

УДК 621.365.91:533.9

Экспериментальная плазменная установка для газификации органических отходов с дискретной подачей их в газификатор

С.В. Алексеенко, А.С. Аньшаков, П.В. Домаров, В.А. Фалеев

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: anshakov@itp.nsc.ru

В работе описана схема экспериментальной установки для плазменной газификации органических отходов с дискретной подачей их в узел загрузки. Приведены экспериментальные результаты определения процентного состава синтез-газа и его калорийности в зависимости от времени для газификации древесных опилок и полиэтиленовых гранул. Проведен расчет зависимости количества метана в составе синтез-газа от температуры и расхода кислорода. Показано, что при подаче отходов отдельными порциями значительно изменяется во времени состав, выход синтез-газа и его калорийность.

Ключевые слова: плазменная газификация, органические отходы, дискретная подача, синтез-газ, калорийность, метан, плазмообразующий газ, камера плавления, камера газификации, узел загрузки.

Отличительной особенностью плазменной газификации является наличие в составе газификатора электродугового нагревателя газа — плазмотрона, который позволяет нагревать газ до нескольких тысяч градусов. Это свойство используется как для повышения среднemasсовой температуры в пределах 1500–1700 К в реакционной зоне газификатора для разложения опасных химических соединений (например, для разложения диоксинов требуется температура ≈ 1500 К в течение 2 секунд), так и для получения расплава неорганической части отходов (шлака) в температурных пределах 1700–2000 К и более [1–3].

Работа выполнялась на экспериментальной установке производительностью 20 кг/ч для твердых коммунальных отходов (ТКО) усредненного состава (рис. 1). Водоохлаждаемый корпус установки изготовлен из листовой стали, внутренняя стенка корпуса имеет футеровку. Внутри корпуса расположены: на нижнем ярусе — камера плавления объемом $0,074 \text{ м}^3$, имеющая плазмотрон мощностью 50 кВт; на верхнем ярусе — камера газификации объемом $0,11 \text{ м}^3$, имеющая газовую горелку с тепловой мощностью 40 кВт. В камеру газификации через узел загрузки подавались порции перерабатываемого материала, из камеры газификации синтез-газ поступал в блок очистки (ЦБА, центробежный барбатражный аппарат) и параллельно на многокомпонентный газоанализатор типа ТЕСТ-1, определяющий объемное процентное содержание компонентов газа в режиме реального времени. Неорганическая часть отходов поступала в камеру плавления, откуда после расплавления и накопления передавалась в шлакоприемник. Кроме вышперечисленного оборудования в состав установки входили: источник питания (ИП) для плазмотрона

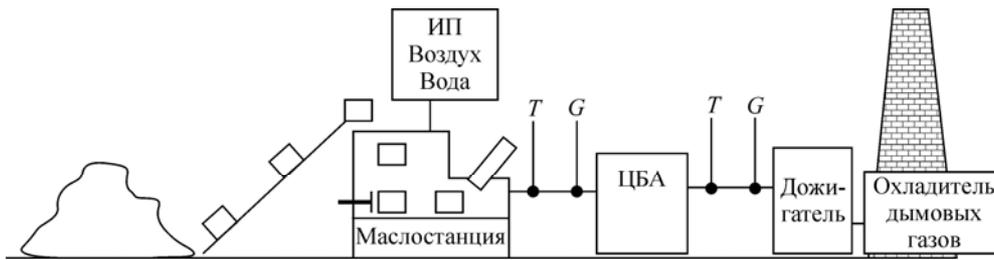


Рис. 1. Схема экспериментальной электроплазменной установки.

и пульт управления к нему, система газоснабжения и водоснабжения, газоанализатор, система приточной и вытяжной вентиляции, пульт управления газовой горелкой, пульт управления подачей отходов, дожигатель, охладитель дымовых газов. Замеры температуры T и определение состава газа G проводились вдоль газового тракта.

В начале эксперимента включались плазматрон в камере плавления и газовая горелка в камере газификации. Примерно через два часа температура в камере газификации достигала 1500 К, после этого газовая горелка отключалась и в камеру газификации отдельными порциями через различные промежутки времени подавались отходы.

На рис. 2 изображены показатели газоанализатора для H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , O_2 в объемных процентах в зависимости от времени, а на рис. 3 приведена зависимость теплотворной способности полученного синтез-газа от времени, вычисленная по показаниям газоанализатора. Видно, что максимальное значение низшей теплотворной способности было достигнуто в 11:06:12 и составило 11,84 МДж/м³, а минимальные значения

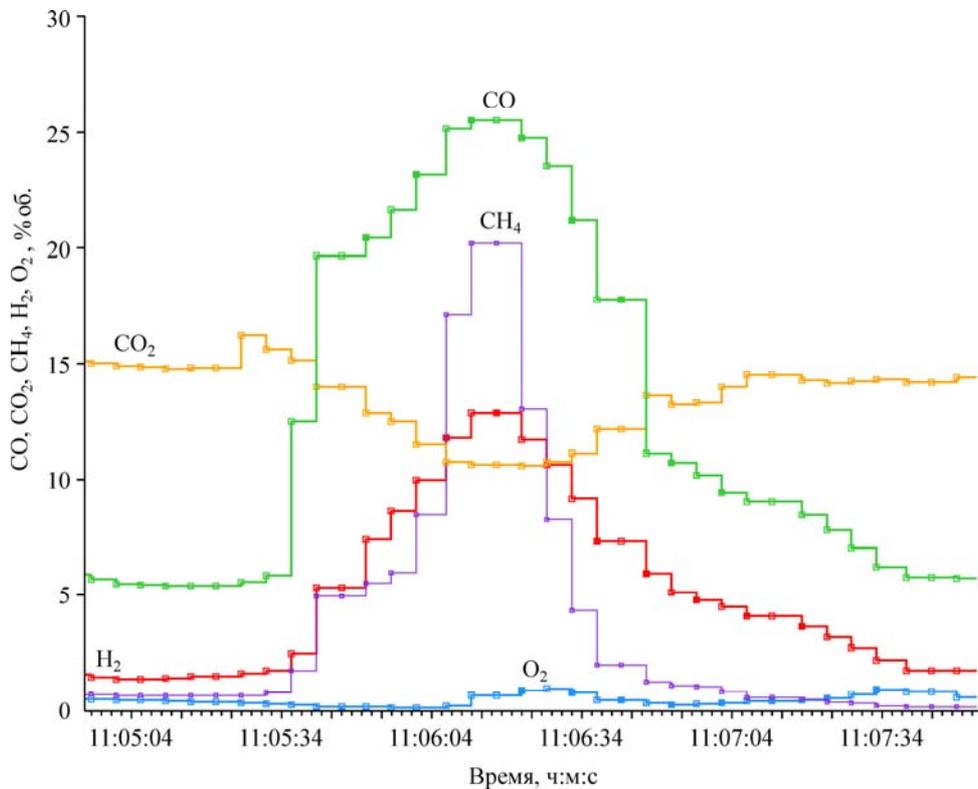


Рис. 2. Показания газоанализатора при газификации 1 кг опилок (изменение состава синтез-газа в % об. от времени).

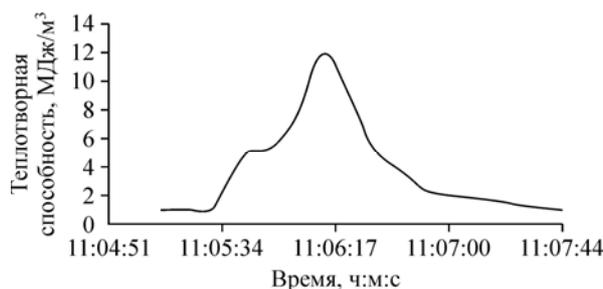


Рис. 3. Зависимость теплотворной способности синтез-газа от времени для порции опилок массой 1 кг.

были зарегистрированы в начале и в конце переработки и составляли ≈ 1 МДж/м³. График зависимости компонентов синтез-газа от времени на рис. 2 имеет ступенчатый вид, т.к. время анализа между показаниями газоанализатора составляло 5 секунд, а время переработки 1 кг опилок ≈ 2 –3 минуты. Из рисунка видно, что в газификаторе проходил процесс газификации остатков предыдущих загрузок, при этом вырабатывался газ, имеющий следующий объемный состав: $\text{CO}_2 \approx 15\%$, $\text{CO} \approx 5\%$, $\text{H}_2 \approx 1,5\%$, $\text{CH}_4 \approx 0,7\%$, $\text{O}_2 \approx 0,3\%$ и $\text{N}_2 + \text{Ar}$ — остальные 77,5 %.

В момент времени 11:05:06 в объем газификатора поступала порция опилок массой 1 кг, упакованная в картонную коробку размером $0,20 \times 0,20 \times 0,22$ м³. При этом процентные показатели компонентов синтез-газа резко возрастали, принимая максимальные объемные значения в промежутке времени от 11:06:07 до 11:06:22: CO — 25,5 %, CH_4 — 20,2 %, H_2 — 12,8 %, N_2 — 41,5 %. Из рис. 2 видно, что процесс переработки 1 кг опилок длился 2 минуты 38 секунд и ему соответствует промежуток времени от 11:05:06 до 11:07:44. Производительность газификатора при обработке древесных опилок составила примерно 23 кг/ч при расходе плазмообразующего воздуха 5 г/с и при потребляемой мощности плазмотрона ≈ 50 кВт. Проектная производительность установки составляет 20 кг/ч для ТКО усредненного состава, содержащих кислород менее 20 % масс. Поскольку опилки содержат в своем составе около 33,8 % масс. кислорода и 40,5 % масс. углерода, то для их переработки требуется меньше внешнего кислорода и азота, а следовательно, при равных внешних условиях затрачивается и меньше времени, чем на ТКО усредненного состава.

На рис. 4 представлены зависимости процентного состава компонентов газа от времени для случая, когда следующая порция подавалась до окончания процесса газификации предыдущей порции. В камеру газификации при этом подавались порции гранул полиэтилена общей массой 1 кг с добавкой воды массой 0,15 кг, которая вводилась с целью увеличения выхода H_2 в синтез-газе. На рис. 5 показана зависимость теплотворной способности синтез-газа от времени, рассчитанная по измеренному составу синтез-газа.

На рис. 4 видно, что в момент времени 12:33:16 проходила газификация предыдущей порции и процентный состав CO , H_2 , CH_4 уменьшался, а объем CO_2 несколько возрастал. В момент времени 12:33:31 кривая CO % об. принимала местное минимальное значение 14,6 %, потому что в камеру газификации поступал и начинал газифицироваться углерод следующей порции полиэтилена, затем кривая CO % об. показывает увеличение значений до 22 % в 12:36:54. Для кривой H_2 % об. в момент времени 12:34:06 наблюдается минимум, равный 8,7 % об., и затем максимум — 17,1 % об. — в момент времени 12:37:50. Кривая CH_4 % об. имеет минимум 14,8 % в момент времени 12:34:06 и максимум 23 % в промежутке времени 12:36:18–12:36:59.

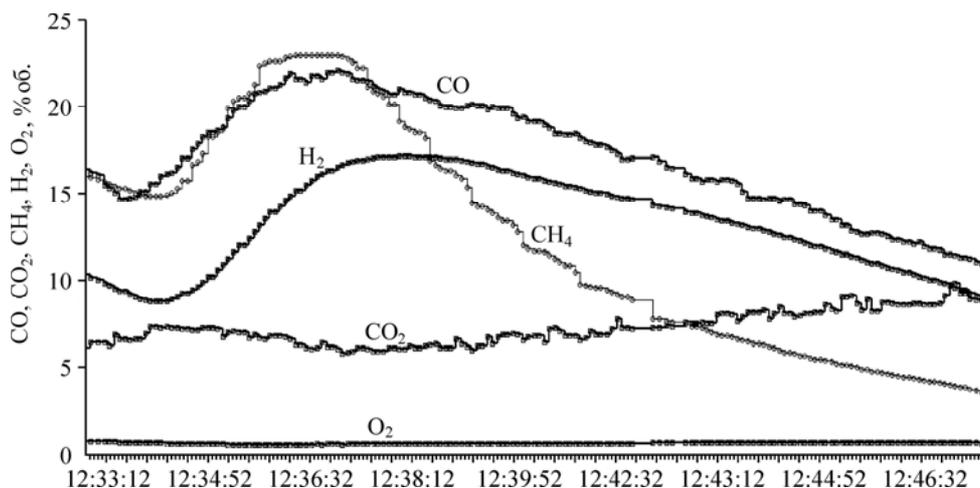


Рис. 4. Зависимость процентного состава синтез-газа в % об. от времени для порций массой 1 кг C_2H_4 + 0,15 кг H_2O .

На рис. 5 представлена теплотворная способность газа в зависимости от времени при обработке полиэтилена. Видно, что из-за присутствия в составе газа метана (CH_4) низшая теплотворная способность газа в некоторые периоды времени превышала 12 МДж/м^3 , а её уменьшение до 4 МДж/м^3 произошло через 12 минут после поступления последней порции в газификатор.

Расчеты показывают, что для установления производительности 5 кг/ч для полиэтилена требуется расход воздуха 6,9 г/с. Следует отметить, что в составе опилок содержится 40,5 % углерода, а в составе полиэтилена — 85,7 % углерода и отсутствует кислород, поэтому производительность при постоянном расходе плазмообразующего воздуха 5 г/с при переработке полиэтилена значительно меньше, чем при переработке опилок.

Для выяснения влияния расхода плазмообразующего воздуха и температуры в газификаторе на процесс образования метана авторами был проведен расчет термодинамических равновесных составов синтез газа для различных расходов кислорода и различных температур. Результаты расчетов представлены в таблице. Здесь $[O_2]$ — минимальное количество кислорода, необходимое для полной газификации поступившего полиэтилена. При расчетах была использована методика, описанная в работах [4–6]. Расчеты проводились для состава C_2H_4 — 1 кг + H_2O — 0,15 кг. Из таблицы видно, что по мере уменьшения расхода кислорода и уменьшения температуры содержание CH_4 в продуктах газификации увеличивается, а при температурах 1500–1600 К составляет

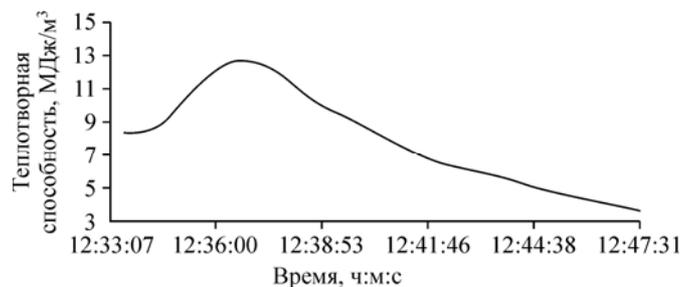


Рис. 5. Теплотворная способность синтез-газа в зависимости от времени для порций массой 1 кг C_2H_4 + 0,15 кг H_2O .

Таблица

Зависимость концентрации CH_4 в синтез-газе от температуры и подачи O_2

T, K	CH_4 , моль/кг				
1000	3,085	2,194	1,28	0,733	0,252
1100	1,366	0,975	0,34	0,064	0,019
1200	0,638	0,456	0,017	0,0072	0,002
1300	0,325	0,232	0,0069	0,0011	0,0003
1400	0,181	0,130	0,0015	0,00023	0,00006
1500	0,108	0,0771	0,00038	0,000059	0,000015
1600	0,069	0,0492	0,00012	0,000018	0,0000046
Условия газификации	$0,25 \cdot [\text{O}_2]$ кг	$0,5 \cdot [\text{O}_2]$ кг	$[\text{O}_2] = 1,143$ кг	$1,25 \cdot [\text{O}_2]$ кг	$1,5 \cdot [\text{O}_2]$ кг

величины менее 1 моль/кг. Рисунок 4 демонстрирует, что при постоянном расходе плазмообразующего воздуха 5 г/с при поступлении порции полиэтилена процесс вначале проходит с недостатком поступления окислителя O_2 , затем, по мере нагревания и уменьшения порции полиэтилена, с избытком. Температура в камере газификации поддерживалась в пределах 1500–1700 К. В ходе проведения экспериментов отмечалось, что при увеличении процентного содержания CH_4 в составе газа на фильтрующих элементах газоанализатора наблюдались следы смолистых соединений, а это дополнительно свидетельствует о том, что в камере газификации не выполнялись условия термодинамического равновесия и высокомолекулярные продукты газификации находились при высокой температуре недостаточное для полного разложения время.

Выводы

1. При дискретной подаче углеродсодержащих материалов и постоянном расходе плазмообразующего воздуха вырабатывается газ, имеющий переменный состав, переменный расход и переменную теплотворную способность в диапазоне от 1–8 МДж/м³ до 12 МДж/м³.
2. На основе результатов проведенных исследований рекомендуется: ввести в состав установки дополнительную регулируемую подачу воздуха; обеспечить равномерность и непрерывность подачи отходов в газификатор; увеличить время нахождения продуктов газификации при $T \approx 1500$ К до 2 с.

Список литературы

1. Чердиченко В.С., Казанов А.М., Аньшаков А.С., Фалеев В.А. Современные методы переработки твердых бытовых отходов. Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 1995. 55 с.
2. Чердиченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 602 с.
3. Аньшаков А.С., Васильев А.А., Пинаев А.В., Фалеев В.А. Газификация углеродсодержащего сырья в плазменно-дуговой электропечи с теплонагревателем и взрывоопасность смесей синтез-газа // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 4. С. 633–641.
4. 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.
5. Снярев Г.В., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Г.К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. М.: Наука, 1982. 263 с.
6. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах <АСТРА.4>. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. 39 с.

*Статья поступила в редакцию 23 мая 2019 г.,
после доработки — 23 мая 2019 г.,
принята к публикации 26 августа 2019 г.*