

УДК 662.675+621.365.91

ПЛАЗМЕННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

А. С. Аньшаков, П. В. Домаров, Е. Б. Бутаков

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск
Domaroff@yandex.ru, Anshakov@itp.nsc.ru

Приведены результаты расчетно-экспериментального исследования электроплазменной газификации техногенных углеродсодержащих отходов с целью получения высококалорийного синтез-газа ($H_2 + CO$) для энергогенерирующих устройств. Экспериментально определен состав синтез-газа, получаемого в процессе газификации органических отходов. Исследовано изменение состава и калорийности синтез-газа в зависимости от времени газификации органических материалов. Показано изменение калорийности синтез-газа в процессе газификации отходов.

Ключевые слова: плазмотрон, плазменная газификация, медицинские материалы, уничтожение отходов, синтез-газ.

DOI 10.15372/FGV20220412

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перед человечеством стоит ряд экологических проблем. Важное место занимает обезвреживание и уничтожение техногенных образований и отходов. Количество отходов увеличивается год от года с изменением экономических, социальных и техногенных условий жизни человека. Одним из видов техногенных отходов являются медико-биологические отходы и материалы. Их утилизация приобрела особую актуальность в связи с пандемией COVID-19. Существенно возросло количество использованных одноразовых медицинских масок и медицинской одежды. Согласно законодательству России все медицинские отходы подлежат обязательному уничтожению, безопасному для окружающей среды.

Термические методы, в том числе сжигание медицинских отходов и материалов, не дают полного разложения сложных химических элементов на простые соединения, так как уровень температуры в таких технологиях не превышает $800 \div 850^\circ C$. Оптимальной по безопасности, производительности и эффективности является электроплазменная технология, но пока ее применение ограничено из-за высоких экс-

плуатационных затрат. При их снижении плазменная установка могла бы использоваться для утилизации, газификации или уничтожения отходов различного морфологического состава.

Отличительной особенностью плазменной газификации является наличие в составе газификатора электродугового генератора плазмы — плазмотрона, который позволяет нагревать газ до нескольких тысяч градусов. Повышение среднемассовой температуры в реакционной зоне газификатора в пределах $1200 \div 1400^\circ C$ создает условия для разложения опасных химических соединений. Например, для разложения диоксинов требуется температура $\approx 1300^\circ C$ в течение 2 с. Для получения расплава инертного шлака из неорганической части отходов (золошлаковых образований) необходимы температуры $1300 \div 1600^\circ C$ и более [1].

Использование плазменной технологии для переработки, обезвреживания и уничтожения опасных медицинских материалов требует проведения комплекса испытаний энергоэффективной и экологически безопасной электроплазменной установки на экспериментальном стенде с целью определения наилучших технологических параметров: состава отходящих газов, зависимости их от температуры в камере плазменной электропечи, калорийности синтез-газа и др.

Работа выполнена при содействии Министерства науки и высшего образования РФ (номер гос. регистрации 121031800229-1).

© Аньшаков А. С., Домаров П. В., Бутаков Е. Б., 2022.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

При решении проблемы газификации (утилизации или уничтожения) отходов необходимо исходить из того, что это целый комплекс экологических и энергетических задач, связанный одновременно с использованием этих отходов как постоянно возобновляемого энергетического сырья. На рис. 1 показаны результаты расчета теплоты сгорания бытовых отходов, бурых углей и другого топлива в зависимости от содержания в них углерода и водорода [2].

Для расчета энергетических характеристик отходов используется вещественный состав, т. е. основные химические элементы, входящие в органические отходы в осредненном для данной местности виде: углерод, водород, кислород, азот, сера, вода (влаги), зола.

Точно такой же набор элементов имеет любое другое твердое органическое топливо. Из рис. 1 видно, что теплота сгорания бурых углей и органических отходов линейно зависит от массовой доли углерода и водорода, причем ТБО7–ТБО10 оказываются лучше по теплоте сгорания, чем бурые угли У5 (Морозовский разрез) и У6 (Головковский разрез).

Исследования проводились на экспериментальной плазменной установке производительностью 20 кг/ч для твердых коммунальных

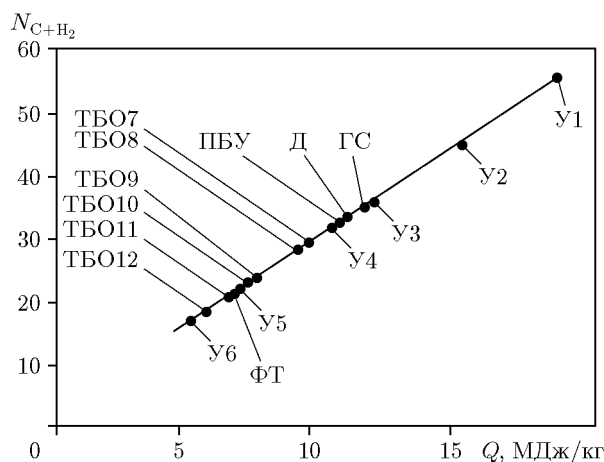


Рис. 1. Зависимость теплоты сгорания различных видов топлива от массовой доли углерода и водорода:

У1–У3 — угли Канско-Ачинского бассейна, У4–У6 — угли Днепровского бассейна, ТБО7–ТБО12 — органические отходы различных регионов: Канада, США, Нидерланды, Москва, Мадрид, Екатеринбург соответственно, ПБУ — подмосковный бурый уголь, ФТ — фрезерный торф, Д — дрова, ГС — горючие сланцы

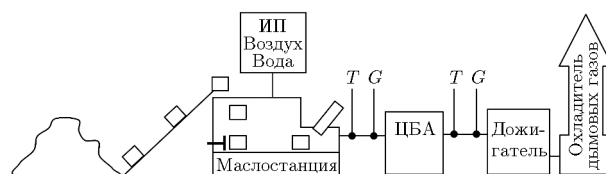


Рис. 2. Схема плазменно-термической установки:

ИП — источник питания, ЦБА — центробежный барботажный аппарат

отходов осредненного состава. Схема установки представлена на рис. 2. Водоохлаждаемый корпус установки изготовлен из листовой стали, внутренняя стенка корпуса выполнена из огнеупорных и теплоизоляционных материалов. Внутренняя камера плазменно-термической электропечи имеет две соединенные между собой камеры: камера плавления объемом 0.074 м³ с плазмотроном мощностью 50 кВт и камера газификации объемом 0.11 м³.

В камере газификации печи температура составляет 1 300 ÷ 1 500 °С. Такой уровень температуры достигается благодаря использованию электродугового плазмотрона мощностью 20 ÷ 50 кВт.

В камеру газификации через загрузочное устройство подаются порции упакованного перерабатываемого материала. Загрузочное устройство выполняет также функцию шлюзовой камеры, предотвращая попадание атмосферного воздуха в камеру газификации и выхода дымовых газов в атмосферу из камеры при появлении избыточного давления в процессе переработки отходов. Прогрев рабочей камеры плазменной электропечи и футеровки производится электродуговым плазмотроном. Среднемассовая температура воздушной плазмы, истекающей из плазмотрона, составляет 4 000 К. Выделяющийся в зоне газификации горючий синтез-газ поступает в блок очистки (центробежный барботажный аппарат) для заделки состава и очистки от пыли и параллельно идет на газоанализатор Тест-1, определяющий объемное содержание компонентов газа в режиме реального времени.

Замеры температуры T и определение состава газа G проводились вдоль всего газового тракта (см. рис. 2). Образовавшийся после газификации отходов зольный остаток, содержащий частицы недожога и углеродный остаток, попадает в струю плазмы, где происходит

дожигание углерода и переплавление зольного остатка в инертный шлак. По мере наполнения ванны расплав жидкого шлака периодически сливается через летку в откатную тележку. Кроме вышеперечисленного оборудования, в состав установки входят источник питания плазмотрона, пульт управления к нему, система газоснабжения и водоснабжения, газоанализатор, система приточной и вытяжной вентиляции, пульт управления подачей отходов, дожигатель, охладитель дымовых газов.

Из центробежного барботажного аппарата топливный газ подается в камеру дожигателя ($T \approx 1200^\circ\text{C}$), где окисляется до CO_2 . Перед выбросом в атмосферу газ проходит в смеситель, где он охлаждается путем смешения с необходимым количеством атмосферного воздуха.

Перед началом эксперимента камера печи и футеровка прогревались до рабочей температуры. Для нагнетания и поддержания рабочей температуры во всем объеме камеры электропечи использовался плазмотрон. При достижении рабочей температуры в камеру печи порционно через определенные промежутки времени загружались упакованные медицинские материалы (медицинские маски).

Таблица 1
Элементный состав органических отходов [3]

Отходы	Состав, % (мас.)					
	C	H ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	Зола
Полиэтиленовые гранулы	85.7	14.3	—	—	—	—
ТКО	17.4	2.24	0.55	13.85	34.76	31.09
Древесные опилки	30.3	3.6	0.4	25.1	40	0.6
БИО	9.85	0.95	0.7	3	64.5	21

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведенный анализ элементного состава органики, включая медико-биологические отходы, а именно медицинские маски и одноразовые шприцы, показал, что медицинские маски изготавливают из полимеров с широким молекулярно-массовым распределением, таких как полипропилен, а одноразовые медицинские шприцы — из поливинилхлорида. Элементный состав отходов приведен в табл. 1.

Газификацию углеродсодержащих (органических) материалов упрощенно можно описать основными химическими реакциями, при-

Таблица 2
Реакции в процессе термообработки медико-биологических отходов [4]

№ п/п	Реакции	Тепловой эффект		
		кДж/кмоль	кДж/кг	кДж/м ³
1	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	395 000	32 890	—
2	$2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$	110 000	9 600	—
3	$\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$	–175 500	–14 610	—
4	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$	–130 500	–10 860	—
5	$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	–132 000	–10 990	—
6	$\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4$	–74 900	–6 240	—
7	$2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$	285 600	—	12 750
8	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ (жидкость)	286 200	—	12 780
9	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ (пар)	241 800	—	10 760
10	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (пар)	801 920	—	35 800
11	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$	40 400	—	1 800
12	$\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	1 322 500	—	59 040
13	$2\text{H}_2\text{S} + 3\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$	518 110	—	23 130

веденными в табл. 2. В установившемся режиме работы электропечи реализуются стационарные распределения по высоте температур движущихся отходов и газового потока.

Реакция протекает при наличии реагентов в реакционном пространстве при температуре выше равновесной. При последовательном нагреве отходы претерпевают разложение с выделением различных газообразных веществ, которые участвуют в дальнейшем в реакциях окисления (см. табл. 2).

На рис. 3 представлены экспериментальные результаты газификации медицинских масок. Видно, что при газификации основной массы материалов калорийность газа достигает пика, а затем постепенно уменьшается. Появление пика вызвано тем, что в экспериментах отходы подавались в камеру газификации порционно через определенные промежутки времени. Для обеспечения постоянства калорийности потока необходимо обеспечить непрерывную подачу отходов.

На рис. 4 приведены результаты измерения состава продуктов газификации органических отходов в тот же промежуток времени, что и на рис. 3. Из сравнения этих двух рисунков можно сделать вывод, что максимальной теплотворной способности синтез-газ достигает, когда в его составе содержится 26 % CO, 22 % CH₄, 13 % H₂. В этом случае его калорийность составляет 10 ÷ 12 МДж/м³.

Эксперимент проводился при температуре в реакционной зоне электропечи 1300 °С. По экспериментальным данным в составе газа отсутствуют оксиды и диоксиды азота, а также мало содержится диоксида углерода. Пики на графике рис. 4 объясняются дискретной подачей упакованных отходов. Для получения рав-

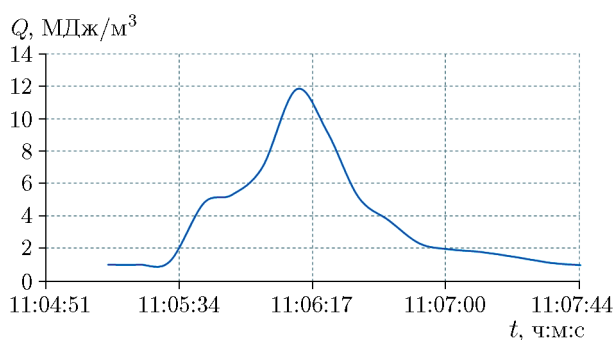


Рис. 3. Теплотворная способность продуктов газификации одной порции медицинских масок в зависимости от времени

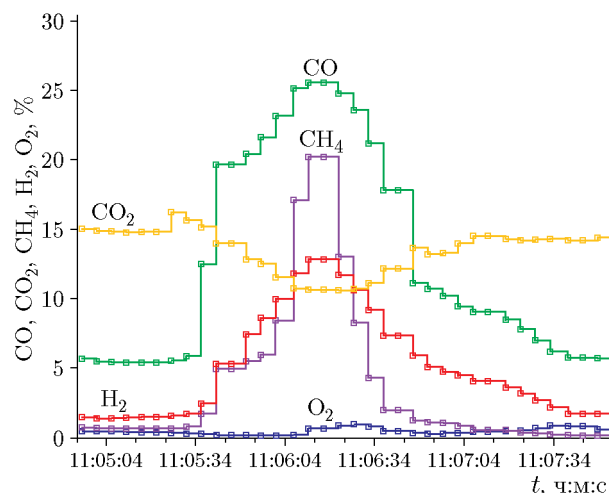


Рис. 4. Изменение во времени объемного состава продуктов газификации

номерного выделения синтез-газа при газификации необходимо производить равномерную загрузку отходов в камеру плазменной электропечи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный предварительный анализ термодинамических реакций [1] и химического состава уничтожаемого материала (медицинские материалы — одноразовые маски) показал возможность проведения плазменной газификации. Взятая за основу электроплазменная установка и технологический процесс плазменной газификации органических отходов подходят для уничтожения медицинских материалов с высокой экологической безопасностью. Также из анализа экспериментальных данных сделан вывод о применении разработанной установки для газификации органических отходов с получением высококалорийного газа. Протестировано ее применение для утилизации медико-биологических материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фалеев В. А., Бутаков Е. Б., Радько С. И. Термодинамический анализ газификации возобновляемых углеродсодержащих материалов природного и искусственного происхождения в плазменной электропечи // Теплофизика и аэромеханика. — 2017. — Т. 24, № 4. — С. 633–638.
2. Чередниченко В. С., Анышаков А. С., Кузьмин М. Г. Плазменные электротехнологические установки. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011.

3. Анышаков А. С., Фалеев В. А., Даниленко А. А., Урбах Э. К., Урбах А. Э. Исследование плазменной газификации углеродсодержащих техногенных отходов // Теплофизика и аэромеханика. — 2007. — Т. 14, № 4. — С. 639–650.
4. Домаров П. В. Электротехнология переработки техногенных отходов в плазменной печи с улучшенными энергетическими характеристиками: дис. ... канд. техн. наук / НГТУ. — Новосибирск, 2013.

Поступила в редакцию 21.01.2022.

После доработки 21.02.2022.

Принята к публикации 30.03.2022.
