

## Газификация углеродсодержащих отходов в плазмохимическом реакторе

В.Е. Мессерле<sup>1,2,3</sup>, М.Н. Орынбасар<sup>1,3,4</sup>, К.А. Умбеткалиев<sup>1,3,4</sup>, А.Б. Устименко<sup>1,4,5\*</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>НИИ экспериментальной и теоретической физики, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан <sup>3</sup>

<sup>4</sup>Научный производственно-технический центр «Жалын», ул. Павлодарская, 11, Алматы, Казахстан

<sup>5</sup>Национальная нанотехнологическая лаборатория, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты термодинамических расчетов и экспериментов по плазменной газификации твердых углеродсодержащих отходов на примере медико-санитарных отходов, показавшие перспективность использования плазмохимической технологии переработки отходов с получением горючего газа и инертного минерального материала. Для термодинамических расчетов использовалась универсальная программа расчета многокомпонентных гетерогенных систем TERRA с базой термодинамических свойств около 3000 веществ в интервале температур 300-6000 К. Найдена оптимальная температура газификации отходов  $T = 1600$  К, при которой достигается максимальная концентрация синтез-газа 82,6 об. % ( $\text{CO} - 31,7$ ,  $\text{H}_2 - 50,9$ ). Эксперименты проводились в оснащённом плазмотроном мощностью 70 кВт полу-периодическом плазмохимическом реакторе производительностью по отходам до 30 кг/час. В процессе плазменно-воздушной газификации медико-санитарных отходов при 1600 К получены синтез-газ с концентрацией 71,1 об. % ( $\text{H}_2 - 44,6$ ,  $\text{CO} - 26,5$ ) и твердый инертный остаток светло-серого цвета. Сравнение способов плазменной газификации и обычного сжигания отходов показывает более высокую энергоэффективность плазменной технологии. В результате плазменной газификации медико-санитарных отходов получается горючий газ с тепловой мощностью 430 МДж/ч, тогда как при их сжигании образуется инертный газ ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ ) с физической теплотой 145 МДж/ч. Таким образом, полезная тепловая мощность продуктов плазменной газификации в три раза выше, чем при сжигании отходов. Сопоставление результатов эксперимента и расчетов показало их удовлетворительное согласие. Как в расчетах, так и в экспериментах вредных примесей в продуктах плазменной газификации отходов обнаружено не было.

*Ключевые слова:* отходы, газификация, плазмохимический реактор, синтез-газ, термодинамический расчет.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы переработки и уничтожения твердых углеродсодержащих отходов (УСО), включая токсичные медико-санитарные отходы (МСО), увеличивается с ростом населения и уровнем его жизни [1-7]. Наиболее распространённым методом утилизации УСО является их сжигание с последующим захоронением образующейся золы на специальных полигонах. В результате сжигания УСО образуются сильно токсичные химические соединения (диоксины, фураны и бенз(а)пирен). Существует довольно много технологий сжигания УСО: камерное, слоевое, в кипящем слое. УСО могут сжигаться

в смеси с природным топливом. Наименее экологичным вариантом является их низкотемпературное сжигание в котлах. Особое место среди УСО занимают МСО, включающие отходы медицинских мероприятий для лечения от инфекций и характеризующиеся наличием инфицированных материалов (например, медицинские маски, перчатки, бахилы, защитные комбинезоны, средства лечения и вакцинации, упаковка, бинты, повязки, инфузионные наборы, использованные иглы, скальпели, ланцеты и т.д.), которые могли быть в контакте с кровью и биологическими жидкостями. МСО также включают микробиологические культуры, ампутированные части тела, лабораторные и пищевые отходы. МСО отличаются от

\*Ответственный автор  
E-mail: [ust@physics.kz](mailto:ust@physics.kz)

других видов опасных отходов, таких как химические, радиоактивные, универсальные или промышленные отходы тем, что могут привести к широкому распространению инфекционных заболеваний. Опасность МСО значительно выше, чем у большинства химических отходов. Плазменная переработка является наиболее перспективной технологией утилизации МСО [2-7]. Использование электродуговой плазмы со среднемагнитной температурой 5000 К и выше позволяет разложить любые органические и неорганические соединения за счет интенсификация процесса деструкции по сравнению с другими способами. Кроме того, разрушение сложных соединений в плазме чрезвычайно эффективно и без наличия кислорода. А это дает возможность успешно проводить в плазме процессы пиролиза, газификации и плавления отходов, что в ряде случаев имеет значительное преимущество перед их сжиганием и хранением на полигонах. Плазмохимическая переработка МСО позволяет интенсифицировать процесс получения топливного газа, состоящего в основном из синтез-газа ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), который может быть использован в качестве рабочего тела высокоэффективных электрогенераторов нового поколения, включая твердооксидные топливные элементы [8].

В данной статье представлены результаты термодинамического анализа и экспериментальных исследований газификации МСО в плазмохимическом реакторе. Проведенный комплекс исследований подтвердил перспективность реализации плазмохимической технологии эффективной переработки твердых УСО с получением топливного газа и инертного минерального материала.

Образующиеся при осуществлении медико-санитарной деятельности МСО характеризуются высокой токсичностью [9]. Средняя теплота сгорания МСО варьируется от 12550 до 16740 кДж/кг. Характерный состав МСО представлен по данным [10, 11], мас. %: бумага и картон – 47; пищевые отходы – 21; стекло – 12; пластмассы – 5; железо и его оксиды – 3; резина, кожа и другие горючие вещества – 3; текстиль – 2 и известняк – 2. Плотность МСО составляет около 1,1 кг/м<sup>3</sup>. Для МСО принят следующий химический состав, мас. %: С – 34,15; Н – 5,85; О – 6,29; N – 8,16; S – 0,94; Cl – 5,3; H<sub>2</sub>O – 32,31; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,0; SiO<sub>2</sub> – 2,0; CaCO<sub>3</sub> – 2,0 [12].

## 2. Термодинамический расчет

Для проведения термодинамического анализа

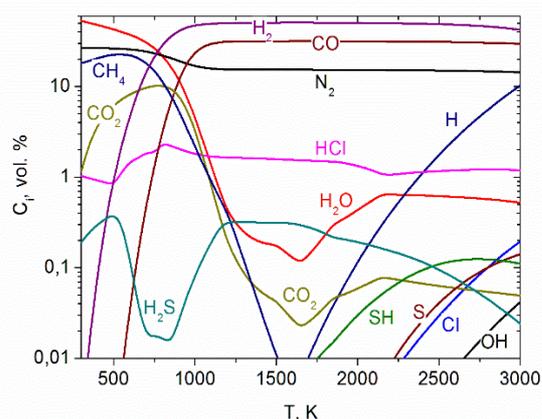
плазменной переработки УСО использовалась универсальная программа расчета многокомпонентных гетерогенных систем TERRA, отработанная для высокотемпературных процессов [13]. Программа TERRA обладает собственной базой термодинамических свойств около 3000 индивидуальных веществ в интервале температур 300-6000 К.

Расчеты плазменной газификации МСО выполнены в интервале температур 300-3000 К при давлении 1 атм. Состав исходной технологической смеси был выбран, исходя из условия полной газификации углерода: УСО : 100% МСО + 40% воздуха.

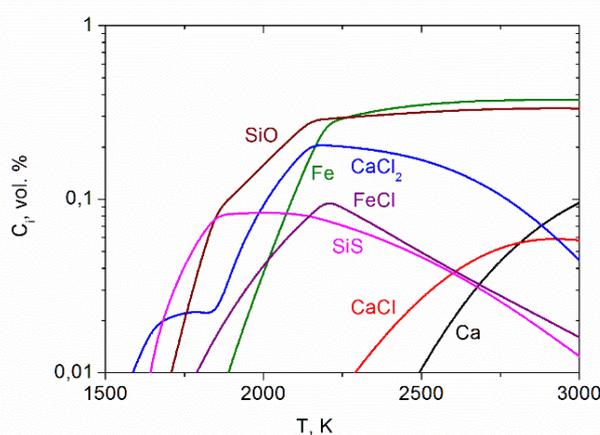
Изменения концентрации газообразных компонентов в зависимости от температуры воздушной газификации МСО показаны на рис. 1. С повышением температуры концентрация синтез-газа увеличивается до максимального значения 82,6 об. % ( $\text{CO} - 31,7$ ,  $\text{H}_2 - 50,9$ ) при  $T = 1600$  К (рис. 1(а)). При этой температуре концентрация окислителей ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) не превышает 0,13 об. %. При дальнейшем повышении температуры концентрация синтез-газа уменьшается из-за появления в газовой фазе атомарного водорода (H), концентрация которого достигает 10,3 об. % ( $T = 3000$  К). Концентрация балластного азота ( $\text{N}_2$ ) практически не меняется в интервале температур от 1200 до 3000 К, где она составляет 15,5 об. %. В последнем температурном диапазоне концентрация хлористого водорода (HCl) незначительно варьируется в пределах от 1,2 до 1,6 об. %. При температурах ниже  $T = 1900$  К сера представлена сероводородом ( $\text{H}_2\text{S}$ ), который при более высоких температурах диссоциирует с образованием серы (S) и атомарного водорода (H). При температурах выше 1600 К в газовой фазе появляются хлорид кальция ( $\text{CaCl}_2$ ), железо (Fe), монооксид кремния ( $\text{SiO}$ ) и хлор (Cl) с суммарной концентрацией менее 1 об. % (рис. 1 (б)).

Удельная теплота сгорания синтез-газа, полученного при воздушной газификации МСО, составляет 13620 кДж/кг. Этот горючий газ может быть использован в качестве рабочего тела в газотурбинных установках и газовых электрогенераторах.

На рис. 2 показаны изменения концентраций конденсированных компонентов в зависимости от температуры воздушной газификации МСО. Из рисунка видно, что углерод полностью переходит в газовую фазу при температуре выше 1200 К, образуя CO в газовой фазе (рис. 1 (а)). В этом случае обеспечивается стопроцентная газифика-



(a)

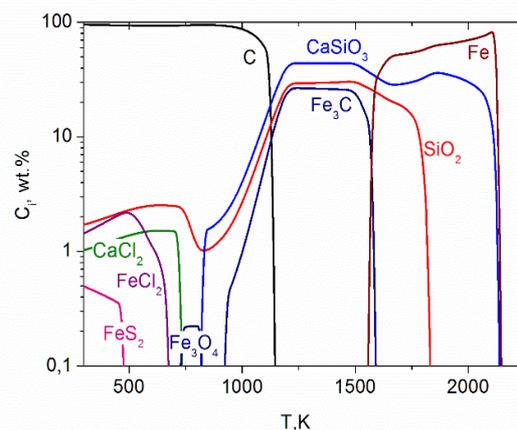


(б)

**Рис. 1.** Зависимость равновесного состава органической (а) и минеральной (б) частей газовой фазы от температуры при плазменной газификации МСО

ция углерода. В интервале температур от 1200 до 2200 К минеральный остаток от газификации МСО состоит в основном из диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), моносиликата кальция ( $\text{CaSiO}_3$ ), карбида железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) и железа ( $\text{Fe}$ ). При температурах выше 2150 К минеральные компоненты полностью переходят в газовую фазу с образованием определенных газообразных соединений (рис. 1(б)). Отметим, что газообразные и конденсированные продукты процесса плазменной газификации МСО не содержат вредных примесей диоксинов, фуранов, бенз(а)пирена и оксидов азота и серы.

Удельные энергозатраты  $Q_{\text{SP}}$  на процесс переработки МСО (рис. 3) увеличиваются с температурой во всем исследованном диапазоне. В диапазоне оптимальных температур переработки МСО ( $T = 1200\text{-}1650$  К), обеспечивающих полную газификацию углерода МСО и максимальный выход



**Рис. 2.** Изменение концентраций конденсированных компонентов в зависимости от температуры процесса при плазменной газификации МСО

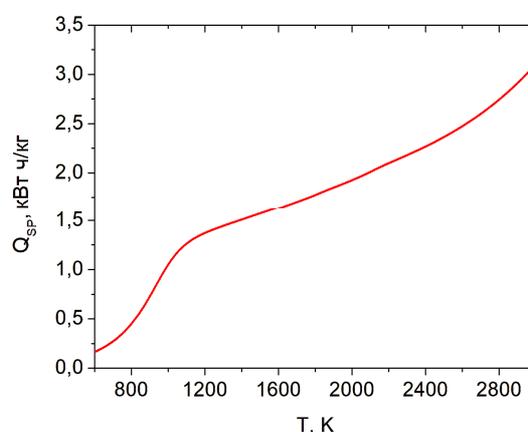
горючего газа, удельные энергозатраты варьируются в приемлемых пределах 1,3-1,7 кВт·ч/кг.

Степень газификации углерода  $X_C$  (рис. 4) определяется по содержанию углерода в твердом остатке. В частности,  $X_C$  рассчитывается с использованием следующего выражения:

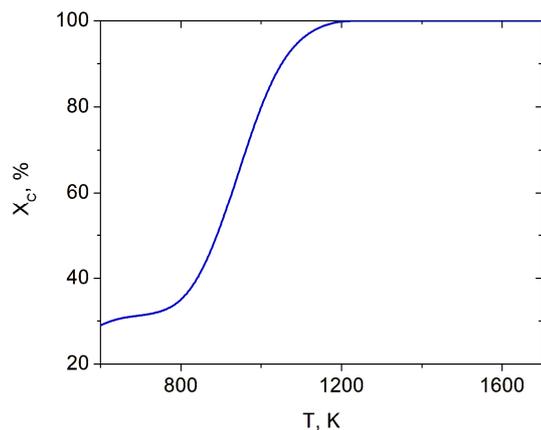
$$X_C = (C_{\text{ini}} - C_{\text{fin}}) / C_{\text{ini}} \cdot 100\%,$$

где:  $C_{\text{ini}}$  – начальное количество углерода в отходах, а  $C_{\text{fin}}$  – конечное количество углерода в конденсированных продуктах процесса плазменной газификации МСО.

Как видно из рис. 4, степень газификации углерода составляет 100 % уже при температуре 1200 К. Это означает, что углерод полностью переходит в газовую фазу с образованием  $\text{CO}$  при этой температуре (рис. 1).



**Рис. 3.** Температурная зависимость удельных энергозатрат при плазменной газификации МСО



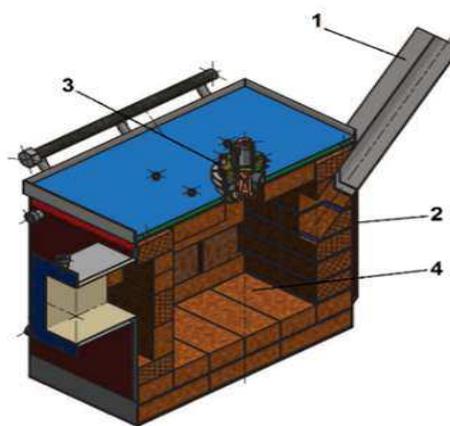
**Рис. 4.** Температурная зависимость степени газификации углерода при плазменной газификации МСО.

Полученные характеристики процесса плазменной газификации МСО были использованы при разработке экспериментальной плазменной установки.

### 3. Эксперимент

Цель экспериментов по газификации МСО в плазмохимическом реакторе заключалась в определении интегральных показателей процесса (среднемассовая температура, массовое отношение окислитель/отходы, удельные энергозатраты на процесс, степень газификации углерода, выход и состав газообразных продуктов) [7, 14]. Методика определения интегральных показателей процесса переработки отходов базируется на сведениях материального и теплового балансов плазменной установки. Для этого во всех узлах экспериментальной плазменной установки измерялись материальные и тепловые потоки с использованием приборов для измерения электрических параметров, расходов и составов реагентов и продуктов переработки отходов, среднемассовых температур и тепловых потерь.

Экспериментальные исследования газификации МСО проводились на установке, основными элементами которой являются высокоресурсный плазмотрон постоянного тока номинальной мощностью 70 кВт и плазмохимический реактор номинальной производительностью по МСО 30 кг/час [15, 16]. Помимо реактора 2 с плазмотроном 3 (рис. 5) в состав экспериментальной установки входят системы подачи плазмообразующего газа и охлаждающей воды в плазмотрон и реактор, система электроснабжения, система управления плазмотроном, а также система очистки отходя-

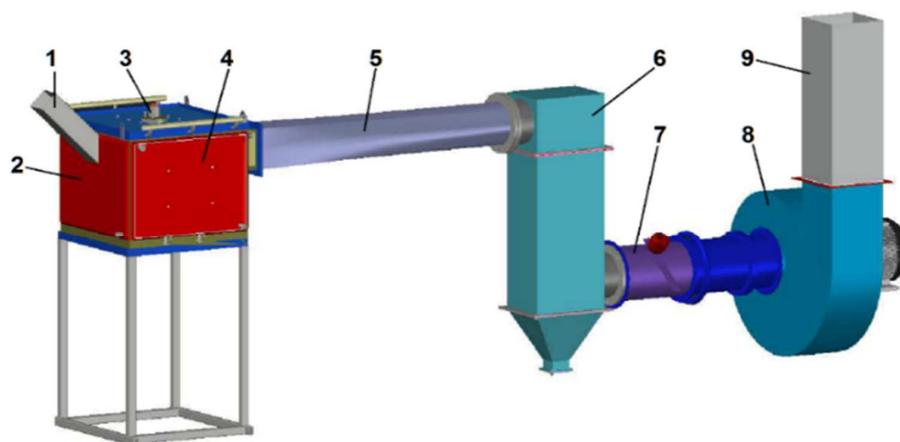


**Рис. 5.** Схема плазмохимического реактора для газификации отходов (поперечный разрез): 1 – патрубок для загрузки брикетированных отходов в реактор; 2 – плазменный реактор; 3 – электродуговой плазмотрон постоянного тока; 4 – зона газификации отходов.

щих газов 6 (рис. 6). Экспериментальная установка оснащена системой отбора газообразных продуктов газификации МСО 9 для проведения последующего их анализа. Конденсированные продукты процесса газификации накапливались на дне реактора и отбирались для анализа после его отключения.

Плазменный реактор 2 предназначен для плазменной газификации МСО. Плазмохимический реактор спроектирован в виде куба, футерованного огнеупорным кирпичом толщиной 0,065 м, размер внутренней стороны куба составляет 0,45 м. Реакционный объем реактора составляет 0,091 м<sup>3</sup>. Стенка реактора снабжена патрубком для загрузки брикетированного МСО в реактор 1. Стенки реактора снабжены термопарами и смотровыми окнами, позволяющими проводить пирометрические измерения температуры в реакторе.

Процесс плазменной газификации МСО включал следующие этапы. После запуска плазмотрона 3 и нагрева реактора 2 до температуры внутренней поверхности футеровки 1100 К, измеренной цифровым пирометром через патрубок 1, брикетированный МСО загружали в зону газификации 4 реактора через патрубок для загрузки брикетированных МСО в реактор 1 (рис. 2). Масса каждого брикета составляла 0,4 кг. МСО газифицировались плазменно-воздушным факелом от плазмотрона 3, обеспечивая в объеме реактора среднемассовую температуру до 1700 К. Образующиеся газообразные продукты выводились из реактора в систему охлаждения отходящих газов 5, а конденсированные продукты накапливались



**Рис. 6.** Схема экспериментальной установки для плазменной газификации МСО: 1 – патрубок для загрузки брикетированных отходов в реактор; 2 – плазменный реактор; 3 – электродуговой плазмотрон постоянного тока; 4 – зона газификации отходов; 5 – блок охлаждения отходящих газов; 6 – блок газоочистки с рукавным фильтром; 7 – секция с системой отбора проб и измерения температуры газа; 8 – вытяжной вентилятор; 9 – вентиляционная труба.

на дне реактора (рис. 6). Совмещение зоны тепловыделения от плазмотрона с зоной газификации МСО 4 и зоны шлакообразования способствовало интенсификации переработки отходов. Охлажденные газообразные продукты поступали в блок газоочистки с рукавным фильтром 6, после чего газ через секцию с системой отбора проб и измерения температуры газа 7 направлялся в газоанализатор. Вытяжной вентилятор 8 обеспечивал разрежение в реакторе до 10 мм водяного столба. Известно, что для полного разложения диоксинов, газ необходимо в течение двух секунд выдержать при температуре не ниже 1500 К [17]. В плазменном реакторе такая температура обеспечивалась за счет факела от плазмотрона 3 (рис. 5).

Газообразные продукты переработки МСО анализировались с помощью газового хроматографа «Хроматэк-Газохром-2000». Этот хроматограф анализирует 6 компонентов ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$ ) с относительной погрешностью до 5%. Рентгенофазовый анализ образцов конденсированной фазы проводился на установке ДРОН-3.

При плазменной газификации МСО в качестве газифицирующего агента использовался плазмообразующий воздух с расходом 12 кг/ч. Плазмотрон работал на мощности 72 кВт. Через 15 минут предварительного нагрева реактора 20 брикетов МСО были последовательно загружены в реактор через патрубок для загрузки брикетированных отходов. Общая масса брикетов составила 8 кг. Под действием плазменно-воздушного факела средне-массовая температура в реакторе достигала 1600 К. В результате органическая масса МСО подверглась газификации, а неорганическая – плавле-

нию с последующим накоплением расплава на дне реактора. Полученный синтез-газ непрерывно выводился из реактора через системы его охлаждения и очистки. Шлак удаляли из реактора после выключения плазмотрона и охлаждения реактора.

По результатам экспериментального исследования процесса плазменной газификации МСО определены режимы работы плазмохимического реактора, проведен анализ отходящих газов, получены образцы конденсированных продуктов, отводимых из зоны шлакообразования реактора, и определено остаточное содержание углерода в шлаке. Состав газа на выходе из реактора представлен в таблице 2. Суммарная концентрация синтез-газа составила 71,1 об. %, что удовлетворительно согласуется с термодинамическими расчетами. Расчетный выход синтез-газа при температуре 1600 К составил 82,4 об. % ( $CO$  – 31,7,  $H_2$  – 50,7). Таким образом, расхождение эксперимента с расчетом по целевому продукту (синтез-газу) не превышало 16 %. Расхождение в концентрациях  $CO$  и  $H_2$  связано с невозможностью достижения термодинамического равновесия в эксперименте. Метод абсорбции и взвешивания был использован для оценки содержания остаточного углерода в образцах шлака. Концентрация углерода в шлаке составила 2,8 мас. %, что соответствует степени газификации углерода МСО 91,8%. Расхождение экспериментальной и расчетной степени газификации углерода не превышает 9%. Несоответствие расчетных и опытных концентраций конденсированных компонентов связано с невозможностью достижения термоди-

**Таблица 1.** Сравнение результатов эксперимента и расчета по плазменной переработке МСО

Метод	CO, об. %	H <sub>2</sub> , об. %	N <sub>2</sub> , об. %	Fe <sub>3</sub> C, мас. %	CaSiO <sub>3</sub> , мас. %	SiO <sub>2</sub> , мас. %	Fe, мас. %	XC, %	Q <sub>SP</sub> , кВт·ч/кг
Эксперимент	26,5	44,6	28,9	63,0	21,0	13,0	3,0	91,8	3,3
Расчет	31,7	50,7	15,4	22,4	40,1	28,5	9,0	100	2,2

**Таблица 3.** Энергетический баланс, МДж/ч

	Ввод		Вывод
Электрическая мощность плазмотрона	259,2	Теплота сгорания полученного газа	337,6
Теплота сгорания ОКО	234,3	Физическое тепло полученного газа	92,4
Физическое тепло плазмообразующего газа	3,6	Физическое тепло шлака	1,1
		Теплопотери	64,8
Всего	4971	Всего	495,9

намического равновесия в эксперименте. По данным газового и рентгеноструктурного анализов вредных примесей в газообразных и конденсированных продуктах плазменной газификации МСО не обнаружено.

Удельные энергозатраты на процесс газификации МСО в плазмохимическом реакторе составили 3,3 кВт·ч/кг. В расчетах удельные энергозатраты при температуре 1600 К составляли 2,2 кВт·ч/кг МСО. Различие между расчетными и экспериментальными значениями удельных энергозатрат в процесс можно объяснить тем, что в термодинамических расчетах минимально возможные энергозатраты в изолированной термодинамической системе определяются без учета обмена теплом и работой с окружающей средой. На практике плазмохимический реактор и плазмотрон являются водоохлаждаемыми устройствами и поэтому характеризуются заметными тепловыми потерями в окружающую среду с охлаждающей водой.

Тепловой и материальный баланс реактора позволил составить энергетический баланс процесса (таблица 3). Основная часть вырабатываемой энергии – это теплота сгорания полученного топливного газа (68%), в то время как его физическое тепло составляет 19%. 52% поступающей энергии – это электрическая энергия плазмотрона. Процесс плазменной газификации МСО характеризуется высоким общим тепловым КПД (86,5%). Невязка энергетического баланса не превышает 1%.

Плазменная газификация МСО показывает более высокую энергоэффективность плазменной технологии по сравнению с обычным их сжига-

нием. При сжигании МСО образуется инертный газ (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и N<sub>2</sub>) с физической теплотой 145 МДж/ч. В результате плазменной газификации МСО получается топливный газ с тепловой мощностью 430 МДж/ч. Таким образом, полезная тепловая мощность продуктов плазменной газификации в три раза выше, чем при сжигании МСО.

На рисунке 7 показан плазмохимический реактор с поднятой крышкой и плазменным факелом на выходе плазмотрона. В результате плазменной газификации МСО был получен горючий газ, факел которого на выходе из специального патрубка, при снижении разрежения в реакторе, показан на рисунке 8. Видно, что полученный газ интенсивно воспламеняется на воздухе, формируя устойчивый яркий факел. Измеренная платиного-

**Рис. 7.** Работающий плазмотрон в плазмохимическом реакторе с поднятой крышкой.



Рис. 8. Факел горячего газа на выходе из специального патрубка.

дией термпарой ППР6/30 температура факела составляла 1600 К. Отметим, что максимальная температура футеровки донной части реактора в процессе переработки МСО, измеренная цифровым пирометром через патрубок 1 (рис. 6), достигала 1887 К. Плазмотрон отключали через 25 мин. после загрузки первого брикета МСО. За это время газифицировали 20 брикетов общей массой 8 кг, что соответствовало производительности реактора 19,2 кг/ч.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены термодинамические расчеты и экспериментальные исследования плазменной газификации углеродсодержащих отходов на примере токсичных медико-санитарных отходов, показавшие перспективность использования плазмохимического реактора для переработки отходов с получением горячего газа и инертного минерального материала.

В процессе плазменно-воздушной газификации МСО при оптимальной температуре 1600 К получен синтез-газ с концентрацией 71,1 об. % ( $H_2$  – 44,6,  $CO$  – 26,5) и твердый инертный остаток светло-серого цвета. Сравнение плазменной газификации и обычного сжигания МСО показывает более высокую энергоэффективность плазменной технологии. В результате плазменной газификации МСО получается горячий газ с тепловой мощностью 430 МДж/ч. При сжигании МСО образуется инертный газ ( $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $N_2$ ) с физической теплотой 145 МДж/ч. Таким образом, полезная тепловая мощность продуктов плазменной

газификации в три раза выше, чем при сжигании МСО.

Как в расчетах, так и в экспериментах, вредных примесей в продуктах воздушно-плазменной газификации МСО обнаружено не было, что подтверждает экологическую эффективность плазменной технологии переработки УСО.

#### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проектам грантового финансирования (AP19674754, AP14870548, AP14869881, BR18574084).

#### Список литературы

- [1]. Davidson G. Waste Management Practices: Literature Review. – Dalhousie University: Office of Sustainability, 2011. – 59 p.
- [2]. Heberlein J., Murphy A.B. Topical review: Thermal plasma waste treatment. *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2008. – Vol.41, N 5. – P. 053001 (20 p).
- [3]. Messerle V.E., Mosse A.L., Ustimenko A.B. Processing of biomedical waste in plasma gasifier. *Waste Management*. – 2018. – Vol.79. – P. 791-799.
- [4]. Mourão R., Marquesi A.R., Gorbunov A.V., Filho G.P., Halinouski A.A., Otani C. Thermochemical Assessment of Gasification Process Efficiency of Biofuels Industry Waste with Different Plasma Oxidants. *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2015. – Vol.43, No.10. – P. 3760-3767.
- [5]. Surov A. V., Popov S. D., Popov V.E., Subbotin D. I., Serba E. O., Spodobin V. A., Nakonechny G. V., Pavlov A. V.. Multi-gas AC plasma torches for gasification of organic substances. *Fuel*. – 2017. – Vol. 203. – P. 1007-1014.
- [6]. An'shakov A.S., Faleev V.A., Danilenko A.A., Urbakh E.K., Urbakh A.E. Investigation of plasma gasification of carbonaceous technogeneous wastes. *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2007. – Vol. 14, No. 4. – P. 607-616.
- [7]. Messerle V.E., Mosse A.L., Ustimenko A.B. Plasma gasification of carbonaceous wastes: thermodynamic analysis and experiment. *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2016. – Vol. 23, No.4. – P. 613-620.
- [8]. Galvita V., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Hydrogen production by coal plasma gasification for fuel cell technology. *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2007. – Vol.32, No.16. – P. 3899-3906.
- [9]. Русаков Н.В., Щербо А.П., Мироненко О.В. Обращение с медицинскими отходами: идеология, гигиена и экология. *Экология человека*. – 2018. – Том 25, №7. – С. 4-10.

- [10]. Моссэ А.Л., Савчин В.В. Плазменные технологии и устройства для переработки отходов. – Минск: Беларуская навука, 2015. – 411 с. ISBN 978-985-08-1856-0
- [11]. Byun Youngchul, Cho Moohyun, Hwang Soon-Mo, Chung Jaewoo. Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW) / Gasification for Practical Applications, Dr. Yongseung Yun (Ed.). – 2012. – ISBN:978-953-51-0818-4, InTech. P. 183-210.
- [12]. Messerle V. E., Mosse A.L., Nikonchuk A.N., Ustimenko A. B. Plasmachemical Processing of Medicobiological Wastes. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2015. – Vol. 88, Issue 6. – P. 1471-1475.
- [13]. 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. *Journal of the Energy Institute*. – 2005. – Vol. 78, No. 4. – P. 157-171.
- [14]. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Solid Fuel Plasma Gasification. In: Syred N. and Khalatov A. (eds.) *Advanced Combustion and Aerothermal Technologies*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 2007. – P.141-156.
- [15]. Golish V.I., Karpenko E.I., Luk'yashchenko V.G., Messerle V.E., Ustimenko A.B., Ushanov V.Zh. Long-Service-Life Plasma Arc Torch. *High Energy Chemistry*. – 2009. – V. 43, No. 4. – P. 318-323.
- [16]. Messerle V.E., Mosse A.L., Ustimenko A.B. Municipal Solid Waste Plasma Processing: Thermodynamic Computation and Experiment. *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2016. – Vol. 44, No. 12. – P. 3017-3022.
- [17]. Zhdanok S.A., Mosse A.L. Plasma methods for Toxic Wastes Processing, in: Güçeri S., Fridman A., Gibson K., Haas C. (Eds) *Plasma Assisted Decontamination of Biological and Chemical Agents*. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. Springer, Dordrecht, 2008. – P.143-149.
- Pavlov AV (2017) *Fuel* 203:1007-1014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.02.104>
- [6]. An'shakov AS, Faleev VA, Danilenko AA, Urbakh EK, Urbakh AE (2007) *Thermophysics and Aeromechanics* 14(4):607-616. <https://doi.org/10.1134/S0869864307040105>
- [7]. Messerle VE, Mosse AL, Ustimenko AB (2016) *Thermophysics and Aeromechanics* 23(4):613-620. <https://doi.org/10.1134/S0869864316040144>
- [8]. Galvita V, Messerle VE, Ustimenko AB (2007) *International Journal of Hydrogen Energy* 32(16):3899-3906. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.05.039>
- [9]. Rusakov NV, Shcherbo AP, Mironenko OV (2018) *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)* 25(7):4-10. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2018-7-4-10> (in Russian)
- [10]. Mosse AL, Savchin VV (2015) Plasma technologies and devices for waste processing [Plazmennyye tehnologii i ustroystva dlya pererabotky othodov]. *Belaruskaya navuka, Minsk*, 411 p. (in Russian)
- [11]. Byun Y, Cho M, Hwang Soon-Mo, Chung J (2012) *Gasification for Practical Applications*, Dr. Yongseung Yun (Ed.). InTech. 183-210. <http://dx.doi.org/10.5772/48537>
- [12]. Messerle VE, Mosse AL, Nikonchuk AN, Ustimenko AB (2015) *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 88(6):1471-1475. <https://doi.org/10.1007/s10891-015-1332-1>
- [13]. Gorokhovski M, Karpenko EI, Lockwood FC, Messerle VE, Trusov BG, Ustimenko AB (2005) *Journal of the Energy Institute* 78(4):157-171. <https://doi.org/10.1179/174602205X68261>
- [14]. Messerle VE, Ustimenko AB (2007) In: Syred N. and Khalatov A. (eds.) *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. Springer, Dordrecht. 141-156. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6515-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6515-6_12).
- [15]. Golish VI, Karpenko EI, Luk'yashchenko VG, Messerle VE, Ustimenko AB, Ushanov VZh (2009) *High Energy Chemistry* 43(4):318-323. <https://doi.org/10.1134/S0018143909040134>
- [16]. Messerle VE, Mosse AL, Ustimenko AB (2016) *IEEE Transactions on Plasma Science* 44(12):3017-3022. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2601107>
- [17]. Zhdanok SA, Mosse AL (2008) In: Güçeri S., Fridman A., Gibson K., Haas C. (Eds) *NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*. Springer, Dordrecht 143-149. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8439-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8439-3_12)

## Reference

- [1]. Davidson G (2011) *Waste Management Practices: Literature Review*. Dalhousie University: Office of Sustainability. 59 p.
- [2]. Heberlein J, Murphy AB (2008) *Journal of Physics D: Applied Physics* 41(5):053001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/5/053001>
- [3]. Messerle VE, Mosse AL, Ustimenko AB (2018) *Waste Management* 79:791-799. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.048>
- [4]. Mourão R, Marquesi AR, Gorbunov AV, Filho GP, Halinouski AA, Otani C (2015) *IEEE Transactions on Plasma Science* 43(10):3760-3767. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2416129>
- [5]. Surov AV, Popov SD, Popov VE, Subbotin DI, Serba EO, Spodobin VA, Nakonechny GV,

## Gasification of carbon-containing waste in a plasma-chemical reactor

V.E. Messerle<sup>1,2,3</sup>, M.N. Orynbasar<sup>1,3,4</sup>,  
K.A. Umbetkaliyev<sup>1,3,4</sup>, A.B. Ustimenko<sup>1,4,5\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Combustion Problems, 172, Bogenbai batyr str., Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Experimental and Theoretical Physics, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Al-Farabi Kazakh National University, 71, Al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

<sup>4</sup>NPTC “Zhalyn”, Pavlodarskaya str., 11, Almaty, Kazakhstan

<sup>5</sup>National Nano Laboratory of Open Type, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan

### ABSTRACT

The results of thermodynamic calculations and experiments on plasma gasification of solid carbon-containing wastes are presented using the example of medical and sanitary wastes, which showed the promise of using the plasma-chemical waste processing technology to produce combustible gas and inert mineral material. The TERRA universal computer program for calculating multicomponent heterogeneous systems was used for thermodynamic calculations. Its base of thermodynamic properties contains about 3000 substances in the temperature range of 300–6000 K. The optimum waste gasification temperature  $T = 1600$  K is found, at which the maximum concentration of synthesis gas of 82.6 vol.% ( $\text{CO} - 31.7$ ,  $\text{H}_2 - 50.9$ ) is reached. The experiments were carried out in a plasma-chemical reactor equipped with a 70 kW plasma torch with waste capacity of up to 30 kg/h. In the process of plasma-air gasification of medical-sanitary waste at 1600 K, synthesis gas was obtained with concentration of 71.1 vol.% ( $\text{H}_2 - 44.6$ ,  $\text{CO} - 26.5$ ) and a light gray solid inert residue. Comparison of plasma gasification and conventional waste incineration methods shows the higher energy efficiency of plasma technology. As a result of plasma gasification of waste, a combustible gas with thermal power of 430 MJ/h is obtained. When they are burned, an inert gas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ ) is formed with physical heat of 145 MJ/h. Thus, the useful thermal power of plasma gasification products is three times higher than that at waste incineration. Comparison of the results of the experiment and calculations showed their satisfactory agreement. Both in calculations and in experiments, no harmful impurities were found in the products of plasma gasification of waste.

*Keywords:* waste, gasification, plasma-chemical reactor, synthesis gas, thermodynamic calculation, experiment.

### Плазмохимиялық реакторда көміртек құрамды қалдықтарды газификациялау

В.Е. Мессерле<sup>1,2,3</sup>, М.Н. Орынбасар<sup>1,3,4</sup>,  
К.А. Умбеткалиев<sup>1,3,4</sup>, А.Б. Устименко<sup>1,4,5\*</sup>

<sup>1</sup>Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі, 172, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Эксперименттік және теориялық физика ғылыми-зерттеу институты, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

<sup>4</sup>Ғылыми өндірістік-техникалық орталық «Жалын», Павлодарская көшесі, 11, Алматы, Қазақстан

<sup>5</sup>Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертханасы, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

### АНДАТПА

Медициналық-санитарлық қалдықтар мысалында, көміртек құрамды қатты қалдықтардың плазмалық газификациясының термодинамикалық есептеулер мен эксперименттерді нәтижелері ұсынылған, олар жанғыш газ және инертті минералды материал алу үшін қалдықтарды плазмохимиялық қайта өңдеу технологиясын пайдаланудың перспективтілігін көрсетті. Термодинамикалық есептеулерді орындау үшін, 300–6000 К температура аралығындағы 3000-ға жуық заттардың термодинамикалық қасиеттеріне негізделген көпкомпонентті гетерогенді жүйелерді есептеуге арналған TERRA әмбебап бағдарламасы қолданылды. Қалдықтарды газификациялаудың  $T=1600$  К құрайтын оңтайлы температурасы табылды, бұл кезде синтез-газдың максимальды концентрациясы 82.6 көл.%-ға дейін өсті ( $\text{CO} - 31.7$ ,  $\text{H}_2 - 50.9$ ). Эксперименттер қуаттылығы 70 кВт плазмотронмен жабдықталған және өнімділігі 30 кг/сағ дейін плазмохимиялық реакторда жүргізілді. Медициналық-санитарлық қалдықтарды плазмалы-ауа газификация нәтижесінде 1600 К температурада синтез-газдың концентрациясы 71.1 көл.% құрады ( $\text{H}_2 - 44.6$ ,  $\text{CO} - 26.5$ ) және инертті қатты сұр түсті қалдық пайда болды. Қалдықтарды плазмалық газификациялау мен қарапайым өрттеуді салыстырғанда, плазмалық технология жоғары энерготиімділігін көрсетеді. Қалдықтарды плазмалық газификациялау нәтижесінде жылулық қуаттылығы 430 МДж/с құрайтын

жанғыш газ алынады. Оларды өртеу кезінде физикалық жылулығы 145 МДж/с бөлінетін инертті газ түзіледі ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ ). Сонымен, плазмалық газификация өнімдерінің пайдалы жылу қуаты, қалдықтарды өртеуге қарағанда үш есе жоғары. Эксперимент және есептеулердің нәтижелерін салыстыруы, олардың қанағаттанарлық сәйкесті-

гін көрсетті. Есептеулерде де, эксперименттерде де қалдықтарды плазмалық газификациялаудың өнімдерінде зиянды қоспалар табылған жоқ.

*Түйінді сөздер:* қалдықтар, газификация, плазмохимиялық реактор, синтез-газ, термодинамикалық есептеу, эксперимент.