УДК 620.93

Влияние влажности твердых бытовых отходов на газификацию твердого углеродного остатка в процессе производства термогаза

О.И. Горинов, О.Б. Колибаба, Е.С. Семин
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Проблема переработки твердых бытовых отходов стоит достаточно остро. Наиболее перспективными являются методы их термической переработки, в основу которых положен пиролиз с последующей газификацией. В процессе переработки твердых бытовых отходов образуется горючий газ, на теплотворную способность которого влияет состав и влажность. Анализ теплофизических характеристик углеродосодержащих отходов как сырья для промышленной переработки в работах В.С. Чередниченко, А.А. Даниленко, Л.Я. Шубова, А.Н. Тугова и других проводился на основании зависимостей выхода горючего газа от влажности для однокомпонентных отходов. Актуальным является исследование многокомпонентных твердых бытовых отходов.
Материалы и методы: Взаимосвязанность поставленных задач обусловила применение комплексного метода исследований, включающего теоретические исследования, получение расчетных характеристик и закономерностей энерготехнологических процессов с последующей экспериментальной проверкой основных выводов на опытной установке.
Результаты: Произведен анализ влияния влажности твердых бытовых отходов на газификацию твердого углеродистого остатка в процессе производства термогаза. Получены зависимости состава пиролизного газа от температуры, а также теплотворной способности термогаза и количества теплоты, выделившейся при сжигании термогаза, от влажности исходного сырья.
Выводы: Эффективность процесса термического разложения твердых бытовых отходов можно повысить за счет его осуществления при влажности 6–8 %. Результаты исследования могут быть использованы для проектирования установок по переработке твердых бытовых отходов и выбора режимов их эффективной работы.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, газификация, пиролиз, термогаз, влажность, твердый углеродистый остаток, термическое разложение, теплотворная способность, реактор, муфельная печь.

Influence of domestic solid waste moisture on gasification of solid carbon residue in thermal gas production

O.I. Gorinov, O.B. Kolibaba, E.S. Semin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Abstract

Background: The problem of processing domestic solid waste (DSW) is quite acute. Methods of thermal processing of solid waste based on pyrolysis followed by gasification are the most promising ones. Solid waste processing results in formation of combustible gas, the calorific value of which depends on the waste composition and moisture content. The analysis of thermal characteristics of carbon-containing wastes as raw materials for industrial processing in the works of V.S. Cherednichenko, A.A. Danilenko, L.Y. Shubova, A.N. Tugova, etc. is based on the dependence of combustible gas output on the moisture content of single-component waste. It is currently important to study multicomponent domestic solid waste.
Materials and methods: The interconnection of the assigned tasks necessitated the use of a complex research method, including theoretical studies, getting the design characteristics and patterns of power engineering processes with subsequent experimental verification of the key findings at a pilot plant.
Results: The analysis of influence of humidity of municipal solid waste gasification of solid carbonaceous residue in the process of production batch bogie. The dependences of the composition of pyrolysis gas temperature and calorific value of batch bogie and the amount of heat-extraction trickled from burning batch bogie, from humidity of raw material.
Conclusions: The efficiency of domestic solid waste thermal decomposition can be improved by running this process at 6–8% humidity. The results can be used to design solid waste processing facilities and to choose the efficient work modes.

Key words: municipal solid waste gasification, pyrolysis, the batch bogie, humidity, solid carbon residue, thermal decomposition, calorific value, reactor, muffle furnace.

Проблема переработки твердых бытовых отходов (ТБО) является в настоящее время одной из задач, требующих безотлагательного решения, обеспечивающего экономически и экологи-

© ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

чески эффективное их использование с получением полезного продукта. На практике реализуется целый ряд технологий переработки ТБО [2]. Наиболее перспективными являются способы, основанные на термической переработке органосодержащего сырья с использованием процессов пиролиза и газификации с получением топливного газа.

Таблица 1. **Морфологический состав твердых бытовых отходов**

Наименование	Процентное соотношение в целом		Среднее процентное соотношение пиролизируемых веществ	Среднее процентное соотношение пиролизируемых веществ, принятое для опытов
1	2	3	4	5
Металл	3	4		
Бумага	36	39	37,5	44,2
Древесина	1	2	1,5	1,8
Текстиль	3	5	4	4,7
Пластмасса	4	5	4,5	5,3
Резина, кожа	0,5	1	0,75	0,9
Пищевые отходы	30	40	35	41,3
Стекло	2	3		
Керамика, камни	0,5	1		
Кости	1	2	1,5	1,8
Прочее	5	7		

В термореакторе ТБО проходят последовательно зоны подсушки и пиролиза. В зоне подсушки осуществляется нагрев и сушка слоя ТБО при температуре 120–250 ^{o}C за счет теплообмена с фильтрацией потока газа из нижерасположенной зоны пиролиза, а выделившаяся в процессе влага совместно с легкими летучими соединениями поступает на газификацию твердого углеродистого остатка. В зоне пиролиза за счет теплообмена с газовым потоком температура возрастает до 450–550 ^{o}C, горючие составляющие ТБО пиролизуются, образуя жидкий продукт (жижку), твердый углеродный остаток (ТУО) и пиролизный газ. Твердый углеродный остаток постепенно опускается в нижнюю часть реактора, поступает в зону газификации. Туда же подается окислитель (смесь водяного пара и диоксида углерода). Образующийся в результате газификации ТУО топливный газ в смеси с пиролизным газом (термогаз) является высококачественным горючим, пригодным для использования.

В задачу исследования входило расчетно-экспериментальное определение влажности, при которой не требуется использование стороннего окислителя в реакторе [3] в процессе газификации твердого углеродного остатка.

Цель экспериментальных исследований состояла в определении удельного выхода газообразных продуктов пиролиза и поиске режимов, при которых он имеет максимальное значение.

Опытная установка (рис. 1) состояла из муфельной электрической печи 1, огнеупорного керамического тигля 5 с крышкой 6, газоотводящей трубки 7, термоэлектрических термометров градуировки ТХА, соединенных с аналоговым модулем ввода МВА8 для вывода на ПК, которыми измеряли разность температур в стенке тигля и в печи.

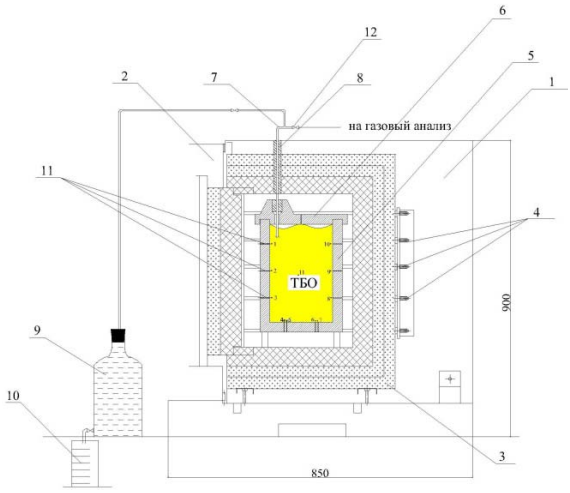

Рис. 1. Экспериментальная установка по исследованию процесса пиролиза: 1 – муфельная печь; 2 – дверь печи; 3 – футеровка печи; 4 – электронагреватели; 5 – тигель; 6 – крышка тигеля; 7 – газоотводная трубка; 8 – огнеупорная набивка; 9 – емкость; 10 – мерный стакан; 11 – термоэлектрические термометры; 12 – кран

В исследованиях процесса пиролиза использовалась только органическая часть состава ТБО, исключая составляющие, которые не влияют на выход газообразных веществ (металл, керамика, стекло и т. п.) (табл. 1).

Тигель с заложенной органической частью твердых бытовых отходов помещался в муфельную печь, в которой он разогревался до конечной температуры и выдерживался при ней до окончательного выхода газов. В результате нагрева органической части ТБО в тигле без доступа кислорода образовывался пиролизный газ, который отводился через керамическую трубку, расположенную в крышке тигля и через отверстие в стенке печи.

Компоненты выделяющегося пиролизного газа: CO, CO_2, H_2, CH_4 определялись газоанализатором VARIO PLUS Industrial, а выход пиролизного газа – методом мерного сосуда. Погрешность проведенных измерений не превышает 5 %. Экспериментальные данные по составу пиролизного газа приведены на рис. 2.

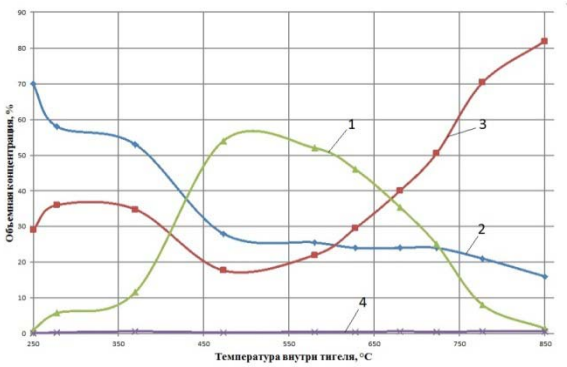

Рис. 2. Зависимость состава пиролизного газа от температуры: 1 – метан (CH_4); 2 – диоксид углерода (CO_2); 3 – оксид углерода (CO); 4 – водород (H_2)

Анализ полученных зависимостей (рис. 2) показывает, что наибольшей теплотворной способностью обладает пиролизный газ при температуре порядка 500 °С.

Таблица 2. **Процентный состав пиролизного газа при *T* = 500°С**

Пиролизный газ, %				
CO	CH_4	H_2	CO_2	Прочие
17	56,4	0,4	25,3	0,9

Количество и качество термогаза будет зависеть от полноты реакций процесса газификации ТУО, в которых участвуют окислители. В качестве окислителей обычно используются кислород (или воздух), водяной пар, диоксид углерода либо смесь указанных газов. В зависимости от соотношения исходных реагентов, температуры и других факторов, можно получать газовые смеси самого разного состава.

Процесс газификации осуществляется окислением углерода смесью водяного пара и диоксида углерода и может быть представлен следующими реакциями:

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2; \quad (1)$$

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO, \quad (2)$$

Диоксид углерода, полученный в процессе пиролиза, полностью участвует в газификации (2). Дефицит окислителя восполняется водяными парами от исходной влажности сырья. Поэтому исходное сырье должно содержать количество влаги, которое необходимо и достаточно для осуществления процесса газификации и получения максимального выхода термогаза. Для полного окисления твердого углеродистого остатка необходимо определенное количество паров влаги, которая поступает из зоны подсушки и пиролиза [3] и составляет в конечном итоге влажность исходного сырья. Влажность исходного сырья является одним из основных факторов эффективной работы термореактора. Недостаточная влажность приводит к неполной газификации ТУО, избыточная – к дополнительным затратам энергии на ее удаление из исходного сырья.

Для получения топливного газа с достаточно высокой теплотой сгорания влажность исходного сырья не должна превышать 20 % [5]. Исходное сырье с влажностью более 20 % должно быть предварительно подсушено. Для этой цели можно использовать энергию, полученную от сжигания термогаза.

Основной характеристикой любого горючего газа является его теплотворная способность ($Q_н^p$). На рис. 3 приведена расчетная зависимость теплотворной способности термогаза (кривая 1) и количества теплоты, выделившейся при сжигании термогаза, полученного из 1 кг ТБО (кривая 2), от влажности исходного сырья.

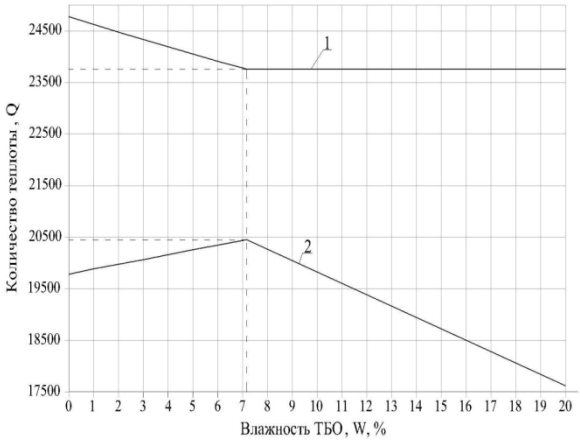

Рис. 3. Зависимость теплотворной способности термогаза и количества теплоты от влажности: 1 – теплотворная способность термогаза $Q_н^p$, кДж/кг; 2 – количество теплоты, выделившееся при сжигания термогаза, полученного из 1 кг ТБО, кДж

Анализ полученных зависимостей (рис. 3) показывает, что максимальное количество теплоты, выделившейся при сжигании термогаза, имеет место при влажности *W* = 6–8 %. Полученное значение влажности определяет режим работы термореактора, характеризующийся максимальным выходом термогаза при максимальной теплотворной способности.

Результаты исследования могут быть использованы для выбора рациональных режимов работы термореакторов по переработке ТБО.

Список литературы

1. **Пряхин В.Н., Голубев Д.В.** Классификация видов ТБО и их свойства. Проблемы экологической безопасности и природопользования // Материалы междунар. науч.-практич. конф. Вып. 7. – М.: Норма; МАЭБП, 2006.

2. **Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Шехирев Д.В.** Технологии отходов (Технологические процессы в сервисе): учеб. – М.: МГУС, 2006. – 411 с.

3. **Пат.** №2433344 Российская Федерация МПК F23G. Установка для термического разложения не сортированных твердых бытовых отходов / Д.А. Долинин, Р.Н. Габитов, Е.С. Семин, О.В. Самышина, О.Б. Колибаба, В.А. Горбунов, О.И. Горинов. Опубл. 10.11.2011 г.

4. **Пат.** №2282788 Российская Федерация МПК F23G5/027. Установка обезвреживания и уничтожения твердых отходов / М.А. Корюков, Д.Е. Щукин, А.С. Новиков, А.В. Мельников, В.В. Батов. Опубл. 27.08.2006 г.

5. **Prabir Basu**. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory / Academic Press, 30 Corporate drive. – Burlington, USA. – 365 p.

References

1. Pryakhin, V.N., Golubev, D.V. Klassifikatsiya vidov TBO i ikh svoystva. Problemy ekologicheskoy bezopasnosti i prirodopol'zovaniya [Domestic solid waste classification and properties. Environmental safety and nature management problems]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the international research-to-practice conference]. Moscow, Norma. MAEBP, 2006, issue 7.

2. Shubov, L.Ya., Stavrovskiy, M.E., Shekhirev, D.V. *Tekhnologii otkhodov (Tekhnologicheskie protsessy v servise)* [Waste technology (Technological processes in service)]. Moscow, MGSU, 2006. 411 p.

3. Dolinin, D.A., Gabitov, R.N., Semin, E.S., Samyshina, O.V., Kolibaba, O.B., Gorbunov, V.A., Gorinov, O.I. *Ustanovka dlya termicheskogo razlozheniya ne sortirovannykh tverdykh bytovykh otkhodov* [Unsorted domestic solid waste thermal decomposition unit]. Patent RF, no. 2433344, 2011.

4. Koryukov, M.A., Shchukin, D.E., Novikov, A.S., Mel'nikov, A.V., Batov, V.V. *Ustanovka obezvrezhivaniya i unichtozheniya tverdykh otkhodov* [Solid waste treatment and destruction unit]. Patent RF, no. 2282788, 2006.

5. Prabir Basu. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory. Academic Press, 30 Corporate drive. Burlington, USA, 365 p.

Горинов Олег Иванович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
телефон (4932) 26-96-12,
e-mail: gorinov@tvp.ispu.ru

Колибаба Ольга Борисовна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
e-mail: koli-baba@mail.ru

Семин Евгений Сергеевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
телефон (4932) 26-96-14,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

© ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»