

ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ В ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЕ

А.С. Аньшаков, Э.К. Урбах, А.Э. Урбах, В.А. Фалеев

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
пр. акад. Лаврентьева, 1, г. Новосибирск, Россия, 630090,
тел. (383) 330 80 92, тел/факс (383) 330 84 80,
e-mail: anshakov@itp.nsc.ru

Приведены результаты исследований переработки бытовых и промышленных отходов в низкотемпературной плазме. Расчетным путем определены состав синтез-газа и удельные энергозатраты при плазменной газификации углеродсодержащих техногенных отходов. Экспериментально на шахтной плазменной электропечи исследована переработка бытовых отходов и древесных опилок. Показано, что удельные энергозатраты на утилизацию 1 кг отходов составляют от 0,15 до 0,75 кВт·ч.

Дан сравнительный анализ полученных расчетно-экспериментальных результатов и показана их хорошая сходимость.

PROCESSING OF TECHNOGENEOUS WASTES IN ELECTRIC-ARC PLASMA

A.S. Anshakov, E.K. Urbakh, A.E. Urbakh, V.A. Faleev

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Investigation results on domestic and industrial waste processing in low-temperature plasma are presented. Synthesis-gas composition and specific power units at plasma gasification of carbon-containing technogeneuous wastes were calculated. Processing of domestic wastes and sawdust was studied experimentally using a shaft plasma electric furnace. It is shown that specific power inputs for utilization of 1 kg of wastes varies from 0.15 to 0.75 kW·h.

Calculation and experimental results is analyzed comparatively, and their good convergence is shown.

Аньшаков Анатолий Степанович – зав. лабораторией электротехнологий, д-р техн. наук, профессор, стаж научной работы – более 40 лет, основное направление исследований – генерация электродуговой низкотемпературной плазмы, публикаций – около 200.

Урбах Эрих Кондратьевич – вед. науч. сотр., д-р техн. наук, стаж научной работы – более 30 лет, основной круг научных интересов – приэлектродные процессы, около 100 научных публикаций.

Урбах Андрей Эрихович – науч. сотр., канд. техн. наук, стаж научной работы – 12 лет, круг научных интересов – электроплазменное оборудование и технологии, 34 публикации.

Фалеев Валентин Александрович – старший науч. сотр., канд. техн. наук, стаж научной работы – 25 лет, круг научных интересов – электротермические технологии и установки, 75 публикаций.

Введение

Среди экологических проблем, которые стоят перед человечеством, важное место занимает переработка (обезвреживание, утилизация, уничтожение) техногенных образований и отходов, количество которых постоянно увеличивается. При решении проблемы переработки углеродсодержащих отходов (промышленные, бытовые, биологические, угольные шламы и многие другие) необходимо исходить из того, что она представляет комплекс экологических и энергетических задач с одновременным использованием этих отходов как постоянно возобновляемого сырья [1].

Существующие промышленные методы утилизации техногенных отходов не отвечают требованиям природоохранного законодательства. Анализ современных способов переработки отходов показывает, что происходит смещение технологических аспектов в сторону существенного увеличения температур в реакционной зоне по сравнению с известными огневыми установками. Одновременно происходит функциональное разделение процессов на стадии, например, газификация органической части отходов с получением синтез-газа (CO и H₂) и последующее сжигание его в теплоэнергетических котлах или использование в качестве ценного продукта в химических производствах. К числу таких новых способов переработки относится экологически чистая плаз-

менная технология утилизации отходов (температура в плазменном потоке составляет 4000–5000 К). Она позволяет осуществлять глубокое разложение всех соединений с образованием простых веществ, переводить в жидкий шлак все непиролизуемые (неорганические) остатки, проводить высокотемпературный пиролиз ($t > 1300$ °С) и получать синтез-газ с тепловой способностью 10–12 МДж/нм³ [1-4].

В данной работе приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований плазменной газификации бытовых и промышленных углеродсодержащих отходов на современном электротехнологическом оборудовании. Здесь не затронуты вопросы эффективности и надежности электродуговых генераторов низкотемпературной плазмы (плазмотронов) и вихревого скруббера для закалки газовых продуктов переработки отходов.

Расчет состава синтез-газа в плазменном газификаторе

Несмотря на различную природу техногенных отходов, все они состоят из одинаковых химических элементов: углерода, водорода, кислорода, азота, хлора, серы, золы (комплекс неорганических элементов и соединений), воды (влаги), но содержат опасные для окружающей среды элементы и соединения (диоксины, болезнетворные микроорганизмы, тяжелые металлы и т.д.). Экологическая сущность газификации заключается в том, что сложные органические соединения, опасные для среды обитания человека, переводятся в простые и безопасные, уничтожаются целые биологические комплексы болезнетворных микроорганизмов. В восстановительной атмосфере водорода и окиси углерода не образуются токсичные вещества, такие как диоксины и окислы азота.

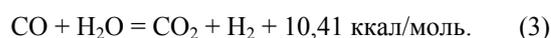
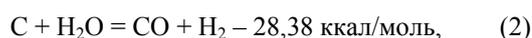
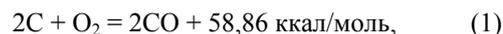
Благодаря относительно малому объему синтез-газа по сравнению с объемом продуктов полного сгорания отходов появляется возможность уменьшить габариты и стоимость очистных устройств в несколько раз.

Плазменная газификация позволяет вводить тепло в зону газификации с использованием в качестве плазмообразующих газов воздух, кислород, водород, пары воды, синтез-газ, любой инертный газ. Для каждого рода газа требуется отдельное техническое решение по конструкции плазменного устройства (плазмотрона или плазменно-дуговой электропечи).

Если основная цель газификации заключается в получении синтез-газа, пригодного для конверсии углеводородов (например, получение метанола), то использование воздуха, азота и других инертных газов в качестве плазмообразующих технологически нецелесообразно. Для получения синтез-газа, пригодного для энергетических установок (сжигание в двигателях внутреннего сгорания, энергетических котлах ТЭС и т.д.), возможно использование в качестве рабочего газа относительно небольшого количе-

ства воздуха и азота. Если основная цель газификации – уничтожение токсичных отходов, то в качестве плазмообразующего газа выбирается газ, исключая возможность образования новых опасных соединений, например, водяной пар.

Анализ литературных данных и состава техногенных углеродсодержащих материалов показывает, что для получения качественного синтез-газа подходит большинство отходов, создающих экологические проблемы в обществе. Иллюстрацией этого является теоретический анализ процессов газификации углерода в топливе по известным уравнениям:



Поскольку в уравнениях газификации присутствуют 4 неизвестных величины (H_2 , CO , CO_2 , H_2O), то для решения этой системы привлекается еще одно уравнение, описывающее условие газификации – уравнение равновесия фаз при заданной температуре (давление предполагается атмосферное):

$$K = \frac{[CO][H_2O]}{[H_2][CO_2]}, \quad (4)$$

где $[CO]$, $[H_2O]$, $[H_2]$, $[CO_2]$ – мольное (процентное) содержание CO , H_2O , H_2 , CO_2 в синтез-газе. Следовательно, для каждого компонента процесса газификации можно составить уравнение материального баланса. При этом предполагается, что в равновесном состоянии весь углерод вступил в реакцию с кислородом и водой и весь исходный кислород вступил в реакцию с углеродом либо с водородом.

С использованием справочных данных [5] $K = 1,656$ для среднетемпературной температуры в реакторе 1000 °С; $K = 2,065$ – 1100 °С; $K = 2,506$ – 1200 °С; $K = 2,965$ – 1300°С решение системы уравнений (1) – (4) позволяет определить теоретический состав синтез-газа при условии термодинамического равновесия в плазменном газификаторе.

В табл. 1 представлен расчетный состав синтез-газа для твердых бытовых отходов (ТБО), древесных опилок, рисовой лузги и биоорганических иловых осадков (БИО) отходов. Из нее видно, что при увеличении плазмообразующего воздуха G , кг/кг отходов, уменьшается доля горючих компонентов ($CO + H_2$) в синтез-газе и увеличивается количество транзитного азота и CO_2 , но удельные затраты энергии при этом значительно уменьшаются, сохраняется восстановительная атмосфера в реакторе. При дальнейшем увеличении расхода воздуха процесс газификации переходит в процесс горения. При $G = 0$ органическая часть всех исследуемых отходов переходит в синтез-газ, имеющий более 90 % об. горючих компонентов. Этот газ пригоден для использования в энергетике и химических производствах.

Таблица 1

Расчетный состав синтез-газа

Table 1

Calculated composition of synthesis-gas

Отходы	Состав синтез-газа, % об.				Удельные энергозатраты расчетные, кВт·ч/кг
	CO ₂	CO	H ₂	N ₂	
ТБО ($G = 0$)	5,3	37,9	56,1	0,5	0,6
ТБО ($G = 0,18$ кг/кг)	7,25	32,2	47,97	12,58	0,49
ТБО ($G = 0,36$ кг/кг)	7,3	29,5	39,6	23,6	0,4
ТБО ($G = 0,9$ кг/кг)	10	19,7	22,7	47,6	0,1
Опилки ($G = 0$)	5,15	40	54,5	0,35	0,74
Лузга риса ($G = 0$)	2,6	45,8	51,3	0,3	0,57
БИО ($G = 0$)	14,93	20,8	63,18	1,09	1,2

G – массовый расход плазмообразующего воздуха, поступающего на 1 кг отходов.

При плазменной газификации в реакторе (например, в шахтной электропечи) происходят экзо- и эндотермические реакции. Решая уравнение теплового баланса при заданных производительности, средне-массовой температуре и элементном составе отходов, можно получить расчетные значения удельных энергозатрат на переработку 1 кг отходов (табл. 1, последняя колонка). Из табл. 1 видно, что при $G = 0$ удельные энергозатраты выше для отходов, у которых больше исходная влажность. Очевидно, что управлять величиной удельных энергозатрат можно не только увеличением количества плазмообразующего воздуха, но и уменьшением влажности отходов (подсушиванием).

Экспериментальная установка

На рис. 1 изображена схема плазменной установки, на которой была проведена газификация твердых бытовых отходов и отходов древесины в воздушно-плазменной среде. Отходы 1 поступают через узел загрузки 11 в футерованную печь шахтного типа 10, где под действием тепловой энергии плазматронов 12 газифицируются и вырабатываемый синтез-газ поступает в аппарат очистки и закалки 14, 15 – вихревой скруббер. Очищенный синтез-газ из бака отстойника 6 подается в камеру сжигания 18 с помощью воздухоподогревателя 17. В камеру сжигания (дожигатель) одновременно подается необходимое количество воздуха 4 для сжигания синтез-газа. Отбор синтез-газа для определения его химического состава 20 осуществляется перед камерой сжигания. Образовавшийся при плазменной газификации шлак 7 удаляется из шлакосборника 13. Шлак 8 удаляется периодически из шламоприемника 16. Водяной насос 5 подает воду из бака отстойника в аппарат очистки и закалки. В баке-отстойнике предусмотрен специальный теплообменник для охлаждения посту-

пающей из вихревого скруббера 15 воды. Системы питания 19 обеспечивают подачу электрической энергии 2, плазмообразующего газа 3 и воды 4 на плазматроны. Продукты сгорания синтез-газа 9 после камеры сжигания частично отбираются для химического анализа и выбрасываются в атмосферу. В объеме печи поддерживается разрежение 10-15 мм вод.ст.

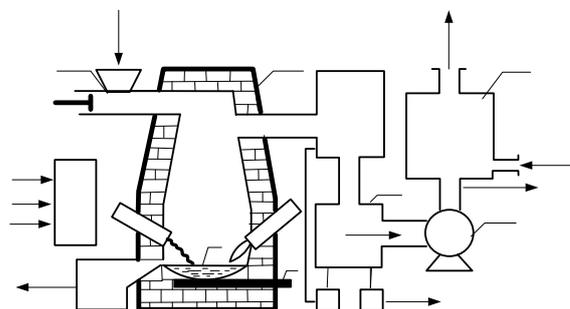


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для переработки техногенных отходов

Fig. 1. Scheme of experimental setup for technogenic waste processing

Внутренние размеры рабочего пространства печи составляли $2,3 \times 0,8 \times 0,4$ м³. Печь оборудована двумя плазматронами с регулируемой мощностью от 25 до 150 кВт. Использовались дуговые плазмогенераторы однокамерной схемы и двухструйный [3], предусмотрена установка плазматрона с вынесенной дугой. С этой целью в конструкции печи установлен подовый электрод 21. Плазматроны расположены на противоположных сторонах печи, а плазменные струи направлены под углом к поверхности ванны расплава 22.

По высоте шахтной печи заподлицо с футеровкой установлены четыре термодатчики для контроля за динамикой изменения температуры. Концентрации H₂,

CO, CO₂, NO₂, SO₂ по газовому тракту измерялись газоанализаторами ПЭМ-1 и ПЭМ-2. Производительность экспериментальной электропечи для переработки бытовых отходов составляла до 300 кг/ч.

Результаты экспериментов

Экспериментально полученный состав синтез-газа для различных отходов приведен в табл. 2. При обработке ТБО и древесных отходов в шахтной печи (рис. 1) использовались два варианта: 1 – шахта полностью загружалась отходами, затем включались плазматроны; 2 – шахта разогревалась до среднемас-

совой температуры 1200 °С, затем порциями через шлюзовое загрузочное устройство подавались отходы.

В первом случае после включения плазматронов проходила интенсивная газификация, наблюдалось мощное пламя в блоке сжигания синтез-газа, но в баке-отстойнике вихревого скруббера наблюдается отложение смолистых веществ. Это свидетельствует о том, что одновременно с высокотемпературной газификацией в зоне действия плазменных струй проходит низкотемпературная газификация в верхних слоях шахты с выделением подсмоленных жидких фракций.

Таблица 2

Состав синтез-газа, полученный экспериментально

Table 1

Experimental composition of synthesis-gas

Отходы	Состав синтез-газа, % об.						
	CO ₂	CO	H ₂	N ₂	O ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
ТБО	10	30	51	7	1	1	—
Опилки	7,3	24,8	61,54	5,1	1,1	0,16	0,05
Опилки подсушенные	2,3	28	51,78	12,87	3,35	1,46	0,05

Во втором случае при поступлении порции отходов в разогретую печь смолистых отложений в скруббере и баке-отстойнике не наблюдается, но мощность пламени в блоке сжигания синтез-газа периодически изменяется. Прибор, регистрирующий концентрацию водорода в сухом, очищенном газе, показывает колебание концентрации водорода от 40 до 60 % объемных, в зависимости от поступления новой порции отходов в реактор.

Кроме того, с увеличением влажности возрастает теплообмен на водоохлаждаемых элементах печи, меняется морфологический состав отходов в различных экспериментах.

На рис. 3 приведены расчетные зависимости, характеризующие влияние расхода воздуха на величину удельных энергозатрат. Видно, что энергозатраты с увеличением расхода воздуха уменьшаются. Здесь же приведены результаты двух экспериментов.

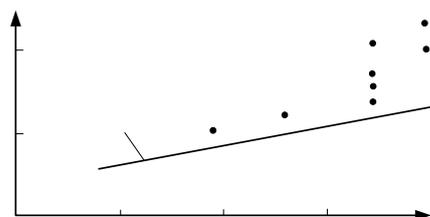


Рис. 2. Зависимость удельных энергозатрат на переработку 1 кг отходов от их влажности: 1 – расчет при расходе воздуха 0,1 г/с на 1 кг отходов; точки – эксперимент
Fig. 2. Dependence of specific power inputs for processing of 1 kg of wastes on their humidity: 1 – calculation at air flow rate of 0.1 g/s per 1 kg of wastes; points – experiment

На рис. 2 приведена расчетная зависимость (сплошная линия) количества электроэнергии, необходимой для переработки 1 кг отходов, от их влажности. Здесь же точками нанесены результаты экспериментов. Видно, что чем больше воды в отходах, тем больше энергозатраты и тем менее экономичен процесс газификации. Наблюдаемое несовпадение результатов расчета и эксперимента обусловлено тем, что при расчете не учитывались потери тепла в

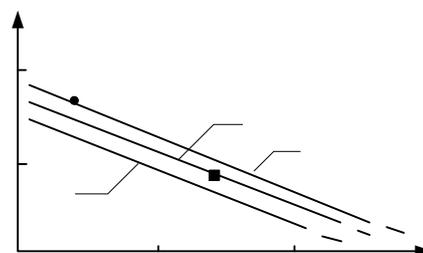


Рис. 3. Зависимость удельных энергозатрат на переработку 1 кг отходов от расхода воздуха. Расчет при влажности отходов 28,2 % (1), 34,7 % (2), 48,4 % (3): ● – без дополнительной подачи воздуха; ■ – с дополнительной подачей воздуха
Fig. 3. Dependence of specific power inputs for processing of 1 kg of wastes on air flow rate. Calculation at waste humidity of 28.2 % (1), 34.7 % (2), 48.4 % (3): ● – without additional air supply; ■ – with additional air supply

Точкой обозначен эксперимент, в котором подавался только необходимый для работы плазматрона воздух (плазмообразующий газ), а квадратик обозначен эксперимент с дополнительной подачей расхода воздуха. В этом эксперименте использовался

один плазматрон мощностью 27,5 кВт, загрузка печи – 60 кг отходов, расход плазмообразующего воздуха – 3,5 г/с, дополнительный расход воздуха – 10 г/с.

Величина удельных энергозатрат составила 0,45 кВт·ч/кг, что примерно в два раза меньше, чем при переработке без подачи дополнительного расхода воздуха (0,69 кВт·ч/кг). При этом в камере сжигания синтез-газа наблюдалось устойчивое горение факела, что свидетельствует о высоком содержании H_2 и CO в составе синтез-газа.

Из рис. 3 также видно, что при расходе около 0,3 г/с на 1 кг отходов, перерабатываемых за 1 час в реакторе, будет проходить их огневая переработка. Плазматрон в этом случае нужен только как источник тепла для стабилизации горения отходов.

На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость производительности плазменной электропечи (газификатора) при переработке модельного топлива от суммарной мощности плазматронов [6]. Видно, что производительность установки пропорциональна мощности плазматронов. Это свидетельствует о том, что при шахтной загрузке печи в нестационарном режиме ее работы, когда подина и стены шахты еще не прогрелись, струи плазмы непосредственно взаимодействуют с отходами, т.е. основная часть энергии плазмы непосредственно вкладывается в процесс пиролиза. Весьма заметно расслоение данных по влажности отходов. Полученные результаты позволяют оценить расход электроэнергии для переработки 1 кг отходов. С учетом КПД плазматронов и печи в среднем он составляет 0,69 кВт·ч/кг при влажности отходов 45 % и менее 0,4 кВт·ч/кг при влажности 29 %. Естественно, что в стационарном режиме после длительного прогрева печи и при использовании более сухого материала расход электроэнергии снизится. Полученные значения удельных энергозатрат согласуются с известными литературными данными, приведенными в [1].

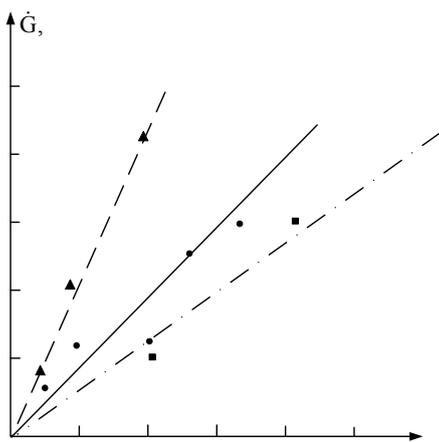


Рис. 4. Влияние мощности плазматронов на производительность газификатора: влажность отходов, %: 1 – 29, 2 – 45, 3 – 50

Fig. 4. Effect of plasmatron power on productivity of a gasifier: Waste humidity, %: 1 – 29, 2 – 45, 3 – 50

Выводы

1. Применение электроплазменной техники для переработки техногенных отходов позволяет провести газификацию органической составляющей с получением высококалорийного синтез-газа и перевести неорганическую часть в жидкий шлак. При этом исключается образование любых вредных веществ, оказывающих негативное влияние на окружающую среду.

2. Хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных по плазменной газификации углеродсодержащих отходов позволяет использовать полученные результаты для прогнозирования состава синтез-газа и удельных энергозатрат исследуемой технологии.

3. Полученный в плазменных газификаторах синтез-газ содержит до 90% горючих компонентов и является высококачественным сырьем для нужд теплоэнергетики и химического производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 06-08-00761.

Список литературы

1. Чердниченко В.С., Казанов А.М., Аньшаков А.С. и др. Современные методы переработки твердых бытовых отходов. Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 1995.
2. Лукашов В.П., Ващенко С.П. и др. Плазмотермическая переработка твердых отходов // Экология и промышленность России, ноябрь 2005. С. 4–9.
3. Чердниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005.
4. Рутберг Ф.Г., Братцев А.Н., Попов В.Е. Плазмохимические методы переработки. Газификация и пиролиз отходов / В кн. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Тематический том XI-5 Прикладная химия плазмы. М.: Янус-К, 2006. С. 7–33.
5. Реми Г. Курс неорганической химии. Т. 1. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
6. Anshakov A.S., Cherednichenko V.S., Urbakh E.K. et al. The treatment of mixed wastes using the thermal plasma / Progress in Plasma Processing of Materials/Ed.P.Fauchais, J.Amouroux. N. – Y.: Begell House, Inc., 1999. P. 737-743.

