего времени считалась мало актуальной для многих стран мира, что совпадало и с общемировой оценкой ее важности. Однако санитарно-гигиенические исследования типичных медицинских отходов, выполненных как в Казахстане, России, Беларуси, так и за рубежом [1, 2], показывают, что их опасность для окружающей среды значительно выше, чем у большинства химических отходов. Например, опасность в случае твердых отходов, содержащих цитостатические препараты и антибиотики, сравнима с опасностью загрязнения радиоактивными отходами высокого и среднего уровней активности.

В настоящей работе представлены результаты термодинамического анализа процесса термической переработки МБО и плазменная установка для их переработки. Исследованные МБО — костная ткань (кость животного происхождения) — имеют следующий химический состав (мас.%): Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂ — 70, C — 14, O — 9, N — 4, H — 2, S — 1.

Для выполнения термодинамических расчетов использовался программный комплекс TERRA [3]. Расчеты проводились при температурах до 3000 К и давлении 0.1 МПа для следующих составов исходной технологической смеси:

- 1) 10 кг МБО + 1.5 кг воздуха;
- 2) 10 кг МБО + 3 кг воздуха;
- 3) 10 кг МБО + 5 кг воздуха;
- 4) 10 кг МБО + 1 кг воздуха + 0.5 кг водяного пара.

Варианты 1-3 моделируют сухую костную ткань, а вариант 4 — влажную.

На рис. 1 показано изменение концентраций газообразных компонентов в зависимости от температуры процесса переработки МБО (вариант 1). С увеличением температуры концентрация синтез-газа (CO + H₂) увеличивается до максимального значения 77.2 об.% (CO — 35.2 об.%, H₂ — 42.0 об.%) при T = 1300 K, при этом концентрация метана (CH₄) составляет 0.2 об.%, а концентрация окислителей (CO₂ + H₂O) не превышает 0.35 об.% (рис. 1, *a*). При дальнейшем повышении температуры концентрация синтез-газа незначительно снижается, а окислителей — возрастает. Концентрация балластирующего азота (N₂) остается постоянной во всем

¹Институт проблем горения. Республика Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172; ²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. 630090, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, 1; ³Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; э-почта: mosse@itmo.by; ⁴ Научноисследовательский институт экспериментальной и теоретической физики. Республика Казахстан, 050040, г. Алматы, ул. аль-Фараби, 71; э-почта: ust@physics.kz. Поступила 05.01.2015.

температурном интервале, составляя 14.3 об.%. При температуре выше 1600 К в газовой фазе появляются соединения кальция, фосфора и серы (рис. 1, δ). Максимальная концентрация молекулярного фосфора (P₂) составляет 2.86 об.% при *T* = 2000 К, оксида фосфора (PO) — 11.1 об.% при 3000 К, фосфорного ангидрида (P₂O₃) — 0.18 об.% при 2250 К, сульфида фосфора (PS) — 0.6 об.% при 2150 К, атомарного фосфора (P) — 0.2 об.% при 3000 К, кальция (Ca) — 1.2 об.% при 3000 К, гидроксидов кальция (CaOH₂ и CaOH) — 0.8 об.% при 3000 К.

На рис. 2 представлено изменение концентраций конденсированных компонентов в зависимости от температуры процесса. Из рисунка видно, что углерод полностью переходит в газовую фазу при температуре выше 1300 К, а трикальцийфосфат (Ca₃P₂O₈) диссоциирует на оксид кальция (CaO) и фосфорсодержащие соединения (P₂O₃, PO, PS, P₂ и P) при температуре выше 2300 К. Сульфид кальция (CaS) сохраняется в конденсированной фазе до T = 2100 К.

При трехкратном увеличении доли воздуха в системе (вариант 3) концентрация синтез-газа снижается до 53.4 об.% за счет увеличения концентрации балластирующего газа азота до 40.4 об.% (T = 1600 K). Углерод полностью переходит в газовую фазу уже при T = 1000 K. В целом поведение компонентов как газовой, так и конденсированной фаз качественно подобно представленному на рис. 1 и 2. Более того, добавка в систему водяного пара (вариант 4) также не приводит к качественному изменению поведения основных компонентов газовой и конденсированной фаз, а влияет лишь на концентрацию водорода в синтез-газе. В частности, максимальная концентрация водорода достигает 55.4 об.% уже при температуре 900 К против 42 об.% при T = 1250 К (вариант 1). Углерод полностью переходит в газовую фазу при температуре 1250 К.

Таким образом, при переработке МБО из органической массы получается в основном синтез-газ с содержанием горючих компонентов 77.4–84.6 об.%, а минеральная часть не содержит углерода и представлена в основном оксидом кальция. Степень газификации углерода во всех трех вариантах достигает 100% в интервале температур 1000–1250 К.

Удельные энергозатраты на процесс переработки МБО (рис. 3) возрастают с ростом температуры во всем ее диапазоне для всех четырех вариантов расчета. В диапазоне оптимальных температур переработки МБО (T = 1200-1600 K) удельные энергозатраты варьируются в интервале 0.7-1.2 кВт · ч/кг. При этом минимальные энергозатраты соответствуют варианту 3 с максимальной долей воздуха в системе, что связано с компенсацией эндотермического эффекта переработки тепловыделением за счет реакции окисления углерода.

Экспериментальные исследования выполнены в плазменной камерной печи. Это устройство периодического действия, для нагрева которого используется электродуговой плазмотрон типа PL-03/30 электрической мощностью до 35 кВт [4–6]. Плазменная камерная печь предназначена для плазмохимической переработки токсичных МБО различного происхождения, которые образуются в медицинских учреждениях, включая производства медицинских препаратов. Высота камерной печи составляет 0.33 м, длина — 0.22 м, ширина — 0.22 м, толщина футеровки — 0.04 м. Масса загрузки отходов варьируется примерно от 5 до 7 кг в зависимости от их состава. Время полного цикла переработки отходов с учетом времени остывания печи составляет около 30 мин.

В состав технологической установки (рис. 4) кроме плазменной камерной печи входят системы электроснабжения и запуска плазмотрона, а также системы газо- и водоснабжения плазмотрона и камеры сжигания печи. Установка снабжена системой отбора газообразных продуктов процесса для проведения их анализа.

Из-за недостатка кислорода в плазмообразующем газе (воздухе) в камере сжигания печи происходит лишь газификация отходов (частичное их сжигание). Согласно схеме экспериментальной технологической установки, представленной на рис. 4, из камеры сжигания образующаяся газовая смесь перемещается в камеру дожигания, куда дополнительно подается воздух для полного дожигания отходящих газов. Для увеличения времени нахождения газовой смеси при высокой температуре камера дожигания выполнена в виде циклонной топки с учетом того, что для полного разложения диоксинов необходимо выдерживать газ при температуре 1500 К в течение 2х секунд. Изнутри камера футерована огнеупорным материалом для поддержания высокой температуры. Расход воздуха, подаваемого в камеру дожигания, составляет 0.2 кг/с. Из камеры дожигания газовая смесь, как показано на рис. 4, поступает в систему газоочистки.

Следует отметить, что для финишной очистки отходящих из установки газов использовался экологический ионообменный фильтр типа РИФ-ФХ-0,5, разработанный и изготавливаемый компанией ООО "ИМТ-Фильтр". Фильтры такого типа с ионообменным фильтрующим материалом Фибан предназначены для очистки газов от токсичных соединений, аэрозолей кислот, щелочей и солей в вытяжных и рециркуляционных системах установок химической и других отраслей промышленности. Очистка газов в ионообменных фильтрах происходит в



Рис. 1. Изменение концентраций органических (*a*) и неорганических (б) компонентов газовой фазы в зависимости от температуры процесса переработки МБО (вариант 1)



Рис. 2. Изменение концентраций компонентов конденсированной фазы в зависимости от температуры процесса переработки МБО (вариант 1)



Рис. 3. Изменение удельных энергозатрат (Q_{yx}) на переработку МБО в зависимости от температуры процесса для разных составов исходной технологической смеси: 1-4 — варианты 1–4 соответственно

результате химических реакций между молекулами газов и функциональными группами ионообменных волокнистых материалов Фибан, являющихся основой фильтрующих элементов. Благодаря химическому связыванию токсичной примеси ионообменными фильтроматериалами достигается высокая степень очистки. Ионообменный фильтр работает в автоматическом или ручном режимах регенерации и регенерируется водой или раствором соответствующего реагента. Ионообменный фильтр РИФ-ФХ-0,5 в одиночном модуле имеет производительность по очищаемому воздуху 500 м³/час.

Основным элементом установки является плазмотрон линейной схемы постоянного тока PL-03/30, представленный на рис. 5 во время его стендовых испытаний на мощности 20 кВт при расходе плазмообразующего воздуха $1.5 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Светящаяся часть плазменного факела составляет более 20 калибров. Вольтамперная характеристика (BAX) плазмотрона PL-03/30 при работе на воздухе приведена на рис. 6.

На рис. 7 показаны зависимости подведенной к плазмотрону мощности N от величины силы тока дуги I. При изменении расхода плазмообразующего газа от 0.8 до 3.8 г/с и силе тока от 170 до 260 А в случае использования анода с диаметром сопла $d_a = 10$ мм наблюдается рост мощности плазмотрона от 11 до 22.5 кВт.

В экспериментах расход костной ткани $G_{\rm m}$ изменялся в пределах (1.5–3) · 10⁻³ кг/с. Количество плазмообразующего воздуха $G_{\rm g}$ составило 3.6 кг/ч. Соотношение $G_{\rm m}/G_{\rm g}$ = 1.8–3, что соответствует расчету по варианту 2.

Упакованные в пакеты или коробки отходы массой 5–7 кг помещаются в камеру печи, после чего закрывается загрузочный люк. Под воздействием воздушного плазменного факела среднемассовая температура в камере достигает 1800 К, органическая часть материала отходов газифицируется, а неорганическая часть отходов





б

Рис. 4. Принципиальная схема (*a*) и фотография (б) экспериментальной технологической установки для переработки МБО: *1* — электродуговой плазмотрон PL-03/30; *2* — камерная печь PCF-03; *3* — камера дожигания; *4* — фильтр рукавный; *5* — экологический фильтр; *6* — вытяжной вентилятор; *7* — выхлопная труба; *8* — контейнер для сбора шлака; *9* — воздух для дожигания



Рис. 5. Плазмотрон PL-03/30



Рис. 6. ВАХ плазмотрона PL-03/30 с внутренним диаметром анода $d_a = 10$ мм при разных расходах воздуха: $I = 3.82 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $2 = 2.97 \cdot 10^{-3}$; $3 = 2.54 \cdot 10^{-3}$; $4 = 2.12 \cdot 10^{-3}$; $5 = 1.7 \cdot 10^{-3}$; $6 = 1.27 \cdot 10^{-3}$; $7 = 0.85 \cdot 10^{-3}$



Рис. 7. ВАХ плазмотрона PL-03/30 с внутренним диаметром анода $d_a = 10$ мм в форме зависимости электрической мощности от силы тока на дуге при расходах воздуха: $I - 3.82 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $2 - 2.97 \cdot 10^{-3}$; $3 - 2.54 \cdot 10^{-3}$; $4 - 2.12 \cdot 10^{-3}$; $5 - 1.7 \cdot 10^{-3}$; $6 - 1.27 \cdot 10^{-3}$; $7 - 0.85 \cdot 10^{-3}$

плавится. Полученный синтез-газ через системы очистки и охлаждения непрерывно выводится из установки. Расплавленная минеральная часть отходов удаляется из печи после ее остановки.

По результатам экспериментальных исследований определены режимы работы плазменной камерной печи, выполнен анализ отходящих газов, получены образцы конденсированных продуктов, отобранных в камере сжигания, и определен их химический состав. Получен следующий состав газа на выходе из плазменной печи (об.%): CO — 63.4; H₂ — 6.2; N₂ — 29.6; S — 0.8. Суммарная концентрация синтез-газа (CO + H₂) составляла 69.6 об.%, что хорошо согласуется с данными расчета. Выход синтез-газа согласно расчету при температуре 1800 К составил 64.9 об.%. Расхождение между экспериментом и расчетом не превышает 6.8%.

Выполнен микрорентгеноспектральный анализ продуктов, полученных в экспериментах. Установлено следующее содержание элементов в образце продукта, собранного в камере сжигания печи после проведения эксперимента, мас.%: Са — 54.6; Р — 12.9; О — 32, которые присутствуют в виде оксидов СаО — 76.4 и Р₂О₃ — 22.9. Присутствуют следы Al, Si и K. Определено также содержание углерода в образце — 2.9 мас.%.

Анализ конденсированных продуктов, собранных на фильтре после выхода из камеры сжигания печи, показал следующее содержание элементов, мас.%: Ca — 41.5; P — 14.1; O — 33; Si — 0.5; K — 1.5; S — 1.1; Fe — 1.7. Все элементы присутствуют в образце в виде оксидов, мас.%: CaO — 67; P₂O₃ — 25; SiO₂ — 1; K₂O — 1.6; SO₂ — 1; Fe₂O₃ — 2.5. Эти результаты для наиболее стабильного нелетучего компонента в конденсированной фазе (CaO) коррелируются с данными расчетов: CaO — 71.61 мас.%. Расхождение между экспериментом и расчетом по концентрации CaO не превышает 7%.

Удельные энергозатраты на технологический процесс переработки костной ткани в плазменной печи по результатам экспериментов изменяются от 3.5 до 4.6 кВт · ч/кг. Столь значительное расхождение расчетных (рис. 3) и экспериментальных значений удельных энергозатрат на процесс объясняется тем, что в термодинамических расчетах определяются минимально возможные энергозатраты в изолированной термодинамической системе без учета обмена теплом с окружающей средой. На практике как сама плазменная камерная печь, так и плазмотрон характеризуются значительными тепловыми потерями в окружающую среду с охлаждающей водой.

Разработанную в результате выполненных исследований установку для плазмохимического обезвреживания и переработки МБО планируется использовать в медицинских учреждениях, научно-исследовательских лабораториях и на медико-биологических производствах. Возможна реализация мобильного варианта установки, который предназначен для обслуживания небольших медицинских учреждений. Разработанные и апробированные варианты устройства можно использовать для изучения и реализации других технологических процессов.

Литература

1. Brunner C. R., Brown C. H. Hospital waste disposal by incineration. Waste streams, technology, and state requirements. J. Air Pollution Control Association (JAPCA). 1988. Vol. 38, No. 10. Pp. 1297–1309.

2. Моссэ А. Л., Савчин В. В. Моделирование процесса переработки медико-биологических отходов в плазменной камерной печи. Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79, № 4. С. 12–16.

3. Gorokhovski M., Karpenko E. I., Lockwood F. C., Messerle V. E., Trusov B. G., Ustimenko A. B. Plasma Technologies for solid fuels: experiment and theory. *J. Energy Institute*. 2005. Vol. 78, No. 4. Pp. 157–171.

4. Моссэ А. Л., Савчин В. В. Плазмотермическая переработка токсичных отходов. *Твердые бытовые отходы.* 2006. № 12. С. 22–24.

5. Mosse A. L., Gorbunov A. V., Sauchyn V. V. Plasma furnaces for toxic waste processing. J. High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High Technology Plasma Processes. 2006. Vol. 11, Issue 2. Pp. 205–218.

6. Zhdanok S. A., Mosse A. L. Plasma methods for toxic wastes processing. *Plasma Assisted Decontamination of Biological and Chemical Agents*. Springer Science+Business Media B.V. 2008.Pp. 143–149.