

УДК 678.073.002

Васильев И.В., Капустенко П.А., Перевертайленко А.Ю., Илюнин О.О., Бухкало С.И., Арсеньева О.П.

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

Твердые бытовые отходы (ТБО) в настоящее время рассматриваются как в определенной степени возобновляемый вид топлива, что особенно важно при росте цен на традиционные углеводородные энергоносители и неравномерное распределение месторождений этих энергоносителей на земном шаре. Процессу получения энергии из отходов (Waste-to-Energy) уделяется все большее внимание, поэтому выбор технологий для осуществления этого процесса должен учитывать как техническое их совершенство, так и воздействие на окружающую среду [1].

Анализ проблемы переработки ТБО проводят с учетом: санитарно-экологических, экономических и логистических аспектов. Квалификационная характеристика ТБО должна иметь первичную классификационную характеристику самих отходов и способов их образования. Анализ литературных данных [2–4] позволяет классифицировать морфологический состав ТБО в достаточно приближенном виде без привязки к конкретному региону (табл. 1).

Таблица 1 – Пределы изменения морфологического состава ТБО

Вид отходов	от (% от общей массы)	до (% от общей массы)
Бумага	21	65
Пищевые отходы	10	50
Металл	0	10
Дерево	0	5
Текстиль	1	7
Полимерные материалы	1	6
Стекло	1	10
Неклассифицируемые части	0	20
Мелкий отсев	0	25

Следует отметить постоянный рост упаковочных материалов и тары, что приводит к перераспределению количества бумаги и полимерных материалов в сторону увеличения.

Возможности, тенденции и опыт обращения с твердыми бытовыми отходами, наглядно характеризует практика обращения с ТБО в странах ЕС. Например, в Швеции отходы утилизируются разными способами: с целью получения изделий или других продуктов – 31 %; сожженные на установках разного типа – 45 %; подвергнутые биологической утилизации – 10 %; размещенные на полигонах для долгосрочного захоронения – 14 %. В результате использования второго способа – сжигания, получено 9,3 ТВт·ч тепловой и 0,7 ТВт·ч электрической энергии, однако, есть один существенный недостаток этого способа – специалисты оценивают, что 5 % общих выбросов диоксинов связано с сжиганием отходов [4]. В Украине уже накоплено более 3,5 млн. тонн ТБО и их количество ежегодно в мире возрастает на 5–6 % [ 2 ].

Термические методы конверсии ТБО позволяют значительно уменьшить объемы отходов, высвободив, таким образом площади, занимаемые или отводимые под полигоны для захоронения этих отходов.

К термическим методам конверсии ТБО относятся сжигание (инсинерация), пиролиз и газификация. Сжигание производится в мусоросжигательных установках, достаточно полно описанных в [5]. Горение ТБО представляет собой сложный физико-химический процесс, включающий как химические реакции деструкции, сшивания и карбонизации, так и физические процессы интенсивных тепло- и массопередачи. Реакции в конденсированной фазе фактически приводят к двум основным типам продуктов: 1) газообразным веществам (горючим и негорючим) и 2) твердым продуктам (углеродсодержащим и минеральным). Специфической особенностью химии пламени является наличие сложного пространственного распределения температуры и концентраций исходных и промежуточных веществ и продуктов, а для полимерных материалов – наличие огромного числа разнообразных продуктов деструкции как в конденсированной, так и в газовой, предпламенной области. Сжигание ТБО в большинстве установок, существующих на сегодняшний день, сопровождается выбросами вредных веществ, в том числе, диоксинов и фуранов, уровни которых не соответствуют постоянно ужесточающимся нормативным документам, касающимся регулирования уровней выбросов в окружающую среду вредных веществ, озоноопасных и парниковых газов. При горении полимеров, например, наблюдаются такие критические явления, как сниже-

ние температуры пламени, что приводит к скачкообразному переходу от одного режима окисления – горения – к другому – очень медленному окислению и, в свою очередь, к увеличению номенклатуры вредных выбросов в окружающую среду.

Сокращение количества вредных выбросов может быть достигнуто при термической обработке подготовленных ТБО при температурах выше 1100–1200 °С. К таким технологиям относятся: высокотемпературное сжигание, газификация, а также пиролиз с последующим сжиганием и/или газификацией продуктов пиролиза. Упомянутые технологии получили название усовершенствованных технологий термической конверсии (УТТК) ТБО и, согласно соответствующим Директивам Еврокомиссии могут быть отнесены к наилучшим известным технологиям термической конверсии ТБО [5].

*Высокотемпературное сжигание (инсинерация).* Данная технология, в основном, используется в Европе для сжигания опасных отходов во вращающихся печах, однако процесс может быть применен и для других типов печей [5]. В данной технологии температура в печи доводится до 1100–1400 °С, что дает следующие преимущества по сравнению с аналогичным процессом, проходящим при 800–900 °С:

- органические вещества разлагаются, остаток составляет менее 1 %;
- значительно снижается содержание углеводородов и окиси углерода в дымовых газах;
- образуется инертный шлак, связывающий тяжелые металлы.

Недостатками данной технологии являются :

- при высоких температурах сжигания образуется дополнительное количество NO<sub>x</sub>;
- не исключается наличие тяжелых металлов в испаренной фазе, поэтому необходима организация температурного режима, не допускающего их возгонки и перехода в газовую фазу;
- требуется сжигание топлива, если нижняя теплота сгорания ТБО недостаточна;
- невысокая полигенеративность: тепло и возможность выработки электроэнергии;
- большая дороговизна, и, следовательно, экономическая нецелесообразность улавливания двуокиси углерода.

*Плазменная инсинерация ТБО.* Плазменные технологии начинают все чаще использоваться в настоящее время для переработки отходов, особенно опасных отходов. Эти технологии базируются на использовании воздушных плазмотронов, которые обеспечивают температуры термоконверсии утилизируемых материалов 2500–4000 °С. Происходит термохимическое разложение органических компонентов отходов до атомарного уровня и их ионизация; в случае инсинерации конечными продуктами являются продукты сжигания и витрифицированный шлак. В настоящее время в работе находятся две промышленные установки по термоконверсии ТБО в Японии (28т/сут. и 300т/сут.). После серии научно-исследовательских работ плазменные инсинераторы производительностью 5–7 т/сут. по отходам применяются с 2004 г. на кораблях ВМС США [6,7].

Существенной частью установки плазменной инсинерации ТБО является система очистки дымовых газов. Полигенеративность плазменных инсинерационных установок аналогична полигенеративности обычных мусоросжигательных установок, описанных выше.

*Пиролиз.* В процессе пиролиза происходит дегазация ТБО в отсутствие кислорода. Процесс проходит при температурах от 400 до 800 °С. Продуктами процесса являются пиролизный газ и твердый остаток – пиролизный кокс. Низшая теплотворная способность пиролизного газа, полученного при конверсии ТБО составляет 5–15 МДж/м<sup>3</sup>, образование пиролизного газа происходит в температурном диапазоне 400–600 °С, а образование пиролизного кокса – при температуре выше 500 °С [5]. Пиролизный газ может быть использован как низкокалорийное топливо, а пиролизный кокс является хорошим сырьем для процесса газификации. Пиролизный кокс также может сжигаться вместе с углем и углеводородным топливом (ко-инсинерация), то есть пиролизная установка по конверсии ТБО может быть интегрирована в технологическую схему, например, тепловой электростанции .

Использование жидкой фазы, образующейся на промежуточной стадии процесса и имеющей преимущественно органическую природу, для получения топлив может существенно повысить полигенеративность пиролиза в процессе конверсии ТБО. Тем не менее, пиролиз целесообразно применять вместе с другими видами УТТК.

*Газификация.* Процесс газификации ТБО, как и газификации других видов топлива, представляет собой совокупность гетерогенных и гомогенных реакций в результате которых образуется газовая смесь, состоящая в основном из окиси углерода, водорода, метана, а также более высших углеводородов, количество которых незначительно. Образуется также широкий спектр продуктов побочных реакций, номенклатура и количество которых зависит от состава газифицируемого ТБО. Среди них следует отметить такие соединения, как H<sub>2</sub>S, COS, HCN, HCL, CS<sub>2</sub> и другие. Газовая смесь, образованная в результате газификации, получила название синтез-газа, который может быть использован как сырье в производстве аммиака, метанола, топлив по методу Фишера-Тропша, водорода, а также электроэнергии и тепла по комбинированному циклу [8].

Таким образом, газификация обладает среди известных УТТК наивысшей степенью полигенеративности. Процесс газификации проводится при температурах выше 900 °С, в качестве газифицирующих агентов могут служить воздух, воздух и водяной пар, кислород и водяной пар. Установка газификации ТБО содержит узел подготовки сырья, установку разделения воздуха в случае применения кислорода в качестве газифицирующего агента, комплексную установку очистки синтез-газа от продуктов побочных реакций и других вредных примесей.

По данным, приведенным в [4,9], газификация ТБО применяется с 1979 г., в основном в Японии, однако этот процесс применяется для относительно узкого круга отходов, например, полимеров, использованных автомобильных шин, отходов биомассы, отходов медицинского происхождения. Основными технологиями газификации ТБО являются технологии компаний Nippon Steel, Thermoselect, Alstrom/Ebara, Entech, в которых используются газификаторы с неподвижным, либо кипящим слоем.

При газификации ТБО необходимо принимать во внимание следующие факторы:

- подготовка сырья: поступающие отходы должны пройти процесс измельчения до размеров, обусловленных конструкцией газификатора; желательнее также провести дополнительную сортировку – чем меньше номенклатура отходов, тем лучше проходит процесс газификации;
- тип газификатора оказывает влияние на структуру систем очистки синтез-газа и очистки воды, используемой в технологическом процессе;
- некоторые технологии используют дополнительно топливо;
- дальнейшее использование синтез-газа влияет на структуру газификационного агрегата, так как могут быть введены дополнительные стадии подготовки синтез-газа, например, конверсия окиси углерода.

*Плазменная газификация* предполагает использование плазмы для газификации ТБО. Процесс термотрансформации ТБО происходит в плазменном термотрансформере (ПТТФ). Отходы вводятся в верхнюю часть ПТТФ и поступают в нижнюю часть аппарата, где расположен плазменный факел, генерирующий высокую температуру. Органические материалы трансформируются в сырой синтез-газ, который затем либо используется, либо сжигается с помощью той же плазмы (разновидность плазменной инсинерации). Неорганическая составляющая ТБО витрифицируется и выводится из нижней части ПТТФ.

В настоящее время в ПТТФ, используемых для термоконверсии различных отходов используется плазма дугового разряда, для чего необходима электроэнергия. Анализ данных, касающихся подобного типа ПТТФ [10,11], показывает, что 30–60 % электроэнергии, которую возможно выработать с помощью плазменно-газификационной установки необходимо затратить на «собственные нужды» ПТТФ. Тем не менее, известные промышленные инсталляции по термической конверсии отходов с помощью ПТТФ используют плазму дугового разряда. Плазменная термоконверсия применяется в настоящее время для переработки узкой номенклатуры отходов, включая опасные отходы, а также побочные продукты сжигания ТБО на мусоросжигательных заводах [ 12 ].

В настоящее время разработаны конструкции ПТТФ, использующих энергию микроволнового излучения (СВЧ) [11,13,14]. Подобные аппараты обладают следующими преимуществами:

- энергия микроволнового излучения вкладывается в обрабатываемые ТБО объемно и практически полностью;
- практически не требуется дополнительного топлива;
- интенсифицируются процессы окисления, разложения и обеззараживания ТБО, причем обеззараживание происходит до термического разогрева за счет воздействия СВЧ-полей излучения;
- упрощается и улучшается управление в автоматическом режиме за счет снижения инерционности;
- расход электроэнергии на «собственные нужды» не превышает 10 %.

Техническая база СВЧ техники в настоящее время хорошо развита во многих странах. Данный тип ПТТФ может быть перспективен для более гетерогенных ТБО и может позволить упростить подготовку исходных ТБО к термической переработке. Экономическая эффективность рассмотренных УТТК зависит от следующих факторов:

- от состава ТБО, влияющего на режим работы установки и на количество генерируемой энергии;
- налаженности подвоза ТБО, что влияет на непрерывность работы установки;
- установленных на законодательном уровне тарифов, либо размеров платежей за утилизацию отходов.

Перспективным направлением термической конверсии ТБО является *ко-газификация* ТБО с другими видами топлива.

**Выводы.** Применение УТТК для конверсии ТБО перспективно для решения таких важных задач, как высвобождение площадей от размещаемых на них ТБО, возможность выработки энергии, а также ряда товарных продуктов, не повышая отрицательного воздействия на окружающую среду. Для повышения эффективности применения УТТК важен такой фактор, как предварительная сортировка ТБО. Весьма

перспективними являються плазменні технології, тем не менше здесь важна интеграция этих технологий с наилучшими известными технологиями очистки синтез-газа и дымовых газов, а также воды, применяемой в технологическом цикле.

Работа выполнена при поддержке ЕС FP7, проект DISKNET No.PIRSES-GA-2011-294933.

### Литература

1. A.Nemet, P.S.Varbanov, J.J.Klemes. Waste-to-Energy Technologies Performance Evaluation Techniques." Chemical Engineering Transactions", 2011, v.25, p. 513–520.
2. Касимов А.М., Товажнянский Л.Л., Тошинский В.И., Сталинский Д.В. Управление опасными промышленными отходами. Современные проблемы и решения.– Харьков, НТУ «ХПИ», 2009.– 500 с.
3. А.И. Свириденко. Проблемы выбора утилизации твердых бытовых отходов. Материалы симпозиума «Материальный и энергетический рециклинг бытовых отходов», Гродно, 2004, с. 4–9.
4. Waste Conservation Technologies. SWANA Applied Research Foundation: Report, December, 2011, 72 pp.
5. EUROPEAN COMMISSION: Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, August, 2006
6. B.D. Sartwell et al. Studies on the Application of Plasma Arc Technology to Destruction of Shipboard Waste. Report No.NRL/MR/6170-99-8353; Naval Research Laboratory, Washington, DC, April 5, 1999, 157 pp.
7. P.Carabin, G.Holcroft. Plasma Resource Recovery Technology – Converting Converting Waste to Energy and Valuable Products. – Proceedings of the 13<sup>th</sup> North American Waste to Energy Conference (NAWTEC13-3155), May 23-25, 2005, Orlando, Florida, USA, p. 71–79.
8. Товажнянський Л.Л., Капустенко П.А., Перевертайленко А.Ю., Бухкало С.И., Арсеньева О.П. Анализ теплообменных систем установок газификации нефтеперерабатывающих производств – Интегровані технології та енергозбереження –Харків: НТУ «ХПИ», 2011. – №3, с. 54–62.
9. J.Bower, K.Fernholz. Plasma Gasification: An Examination of the Health, Safety, and Environmental Facilities.-Dovetail Partners Inc. Presentation.
10. C. Ducharme, N. Themelis. Analysis of Thermal Plasma-assisted Waste-to Energy Processes. – Proceedings of the 18<sup>th</sup> Annual North American Waste-to-Energy Conference (NAWTEC18-3582 ), May 11–13, 2010, Orlando, Florida ,USA, 6 pp.
11. ФГУП Московский радиотехнический институт РАН. Переработка ТБО с использованием микроволнового излучения.< www.mrtiran.ru >, 22.03.2013.
12. J.-S. Chang. Thermal Plasma Solid Waste and Water Treatment: A Critical Review. "International Journal of Plasma Environmental Science and Technology", 2009, v.3, No.2, p. 67–84.
13. Application of Microwave Plasma Technology in Production of Bioenergy./B.Semb, B.Radejko, I.V.Vasylyev; Plasma Kraft AS Presentation.
14. L.Sanchez. Method and Apparatus for Plasma Gasification of Carbonic Material by Means of Microwave Radiation. European Patent Application EP 2 163 597 A1 Int. class. C10J3/18, publ.15.01.2009: ABA Research S.A.

### Bibliography (transliterated)

1. A.Nemet, P.S.Varbanov, J.J.Klemes. Waste-to-Energy Technologies Performance Evaluation Techniques." Chemical Engineering Transactions", 2011, v.25, p. 513–520.
2. Kasimov A.M., Tovazhnjanskij L.L., Toshinskij V.I., Stalinskij D.V. Upravlenie opasnymi promyshlennymi othodami. Sovremennye problemy i reshenija.– Har'kov, NTU «HPI», 2009.– 500 p.
3. A.I. Sviridenok. Problemy vybora utilizacii tverdyh bytovykh othodov. Materialy simpoziuma «Material'nyj i jenergeticheskij recikling bytovykh othodov», Grodno, 2004, p. 4–9.
4. Waste Conservation Technologies. SWANA Applied Research Foundation: Report, December, 2011, 72 pp.
5. EUROPEAN COMMISSION: Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, August, 2006
6. B.D. Sartwell et al. Studies on the Application of Plasma Arc Technology to Destruction of Shipboard Waste. Report No.NRL/MR/6170-99-8353; Naval Research Laboratory, Washington, DC, April 5, 1999, 157 pp.
7. P.Carabin, G.Holcroft. Plasma Resource Recovery Technology – Converting Converting Waste to Energy and Valuable Products. – Proceedings of the 13<sup>th</sup> North American Waste to Energy Conference (NAWTEC13-3155), May 23-25, 2005, Orlando, Florida, USA, p. 71–79.

8. Tovazhnjans'kij L.L., Kapustenko P.A., Perevertajlenko A.Ju., Buhkalo S.I., Arsen'eva O.P. Analiz teploobmennih stistem ustanovok gazifikacii neftepererabatyvajushhих proizvodstv – Integrovani tehnologii ta energozberezhenja –Harkiv: NTU «HPI», 2011. – #3, s. 54–62.

9. J.Bower, K.Fernholz. Plasma Gasification: An Examination of the Health, Safety, and Environmental Facilities.-Dovetail Partners Inc. Presentation.

10. C. Ducharme, N. Themelis. Analysis of Thermal Plasma-assisted Waste-to Energy Processes. – Proceedings of the 18th Annual North American Waste-to-Energy Conference (NAWTEC18-3582 ), May 11–13, 2010, Orlando, Florida ,USA, 6 pp.

11. FGUP Moskovskij radiotekhnicheskij institut RAN. Pererabotka TBO s ispol'zovaniem mikro-volnovogo izlucheniya.< www.mrtiran.ru >, 22.03.2013.

12. J.-S. Chang. Thermal Plasma Solid Waste and Water Treatment: A Critical Review. “International Journal of Plasma Environmental Science and Technology”, 2009, v.3, No.2, p. 67–84.

13. Application of Microwave Plasma Technology in Production of Bioenergy./B.Semb, B.Radejko, I.V.Vasylyev; Plasma Kraft AS Presentation.

14. L.Sanchez. Method and Apparatus for Plasma Gasification of Carbonic Material by Means of Microwave Radiation. European Patent Application EP 2 163 597 A1 Int. class. C10J3/18, publ.15.01.2009: ABA Research S.A.

УДК 678.073.002

Васильєв І.В., Капустенко П.О., Перевертайленко О.Ю., Ілюнін О.О., Бухкало С.І., Арсеньєва О.П.

#### **ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЕЯКИХ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТЕРМІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ**

Проведено аналітичний огляд таких сучасних технологій термічної конверсії твердих побутових відходів, як високотемпературна інсінерація, піроліз, газифікація, включаючи плазмову газифікацію. Визначено переваги та недоліки технологій. Зазначено важливість інтеграції цих технологій з найкращими відомими технологіями з очистки синтез-газу, димових газів та води, що використовується.

Vasylyev I.V., Kapustenko P.O., Perevertaylenko O.Yu., Ilunin O.O., Buhkhalo S.I., Arsenyeva O.P.

#### **PROBLEMS AND PERSPECTIVES OF SOME ADVANCED THERMAL RECYCLING TECHNOLOGIES OF MUNICIPAL WASTES**

The survey of some advanced thermal recycling technologies such as high-temperature incineration, pyrolysis, gasification including plasma-aided gasification for municipal wastes conversion was carried out. The advantages and disadvantages of each technology are discussed. It was underlined on integration of mentioned above technologies with best available techniques of gas cleaning and water treatment.