

**The Ministry of Education & Science of the Republic of Kazakhstan  
Қазақстан Республикасы Білім және Ғылым Министрлігі  
Министерство Образования и Науки Республики Казахстан**

**al-Farabi Kazakh National University  
әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті  
Казахский национальный университет им. аль-Фараби**

**The Institute of Combustion Problems/Committee of science MES RK  
Институт проблем горения/Комитет науки МОН РК  
Жану проблемаларының институты/ҚР БҒМ Ғылым комитеті**

\*\*\*\*\*



**IX International Symposium  
« Combustion and Plasmochemistry»  
13-15 september 2017**

**IX халықаралық симпозиумы  
«Жану және плазмалық химия»  
13-15 қыркүйек 2017**

**IX Международный Симпозиум  
«Горение и плазмохимия»  
13-15 сентября 2017**

Алматы, 2017

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

**В.Е. Мессерле<sup>1</sup>, А.Л. Моссэ<sup>2</sup>, А.Б. Устименко<sup>3</sup>, Р.В. Баймулдин<sup>3</sup>, К.А. Умбеткалиев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт проблем горения МОН РК, КазНУ им. аль-Фараби, Республика Казахстан*

*Email: [ust@physics.kz](mailto:ust@physics.kz)*

<sup>2</sup> *Институт тепло-массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси, Республика Беларусь*

*Email: [mosse@itmo.by](mailto:mosse@itmo.by)*

<sup>3</sup> *НИИ экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби,*

*ТОО «НТО Плазмотехника», Республика Казахстан,*

*Email: [ust@physics.kz](mailto:ust@physics.kz)*

### Аннотация

В настоящей работе представлены результаты термодинамического анализа и экспериментов по получению высококалорийного синтез-газа плазменной газификацией углеродсодержащих твердых отходов (УТО). Максимальный выход синтез-газа при плазменной газификации УТО в воздушной и паровой средах достигается при температуре 1600К. При воздушно-плазменной газификации УТО может быть получен высококалорийный синтез-газ с концентрацией 82.4% (СО – 31.7%, Н<sub>2</sub> – 50.7%), а при паро-плазменной газификации - с концентрацией 94.5% (СО – 33.6%, Н<sub>2</sub> – 60.9%). Удельная теплота сгорания синтез-газа, полученного при воздушной газификации составляет 3410 ккал/кг, а при паровой – 4640 ккал/кг. При оптимальной температуре (1600 К) удельные энергозатраты на воздушную газификацию УТО составляют 1.92 кВт ч/кг, а на паровую газификацию – 2.44 кВт ч/кг. Этот высококалорийный газ может быть использован в качестве рабочего тела газо-турбинных и газо-поршневых установок для генерирования электроэнергии.

Проблема переработки и уничтожения углеродсодержащих твердых отходов (УТО) различного происхождения, включая медико-биологические, продолжает оставаться весьма актуальной. Плазменная газификация является наиболее перспективной технологией переработки УТО [1-4]. В настоящей работе представлены результаты термодинамического расчета и экспериментов по получению высококалорийного синтез-газа плазменной газификацией УТО. Характерный состав УТО: бумага и картон - 36%, пищевые отходы - 21%, стекло - 2%, железо и его оксиды – 3%, пластмассы - 13%, древесина - 5%, резина, кожа и другие горючие вещества - 16%, текстиль - 2%, карбонат кальция - 2%.

Расчеты плазменной газификации УТО выполнены с использованием программы TERRA, для следующих составов исходной технологической смеси: 1) 10 кг УТО + 4 кг воздуха; 2) 10 кг УТО + 1 кг водяного пара.

На рис. 1 показано изменение концентраций газообразных компонентов в зависимости от температуры воздушной и паровой газификации УТО. В обоих случаях с увеличением температуры концентрация синтез-газа (СО+Н<sub>2</sub>) увеличивается до максимального значения при температуре Т=1600 К. При воздушной газификации МБО максимальная концентрация синтез-газа достигает 82.4% (СО – 31.7%, Н<sub>2</sub> – 50.7%), а при паровой газификации – 94.5% (СО – 33.6%, Н<sub>2</sub> – 60.9%). Концентрация окислителей (СО<sub>2</sub>+Н<sub>2</sub>О) при этой температуре не превышает 0.15% (рис. 1 а, б). При дальнейшем повышении температуры концентрация синтез-газа незначительно снижается в связи с появлением в газовой фазе атомарного водорода (Н), концентрация которого достигает 10.3% при воздушной и 11.3% при паровой газификации МБО (Т=3000 К). Концентрация балластирующего газа азота (N<sub>2</sub>) остается

практически постоянной в температурном интервале 1200 – 3000 К, составляя 15% (рис. 1 а) и 3.4% (рис. 1 б). Концентрация хлористого водорода (HCl) мало изменяется в рассматриваемом интервале температур, варьируясь от 1.2 до 1.6% в обоих процессах. До температуры  $T=1900$  К сера представлена сероводородом ( $H_2S$ ), который при повышении температуры диссоциирует на серу (S) и атомарный водород (H). При температуре выше 1600 К в газовой фазе появляется хлорид кальция ( $CaCl_2$ ), железо (Fe), оксид кремния ( $SiO$ ) и хлор (Cl) с суммарной концентрацией менее 1%. Из сравнения рис. 1 а и 1 б следует, что при паровой газификации концентрация синтез-газа выше на 12.1%, а концентрация балластирующего газа азота меньше на 11.6%.

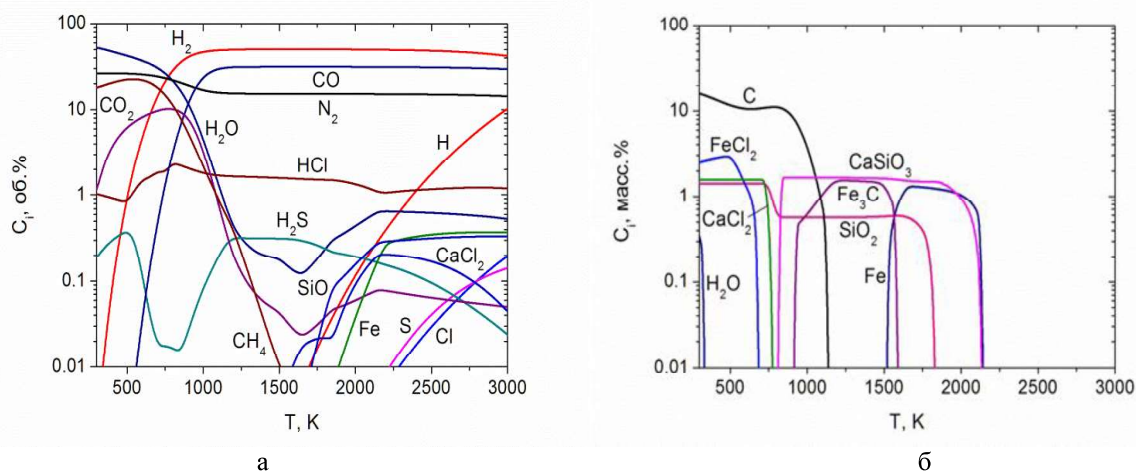


Рис. 1 – Изменение концентраций компонентов газовой фазы в зависимости от температуры процесса воздушной (а) и паровой (б) газификации УТО

Удельные энергозатраты на процесс газификации УТО возрастают с ростом температуры во всем расчетном диапазоне. При этом удельные энергозатраты на паровую газификацию УТО превышают таковые на воздушную газификацию во всем диапазоне температур. Для оптимальной температуры ( $T=1600$  К), при которой достигается максимальный выход синтез-газа (рис. 1), удельные энергозатраты на воздушную газификацию УТО составляют 1.92 кВт ч/кг, а на паровую газификацию – 2.44 кВт ч/кг. При воздушно-плазменной газификации УТО может быть получен высококалорийный синтез-газ с концентрацией 82.4% ( $CO - 31.7\%$ ,  $H_2 - 50.7\%$ ), а при паро-плазменной газификации - с концентрацией 94.5% ( $CO - 33.6\%$ ,  $H_2 - 60.9\%$ ). Удельная теплота сгорания синтез-газа, полученного при воздушной газификации составляет 3280 ккал/кг, а при паровой – 3530 ккал/кг. Этот высококалорийный газ может быть использован в качестве рабочего тела газо-турбинных и газо-поршневых установок для генерирования электроэнергии. Отметим, что в газообразных и конденсированных продуктах плазменной газификации УТО отсутствуют вредные примеси.

Найденные параметры и выявленные закономерности процесса плазменной газификации УТО в различных газифицирующих агентах были использованы для разработки экспериментальной плазменной установки.

Экспериментальные исследования газификации УТО выполнены на установке, основными элементами которой являются высокоресурсный плазмотрон постоянного тока номинальной мощностью 70 кВт и реактор периодического действия производительностью по УТО до 30 кг/ч [5]. Процесс плазменной газификации брикетированных или пакетированных отходов осуществляется в реакторе при среднемассовой температуре до

1600 К. В состав экспериментальной установки (рис. 2) кроме реактора 3 с плазмотроном 4 входят системы электроснабжения и управления плазмотроном, а также системы газо- и водоснабжения реактора с плазмотроном, и система очистки отходящих газов 7. Установка снабжена системой отбора газообразных 8 и конденсированных продуктов 10 процесса газификации УТО для проведения их анализа.

Время полного цикла переработки УТО составляет 30 мин. В качестве газифицирующего агента использовался плазмообразующий газ - воздух с расходом 12 кг/ч. Под воздействием воздушного плазменного факела органическая часть УТО газифицировалась, а неорганическая часть плавилась и скапливалась в зоне шлакообразования реактора.

Получен газ следующего состава, об. %: CO – 26.5, H<sub>2</sub> – 44.6, N<sub>2</sub>–28.9. Расхождение между экспериментом и расчетом по составу синтез-газа не превышает 16%. В газообразных и конденсированных продуктах плазменной газификации УТО вредных примесей не выявлено.

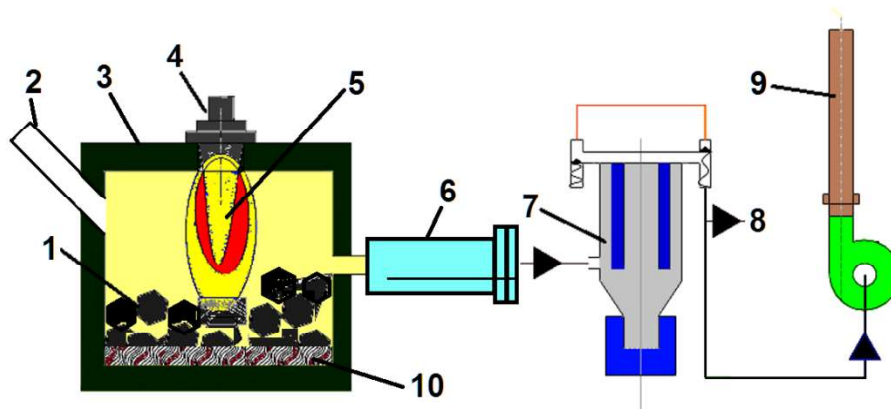


Рис. 2 – Принципиальная схема экспериментальной установки для плазменной газификации УТО: 1 – зона газификации МБО, 2 – патрубок для подачи брикетированных или пакетированных отходов, 3 – реактор, 4 - электродуговой плазмотрон, 5 – плазменный факел, 6 – блок охлаждения отходящих газов, 7 – блок газоочистки с рукавным фильтром, 8 – система отбора газа на анализ, 9 – система вытяжной вентиляции, 10 – зона шлакообразования.

Экспериментально установлено, что в плазменном реакторе камерного типа при оптимальной температуре удельные энергозатраты на воздушную газификацию УТО составляют 1.92 кВт ч/кг, а на паровую газификацию – 2.44 кВт ч/кг.

Технология плазмохимической газификации углеродсодержащих отходов и установка для ее реализации представлены на ЭКСПО-2017 (Астана) [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Соглашению о субсидии N14.607.21.0118 (уникальный идентификатор проекта RFMEF160715X0118) и Министерства образования и науки Республики Казахстан (3078/ГФ4 и 0071/ПЦФ)

### **Литература**

1. В.Е. Мессерле, А.Л. Моссэ, А.Н. Никончук, А.Б. Устименко. Плазмохимическая переработка медико-биологических отходов // Инженерно-физический журнал. - 2015. - Т. 88, № 6. - С. 1420-1425.

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

3. 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. - P.143 – 149.

4. Мессерле В.Е., Моссэ А.Л., Устименко А.Б. Плазменная газификация углеродсодержащих отходов: термодинамический анализ и эксперимент. // Теплофизика и аэромеханика. - 2016. – Т. 23, № 4.

5. Мессерле В.Е., Моссэ А.Л., Устименко А.Б. Плазмохимическая переработка углеродсодержащих отходов с получением энергетического газа. Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации: материалы Всемирного Конгресса инженеров и ученых (19-20 июня, 2017, Астана, Казахстан). Под общ. ред. акад. Н.А. Абыкаева, Б.Т. Жумагулова. - Т.2. – Алматы, 2017. С.226-233.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА**

**А.В. Байков<sup>1,2</sup>, П.Д. Токталиев<sup>1,2</sup>, М.С. Шаров<sup>1,2</sup>, Л.С. Яновский<sup>1,2</sup>, И.С. Аверьков<sup>1</sup>,  
Е.В. Суриков<sup>1</sup>, Н.И. Олесова<sup>1</sup>, В.А. Струнин<sup>2</sup>, А.В. Шиховцев<sup>2</sup>, Пучковский<sup>2</sup> И.В.**

<sup>1</sup>-101116, г. Москва, Авиамоторная ул. д.2., Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»

<sup>2</sup>-142432, М.О., г. Черноголовка, Проспект академика Семенова, д. 1, Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки «Институт проблем химической физики»

В докладе исследуются особенности рабочего процесса в твердотопливных газогенераторах, заряд которых содержит значительное количество металлических частиц. Показано что наличие металлических частиц в твердом топливе делает процесс горения неравновесным, как в конденсированной, так и в газовой фазе. Предложен подход к формированию методики расчета рабочего процесса с учетом возникновения неравновесности и приводятся результаты экспериментальных исследований модельного газогенератора, показывающие, что предлагаемый подход обеспечивает удовлетворительное совпадение с результатами проведенного эксперимента по всем основным параметрам.

Низкотемпературные газогенераторы, работающие на твердом топливе, находят множество применений в современной промышленности и энергетике. Они используются как автономные источники газа в противопожарных системах, для заполнения подушек безопасности и аварийных трапов, служат источниками кислорода в аварийных авиационных дыхательных системах [1- 3]. Имеется опыт по успешному использованию низкотемпературных газогенераторов для запуска поршневых и газотурбинных двигателей в условиях экстремально низких внешних температур. В ряде случаев, твердотопливные газогенераторы используются в качестве источника газа, служащего как топливо, для авиационных двигателей и энергетических установок [4 - 6]. Поскольку вырабатываемый газогенератором газ, как правило, поступает в некую техническую систему, то температура газа должна быть ограничена допустимыми этой системы рамками. Для получения газа с