

УДК 504.064.4:533.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ\*

А.С. АНЬШАКОВ<sup>1,2</sup>, В.А. ФАЛЕЕВ<sup>1</sup>, А.А. ДАНИЛЕНКО<sup>2</sup>, Э.К. УРБАХ<sup>1</sup>,  
А.Э. УРБАХ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет

Исследована возможность эффективного использования плазменного оборудования для газификации различных техногенных углеродсодержащих отходов (бытовые отходы, отходы древесины, рисовая лузга, биологические отходы). Приведен термодинамический анализ процессов газификации углеродсодержащих отходов. На плазменном оборудовании экспериментально подтверждена возможность прогнозирования результатов газификации. Показано, что при плазменной газификации углеродсодержащих материалов вырабатывается синтез-газ, пригодный для нужд энергетики и химического производства.

### ВВЕДЕНИЕ

К углеродсодержащим техногенным отходам относятся: муниципальные (твердые бытовые отходы — ТБО), сельскохозяйственные (рисовая лузга и т. д.), промышленные (отходы деревообработки, угольные шламы и др.) и биологические (медицинские, биологические иловые отложения — БИО и т. д.). Несмотря на различную природу этих 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.).

Общепринятым способом подачи тепла в зону газификации углерода является экзотермическая реакция горения углерода в кислороде воздуха или в чистом кислороде. Газификаторы на кислородном дутье позволяют получать более калорийный, чем на воздушном дутье, газ, в котором отсутствуют окислы азота. Но энергозатраты на получение чистого кислорода сравнимы с энергозатратами на газификацию отходов, поэтому в качестве окислителя в большинстве случаев используется воздух или водяной пар.

Решение проблемы газификации углеродсодержащих отходов связано с комплексом экологических и энергетических задач: необходимо с одной стороны, разложить токсичные органические соединения на простые и безопасные, с другой стороны, содержащуюся в отходах потенциальную энергию горения (калорийность) использовать в энергетических или химических установках.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Гос. контракта № 02.515.11.5010 от 6 марта 2007 г.

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 конструкции плазменного устройства (плазмотрона).

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 плазмообразующего газа относительно небольшого количества воздуха и азота. Если основная цель газификации — уничтожение токсичных отходов, то в качестве плазмообразующего газа выбирается газ, исключающий возможность образования новых опасных соединений, например, водяной пар.

Энергетическая сущность газификации состоит в том, что исходную калорийность отходов накапливают в окиси углерода и водороде, т. е. твердое топливо переводится в газообразное со значительным сохранением теплотворной способности.

Экологическая сущность газификации заключается в том, что сложные органические соединения, опасные для окружающей среды, переводятся в простые и безопасные, уничтожаются целые биологические комплексы болезнетворных микроорганизмов. В восстановительной атмосфере водорода и окиси углерода не образуются 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.

В настоящей работе поставлена задача: теоретически и экспериментально исследовать возможность получения синтез-газа с заданными свойствами на плазменном электротехнологическом оборудовании. При решении этой задачи предполагалось, что генераторы низкотемпературной плазмы (плазмотроны) обладают необходимым ресурсом работы для обеспечения экономической целесообразности процесса.

Энергетическая целесообразность плазменной газификации рассматривается ниже.

#### РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА СИНТЕЗ-ГАЗА В ПЛАЗМЕННОМ ГАЗИФИКАТОРЕ

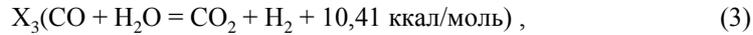
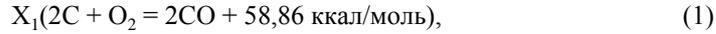
Анализ литературных данных и состава техногенных углеродсодержащих материалов (табл. 1) показывает, что для получения качественного синтез-газа подходит большинство отходов, создающих экологические проблемы в обществе.

Таблица 1

Элементный состав отходов

Состав, % вес.	С	Н	О	N	S	H <sub>2</sub> O	Зола
Отходы							
ТБО	17,4	2,24	13,85	0,55	0,11	34,76	31,09
Древесные опилки	30,3	3,6	25,1	0,4	–	40	0,6
Лузга риса	28,92	3,39	26,84	0,34	0,02	21,82	18,67
БИО	9,85	0,95	3	0,7	–	64,5	21

Иллюстрацией этого является теоретический анализ процессов газификации углерода по известным уравнениям:



где  $X_1, X_2, X_3$  — коэффициенты. 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:

$$[C] = M_c - 2X_1 - X_2, \quad (5)$$

$$[H_2] = M_{H_2} + X_2 + X_3, \quad (6)$$

$$[O_2] = M_{O_2} - X_1, \quad (7)$$

$$[H_2O] = M_{H_2O} - X_2 - X_3, \quad (8)$$

$$[CO_2] = X_3, \quad (9)$$

$$[CO] = M_c - X_3, \quad (10)$$

где  $M_c$  — количество молей углерода в отходах, перерабатываемых за 1 ч,  $M_{H_2O}, M_{H_2}, M_{O_2}$  — соответствующее количество молей  $H_2, O_2$  и  $H_2O$ .

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. После использования метода подстановок получается:

$$[CO_2] = X_3, \quad (11)$$

$$[CO] = M_c - X_3, \quad (12)$$

$$[H_2] = M_{H_2} + M_c - 2M_{O_2} + X_3, \quad (13)$$

$$[H_2O] = M_{H_2O} - M_c + 2M_{O_2} - X_3. \quad (14)$$

Подставляя (11)–(14) в (4), получаем

$$K = \frac{(M_c - X_3)(M_{H_2O} - M_c + 2M_{O_2} - X_3)}{X_3(M_{H_2} + M_c - 2M_{O_2} - X_3)}, \quad (15)$$

где  $K$  равно 1,656 для среднемаховой температуры в реакторе 1000 °С,  $K = 2,065$  — 1100 °С,  $K = 2,506$  — 1200 °С,  $K = 2,965$  — 1300 °С (справочные данные [1]).

После решения системы уравнений (11)–(15) определяется теоретический состав синтез-газа при условии термодинамического равновесия в газификаторе:

$$[CO_2] = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4(K-1)C}}{2(K-1)}, \quad (16)$$

Таблица 2

Расчетный состав синтез-газа

Состав синтез-газа, % об.	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Удельные энергозатраты расчетные, кВт·ч/кг
Отходы					
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

где  $G$  — расход плазмообразующего воздуха, поступающего на 1 кг отходов.

$$[\text{CO}] = M_{\text{C}} - [\text{CO}_2], \quad (17)$$

$$[\text{H}_2] = M_{\text{H}_2} + M_{\text{C}} - 2M_{\text{O}_2} - [\text{CO}_2], \quad (18)$$

$$[\text{H}_2\text{O}] = M_{\text{H}_2\text{O}} - M_{\text{C}} + 2M_{\text{O}_2} - [\text{CO}_2], \quad (19)$$

где  $b = K(M_{\text{H}_2} - M_{\text{C}} - 2M_{\text{O}_2}) + M_{\text{H}_2\text{O}} + 2M_{\text{O}_2}$ ,  $C = -(M_{\text{C}}M_{\text{H}_2\text{O}} - M_{\text{C}}^2 + 2M_{\text{C}}M_{\text{O}_2})$ .

В табл. 2 представлен расчетный состав синтез-газа для ТБО, древесных опилок, рисовой лузги и БИО.

Из табл. 2 видно, что при увеличении количества плазмообразующего воздуха к величине отходов уменьшается доля горючих компонентов ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) в синтез-газе и увеличивается количество транзитного азота и  $\text{CO}_2$ , 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 % горючих компонентов. Этот газ пригоден для использования в энергетике и химических производствах.

#### РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИКИ ГАЗИФИКАЦИИ

Тепловой баланс рабочего пространства газификатора представляет уравнение, связывающее приход и расход тепла. При составлении теплового баланса заданными считают вид топлива (элементный состав), производительность и среднюю температуру в реакторе.

При плазменной газификации в реакторе газификатора проходят экзотермические и эндотермические реакции, энергия плазмы потребляется от внешнего источника (электрическая энергия), поэтому к приходной статье теплового баланса относятся:  $Q_{\text{п}}$  — тепло, поступающее от плазмотрона,  $Q_{\text{экз}}$  — тепло, поступающее от экзотермических реакций,  $Q_{\text{т}}$  — тепло, поступающее с предварительно нагретыми отходами. К расходной статье теплового баланса относятся:  $Q_{\text{м}}$  — тепло, затраченное на нагрев отходов до температуры реакционной зоны,  $Q_{\text{энд}}$  — тепло эндотермических реакций,  $Q_{\text{потерь}}$  — тепло, уносимое из реактора через футеровку, охлаждаемые элементы печи, излучением через смотровые окна и т. д. Тогда уравнение теплового баланса будет

$$Q_{\text{т}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{экз}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{энд}} + Q_{\text{потерь}}, \quad (20)$$

где  $Q_T = \sum_{i=1}^n Q_{Ti}$  — тепло предварительно нагретых отходов,  $Q_n = P \cdot t$  — тепло, по-

ступающее от плазмотронов,  $Q_{\text{экз}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{экз}i}$  — тепло экзотермических реакций,

$Q_M = \sum_{i=1}^n Q_{Mi}$  — тепло, затраченное на нагревание отходов до температуры реакто-

ра,  $Q_{\text{энд}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{энд}i}$  — тепло, поглощенное эндотермическими реакциями,  $Q_{\text{потерь}}$  —

сумма всех тепловых потерь в газификаторе, где  $Q_{Ti}$  — тепло  $i$ -й компоненты отходов,  $P$  — мощность плазмотронов,  $t$  — время,  $Q_{\text{экз}i}$  — тепло  $i$ -й экзотермической реакции.

Расчет проводился в предположении, что  $Q_T = 0$ , т. е. отходы предварительно не нагреваются, и что  $Q_{\text{потерь}} = 0$ , т. е. рассчитывался идеализированный режим работы газификатора. Этот режим может быть осуществлен на практике, если отходы предварительно нагревать при условии  $Q_T = Q_{\text{потерь}}$ , т. е. потери тепла компенсировать предварительным нагревом отходов.

Зная исходный состав (табл. 1) и теплофизические свойства компонентов отходов (справочные данные), рассчитывалось необходимое количество тепла  $Q_{Mi}$  для нагрева каждой компоненты отходов до 1200 °С, затем тепло суммировалось и определялось общее  $Q_M$ .

Тепло экзотермических  $Q_{\text{экз}}$  и эндотермических  $Q_{\text{энд}}$  реакций определялось из уравнений (1)–(3) после определения  $X_1, X_2, X_3$ .

После подстановки значений  $Q_M, Q_{\text{экз}}, Q_{\text{энд}}$  в уравнение теплового баланса (20) определялось количество тепла, требуемое от плазмотронов ( $Q_n = Pt$ ), и, следовательно, необходимая мощность плазмотронов и удельные энергозатраты на газификацию.

В табл. 2 приведены расчетные значения удельных энергозатрат на переработку 1 кг отходов. Из табл. 1 и 2 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). При увеличении расхода плазмообразующего воздуха, увеличивается тепло экзотермических реакций  $Q_{\text{экз}}$  по уравнению (1), а уменьшая самую энергоемкую компоненту отходов  $H_2O$ , уменьшаем величину  $Q_M$ . И то и другое приводит к уменьшению  $Q_n$  в уравнении (20), а следовательно, к уменьшению удельных энергозатрат.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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 2 в футерованную печь 3, где под действием энергии плазмотронов 4 газифицируются, и вырабатываемый синтез-газ поступает в аппарат очистки и закалки 5, 6 — вихревой скруббер. Очищенный синтез-газ из бака отстойника 7 подается в камеру сжигания 9 с помощью воздуходувки 8. В камеру сжигания (дожигатель) одновременно подается необходимое количество воздуха 10 для сжигания синтез-газа. Отбор синтез-газа для определения его химического состава 11 осуществляется перед камерой

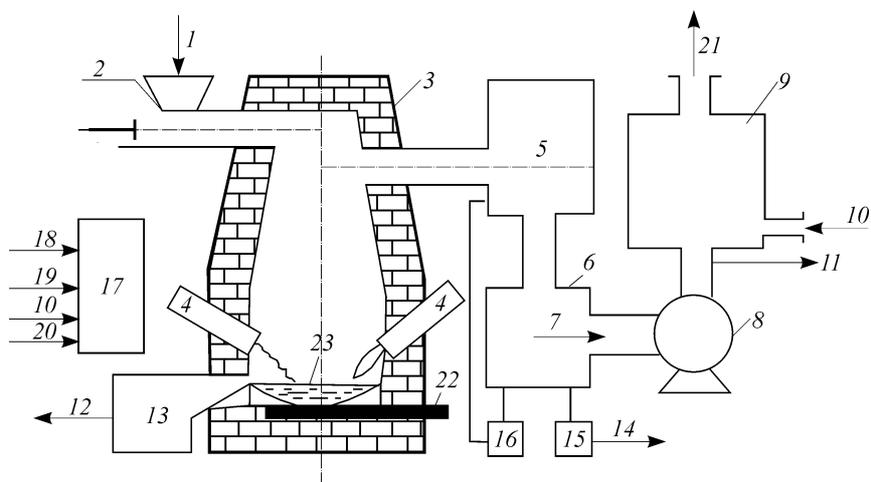


Рис. 1. Схема экспериментальной установки со струйно-плавильными плазмотронами.

сжигания. Образовавшийся при плазменной газификации шлак 12 удаляется из шлакосборника 13. Шлам 14 периодически удаляется из шламоприемника 15. Водяной насос 16 подает воду из бака-отстойника в аппарат очистки и заковки. В баке-отстойнике предусмотрен специальный теплообменник для охлаждения поступающей из вихревого скруббера 6 воды. Система питания 17 обеспечивает подачу электрической энергии 18, плазмообразующего газа 19 и воды 20 на плазмотроны. Продукты сгорания синтез-газа 21 после камеры сжигания частично отбираются для химического анализа и выбрасываются в атмосферу. В объеме печи поддерживается разрежение 10–15 мм вод. ст. Для работы плавильного плазмотрона в конструкции электропечи предусмотрен подовый электрод 22. В этом случае дуга горит на расплав металла 23.

На рис. 2 приведена схема экспериментальной установки, на которой проводилась плазменная газификация рисовой лузги и биологических иловых осадков без подачи плазмообразующего газа.

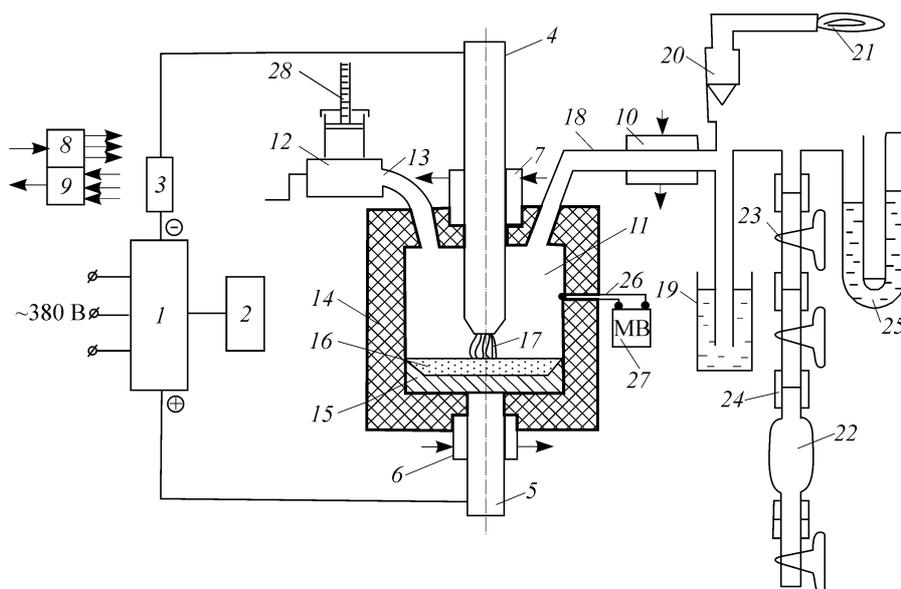


Рис. 2. Схема экспериментальной установки с открытой дугой.

В качестве источника питания 1 использовался источник постоянного тока БЭП-80, имеющий пульт управления 2, который позволял контролировать ток разряда и напряжение на выходе источника питания, а также осуществлять оперативное регулирование силы тока. Постоянное напряжение на стержневой 4 и подовой 5 электроды газификатора подавалось через балластное водоохлаждаемое сопротивление 3. Графитовые электроды 4 и 5 в местах токоподводов охлаждались водой с помощью холодильников 6 и 7. Вода в холодильники поступала из коллектора напора 8 и выходила в коллектор слива 9. Холодильник 10 предназначался для охлаждения синтез-газа до комнатной температуры.

Отходы подавались в рабочий объем газификатора 11 через герметичный дозатор 12 с ручным приводом, патрубок 13, проходящий через футеровку 14, и поступали на поверхность расплавленного металла 16, находящегося в графитовом тигле 15.

В рабочем режиме между стержневым графитовым электродом 4 и расплавом металла 16 горел открытый дуговой разряд 17, который являлся источником тепловой энергии в реакционной зоне газификатора 11.

Продукты газификации через патрубок 18 поступают в холодильник 10, после которого общий газожидкостный поток разделяется на два потока, т. е. жидкая фракция по нижнему патрубку поступает в мерную емкость 19, которая является одновременно водяным затвором и сборником жидкой фазы, а по верхнему патрубку газовая фаза поступает на сжигание в факеле 21 через ротаметр 20.

Отбор проб газа на анализ проводился через боковой патрубок в колбу 22 через запорные вентили 23 и соединительные муфты 24. Водяным манометром 25 измерялось давление синтез-газа перед ротаметром.

Кроме измерения расхода синтез-газа, давления в системе, отбора проб на анализ и расхода жидкой фазы в экспериментах измерялись: температура внутри рабочего объема газификатора с помощью платино-платинородиевой термопары 26 и милливольтметра 27, объем поступающей массы с помощью мерного стержня 28 за единицу времени; состав остаточного пепла, находящегося внутри печи; состав расплавленной минеральной части отходов (шлака), находящейся на поверхности расплава металла.

#### ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ ПЛАЗМОТРОНЫ ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ ОТХОДОВ

При плазменной газификации техногенных отходов основным источником тепловой энергии является генератор низкотемпературной плазмы — плазмотрон. В зависимости от рода отходов и конкретной схемы газификатора применяются различные схемы электродуговых плазмотронов: одноструйные, двухструйные и плавильные. В струйных плазмотронах дуговой разряд находится внутри электро-разрядной камеры, в двухструйных и плавильных плазмотронах столб дугового разряда в значительной части находится вне разрядной камеры.

В проведенных экспериментах (см. рис. 1) использовались однокамерные плазмотроны с самоустанавливающейся (рис. 3, *a*) и фиксированной уступом (рис. 3, *b*) длиной дуги и двухкамерный плазмотрон (рис. 4) для нагрева воздуха. Мощность плазмотронов в проведенных экспериментах составляла от 50 до 200 кВт.

В плазмотронах, представленных на схемах рис. 3, торцевой электрод работает в режиме термокатода с неподвижным пятном. Материалом термоэмиссионного катода при нагреве кислородсодержащих газов применяется гафний или вольфрам с газовой завесой азотом или аргоном. Как правило, материал катода запрессован или впаян в медный водоохлаждаемый катододержатель.

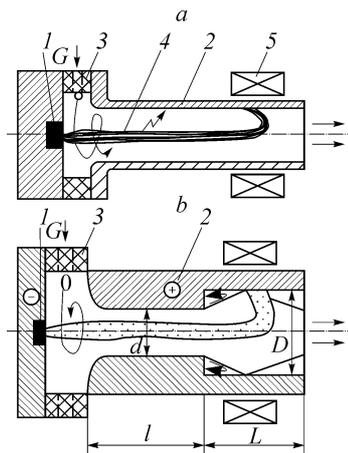


Рис. 3. Схемы плазмотронов с самоустанавливающейся (a) и фиксированной (b) длинами дуги:

1 — термомеханический катод, 2 — выходной электрод-анод, 3 — кольцо закрутки, 4 — дуга, 5 — соленоид.

В плазмотроне схемы (см. рис. 3, a) длина дугового разряда ограничивается процессом шунтирования и вольт-амперная характеристика дуги имеет падающий вид (см. рис. 4, кривая 1). Для обеспечения высокого теплового КПД длина выходного электрода должна иметь оптимальную величину.

В плазмотроне схемы (рис. 3, b) газодинамическим путем, т. е. путем резкого перехода с одного диаметра выходного электрода  $d$  на

больший  $D$  (применение уступа) устранено шунтирование дуги. Внезапное расширение канала (уступ) создает газодинамические условия преимущественного шунтирования дуги непосредственно за зоной срыва потока и обеспечивает постоянство ее средней длины в широком диапазоне изменения тока, расхода газа и давления при неизменных значениях  $l$  и  $d$  [2].

Длина дуги в плазмотроне со ступенчатым выходным электродом меньше, чем самоустанавливающаяся. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) дуги имеет  $U$ -образный вид, т. е. наряду с падающей ветвью ВАХ существует восходящий участок (см. рис. 4, кривая 2).

Из анализа вольт-амперных характеристик дуги, приведенных на рис. 4, следует, что одинаковую мощность дугового разряда  $P$  можно получить, применяя одну из схем плазмотронов. Преимуществом плазмотронов с восходящей ВАХ является более высокий электрический КПД и менее жесткие условия для электрической цепи питания плазмотрона (отсутствие балластного сопротивления и дополнительной индуктивности).

В ряде технологических процессов целесообразно воздействовать на обрабатываемый материал (металл, порошок, газ, жидкость) не только плазменной струей, но и непосредственно дуговым разрядом. Реализовать такие технологии позволяют двухструйные плазмотроны — особый класс линейных плазмотронов. Особенность их конструкций заключается в том, что значительная часть столба дуги находится вне электродразрядной камеры, а электродные узлы — идентичны (рис. 5).

Электродные узлы схематично представляют двухкамерные плазмотроны с диафрагмой 2 вместо выходных электродов. Диафрагма (сопло) электрически изолирована от электрода 1 и в момент запуска плазмотрона выполняет роль пускового электрода. Оси катодного и анодного узлов расположены друг к другу под углом  $\alpha$ , расстояние между центрами сопел равно  $a$ . Длина участка дуги вне электродных узлов составляет до 60 % всей длины разряда. Температура нагрева газа в плазменной струе с открытой дугой у такого

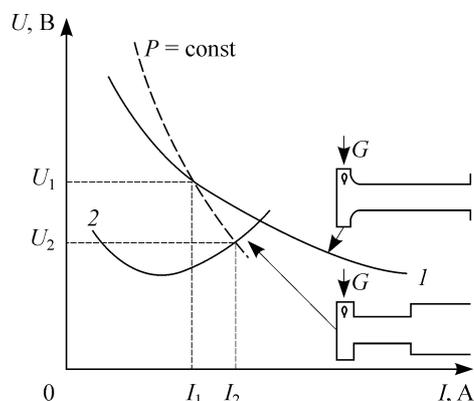
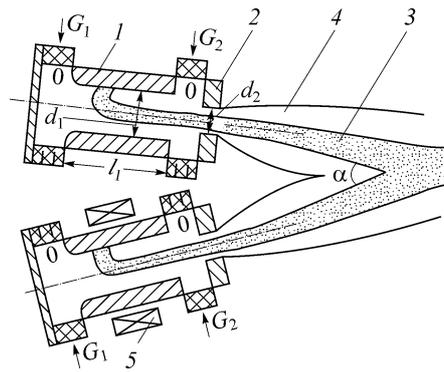


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики дуги плазмотронов рис. 3.

Рис. 5. Схема двухструйного плазмотрона.  
1 — электрод, 2 — диафрагма, 3 — дуга, 4 —  
плазменная струя, 5 — соленоид.



плазмотрона значительно выше, чем у струйного, тепловые потери в конструкционные элементы сведены к минимуму и тепловой КПД составляет около 0,9 [3].

Вольт-амперные характеристики дуги двухструйного плазмотрона при  $\alpha = 90^\circ$  (рабочий газ—воздух) проиллюстрированы на рис. 6. Здесь под расходом воздуха  $G$  понимается суммарный расход через оба электродных узла, т. е.  $G = 2(G_1 + G_2)$ . Из приведенных характеристик видно, что уровень напряжения на дуге существенно зависит от диаметра сопла  $d_2$  (кривые 2–5) и расхода газа (кривые 1 и 2). Подобное расслоение кривых  $U$ - $I$ -характеристик имеет место и с изменением диаметра электрода  $d_1$  и межсоплового расстояния  $a$ .

В двухструйном плазмотроне с цилиндрическими электродами приэлектродные участки дуги перемещаются в азимутальном направлении под действием аэродинамических сил закрученных потоков плазмообразующего газа и внешнего магнитного поля соленоидов (на рис. 5 соленоид указан на нижнем электродном узле). При неизменном соотношении расходов газа  $G_1$  и  $G_2$  на рабочей поверхности электрода образуется кольцевая выработка шириной 6–8 мм в зоне встречи закрученных потоков, истекающих из двух вихревых камер. Для расширения зоны выработки (при одинаковой величине удельной эрозии) и, тем самым, увеличения ресурса непрерывной работы электродов необходимо перемещать (сканировать) опорные пятна дуги в осевом направлении. Добиться этого можно изменением соотношения расходов газа  $G_1/G_2$ , когда зоны встречи потоков внутри электродов (а следовательно, и зоны привязки дуги к электроду) будут смещаться в ту или иную сторону. С этой целью применяется регулятор расходов газа.

Длительные контрольные испытания двухструйного плазмотрона (более 60 ч) с регулятором расхода газов позволили оценить ресурс анода в 500 ч и более, катода — в 200 ч (электроды медные,  $I = 300$  А, газ—воздух). Учитывая, что

электродные узлы двухструйного плазмотрона идентичны, путем смены полярности электродов (на рис. 5 она не указана) ресурс непрерывной работы плазмотрона может составить 350–400 ч.

Мощность разработанных плазмотронов данной схемы составляет от 60 до 700 кВт.

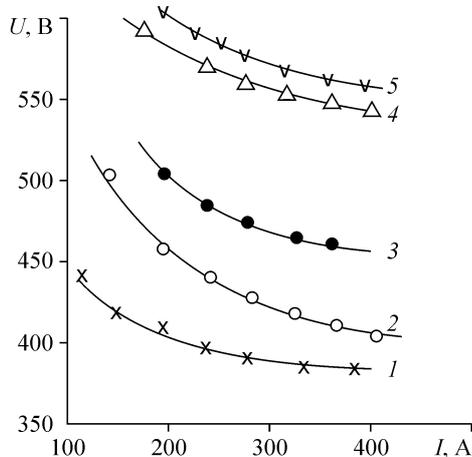


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики дуги двухструйного плазмотрона.

$G = 6$  (1), 12 (2) г/с,  $d_1 = 30$  мм,  $l_1 = 120$  мм,  $d_2 = 18,5$  мм;  $G = 12$  (3, 4, 5) г/с;  $d_2 = 14,5$  (3), 11 (4), 9 (5) мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментально полученный состав синтез-газа для различных отходов приведен в табл. 3. При обработке ТБО и древесных отходов в шахтной печи (см. рис. 1) использовались два варианта: 1 — шахта полностью загружалась отходами, затем включались плазмотроны; 2 — шахта разогревалась до среднемассовой температуры 1200 °С, затем порциями через шлюзовое загрузочное устройство подавались отходы.

В первом случае после включения плазмотронов 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.

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 30 до 60 % объемных, в зависимости от поступления новой порции отходов в реактор.

Рисовая лузга по качественному составу органической части мало отличается от древесины, но высокая зольность (~ 20 %) и малая насыпная плотность (100–140 кг/м<sup>3</sup>) не позволяют использовать стандартное оборудование для ее сжигания, а будучи зажженной в отвалах, рисовая лузга горит плохо, тлеет, загрязняя воздух продуктами горения, пылевидными частицами диоксида кремния. Использование рисовой лузги в качестве органических удобрений приводит к накоплению в почве болезнетворных микроорганизмов, присущих этой сельскохозяйственной культуре.

Существенным отличием рисовой шелухи от других сельскохозяйственных отходов и древесины является аномально высокое содержание золы, состоящей на 95–98 % из диоксида кремния. По чистоте диоксид кремния, содержащийся в рисовой шелухе, превосходит большинство природных кварцитов, причем отмыванием кислотой можно снизить уровень примесей более чем в 10 раз [4]. Поэтому рисовая шелуха привлекает исследователей как сырье для производства кремния высокой чистоты, пригодного для использования в солнечных батареях [5].

В Институте теплофизики СО РАН была разработана и испытана малогабаритная установка (см. рис. 2) для газификации органической части рисовой шелухи и модификации неорганического остатка. Подача шелухи осуществлялась непрерывно через патрубок загрузки, продукты газификации истекали в атмосферу самотеком за счет избыточного давления в рабочем объеме 5÷10 мм. вод. ст.

Таблица 3  
Состав синтез-газа, полученный экспериментально

Состав синтез-газа, % об.	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Отходы							
ТБО	10	30	51	7	1	1	–
Опилки	7,3	24,8	61,54	5,1	1,1	0,16	0,05
Лузга риса	2,8	36	49,4	8,5	2,2	0,8	0,02
БИО	7,8	28,8	61,56	1,69	–	0,25	–
Опилки подсушенные	2,3	28	51,78	12,87	3,35	1,46	0,05
Лузга увлажненная	3,8	26,7	64,4	3,9	0,7	0,4	0,01

и сгорали в виде длинного факела. Отбор проб газа осуществлялся из выходного патрубка перед сжиганием. Отбор проб неорганической части забирался из рабочего объема после проведения эксперимента.

Для исследований процесса переработки использовалась рисовая шелуха из района Малайзии, имеющая элементный состав: С — 31,82 %, Н<sub>2</sub> — 3,73 %, N<sub>2</sub> — 0,38 %, S — 0,02 %, O<sub>2</sub> — 29,53 %, H<sub>2</sub>O — 14 %, зола — 20,52 %. Состав золы: SiO<sub>2</sub> — 97 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0,14, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0,04 %, CaO — 0,31 %, MgO — 0,35 %, Na<sub>2</sub>O — 0,04 %, K<sub>2</sub>O — 1,11 %, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 0,37 %, другие — 0,64 %. Теплота сгорания — 13000 кДж/кг. Насыпная плотность — 110 кг/м<sup>3</sup>.

Результаты анализа проб синтез-газа при газификации рисовой лузги представлены в табл. 3.

Неорганическая часть извлекалась из газификатора в виде золистых чешуек, сохранивших форму исходной шелухи, и расплавленного шлака. Рентгеноструктурный анализ, проведенный в ИГиЛ СО РАН, показал, что золистые чешуйки не содержат кристаллических фаз, а в расплавленном шлаке удается определять только SiC в количестве около 5 %.

Атомно-эмиссионный спектральный анализ, проведенный в аналитической лаборатории ИНХ СО РАН, показал, что неорганическая часть содержит (% мас.): Si ~ 40, Ag, Be — < 2·10<sup>-4</sup>, Al — 0,07, B — 5·10<sup>-3</sup>, Ba — < 2·10<sup>-2</sup>, Bi, Pb, Sn, Ge, Ga, Mo, V, Zr — 2·10<sup>-3</sup>, Ca — 1,2, Cd — < 8·10<sup>-4</sup>, Co — 4·10<sup>-3</sup>, Cr — 0,2, Cu — 5·10<sup>-2</sup>, Fe — 1, Mg — 0,3, Mn — 6·10<sup>-2</sup>, P — 0,24, Nb, Hg, Te — < 2·10<sup>-2</sup>, Ni — 8·10<sup>-2</sup>, Ti — 2·10<sup>-2</sup>, Zn — 3·10<sup>-2</sup>, Au, Tl — 8·10<sup>-3</sup>. Остальные элементы (углерод, окислы металлов и кремния, SiC) не определялись.

Биологические иловые отложения имеют наибольшую влажность, поэтому расчетные и реальные энергозатраты при их переработке максимальны. Пастообразность отходов позволяет осуществлять равномерную подачу их в реакционную зону и максимально исключить попадание атмосферного воздуха в реактор. Поэтому синтез-газ (см. табл. 3), полученный на установке (см. рис. 2), содержит минимальное количество азота и большое количество горючих веществ.

В экспериментах удельные энергозатраты на переработку отходов превышают расчетные на 20–40 %. Это связано с КПД и плавильного плазмотрона, и установки в целом. Если в расчетах учитываются значения КПД плазмотрона 80–90 % и печи 80–90 %, то расчетные и реальные энергозатраты становятся одинаковыми. Расхождение расчетных и реальных энергозатрат увеличивается при повышении влажности отходов. Это, по-видимому, связано с тем, что усиливается теплообмен влажного газа с водоохлаждаемыми элементами электропечи.

## ВЫВОДЫ

1. Плазменная газификация позволяет разложить высокомолекулярные техногенные отходы (в том числе токсичные и болезнетворные) на простые химические соединения. Использование вихревого скруббера для закалки и очистки отходящих газов исключает возможность образования новых токсичных соединений.

2. Хорошая сходимости 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.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реми Г. Курс неорганической химии. Т. 1. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. — 920 с.
2. Электродуговые генераторы термической плазмы / М.Ф. Жуков, И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский и др. — Новосибирск: Наука, Сиб. предпр. РАН, 1999. — 712 с.
3. Аншаков А.С., Урбах Э.К., Янковский А.И. и др. Двухструйный плазмотрон с цилиндрическими электродами // Генераторы низкотемпературной плазмы / Тез. докл. XI Всесоюз. конф. Часть I. — Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1989. — С. 145–146.
4. Hunt L.P., Dismukes I.P., Amick I.A. Rice hulls as a raw material producing silicon // I. Electrochem.Soc. — 1984. — Vol. 131, No. 7. — P. 1683–1686.
5. Сапрыкин Л.В., Киселева Н.В. Состояние и перспективы термической переработки рисовой шелухи // Химия древесины. — 1990. — № 6. — С. 3–7.

*Статья поступила в редакцию 16 июля 2007 г.*