

## ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

**В. С. Дога**

Национальный институт экономических исследований Академии наук Молдовы  
ул. Ион Крянгэ, 45, Кишинев, MD-2064, Республика Молдова

**В. В. Вамболь**

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»  
ул. Чкалова, 17, г. Харьков, 61070, Украина. E-mail: violavambol@gmail.com

Показана экономическая эффективность применения технологии плазменной утилизации отходов по сравнению с другими термическими способами. В качестве основных критериев выбора технологии утилизации отходов, приняты показатели экологической безопасности и экономической эффективности.

В процессе утилизации отходов по усовершенствованной технологии получают сжиженный метан, синтетический газ (94 % метана) и топливный газ для отопления, пригодные для реализации как товарный продукт, что обеспечивает экономическую эффективность при реализации данной технологии. Срок окупаемости для усовершенствованной технологии плазменной утилизации отходов и способа обычной газификации одинаков, однако прибыль, при реализации усовершенствованной технологии плазменной утилизации отходов выше за счет получения топливных продуктов. Установка усовершенствованной технологии плазменной утилизации отходов позволяет компенсировать суточные и сезонные неравномерности потребления электроэнергии и тепла за счет обеспечения возможности хранения полученных топливных продуктов.

**Ключевые слова:** отходы, пиролиз, газификация, плазменная утилизация, синтез-газ, экономические показатели.

## ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАЗМОВОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ

**В. С. Дога**

Національний інститут економічних досліджень Академії наук Молдови  
вул. Іон Крянгэ, 45, Кишинів, MD-2064, Республіка Молдова

**В. В. Вамболь**

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»  
вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070, Україна. E-mail: violavambol@gmail.com

Показано економічну ефективність застосування технології плазмової утилізації відходів у порівнянні з іншими термічними способами. Як основні критерії вибору технології утилізації відходів, прийняті показники екологічної безпеки та економічної ефективності. У процесі утилізації відходів за вдосконаленою технологією отримують зріджений метан, синтетичний газ (94 % метану) і паливний газ для опалення, які є придатними для реалізації як товарний продукт, що забезпечує економічну ефективність при реалізації даної технології. Термін окупності для вдосконаленої технології плазмової утилізації відходів і способу звичайної газифікації однаковий, однак прибуток, при реалізації вдосконаленої технології плазмової утилізації відходів вищий за рахунок отримання паливних продуктів. Установка вдосконаленої технології плазмової утилізації відходів дозволяє компенсувати добові й сезонні нерівномірності споживання електроенергії й тепла за рахунок забезпечення можливості зберігання, паливних продуктів, які отримано при утилізації.

**Ключові слова:** відходи, піроліз, газифікація, плазмова утилізація, синтез-газ, економічні показники.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Количество отходов, образующихся в процессе производства и потребления продукции, велико и выбор технологии утилизации является ответственным этапом. Основные критерии выбора технологии утилизации отходов – показатели экологической безопасности и экономической эффективности. Объясняется это следующим. Реализация некоторых технологий может привести к снижению уровня экологической безопасности, что недопустимо, или оказаться экономически не эффективной.

При выборе технологии для утилизации отходов, как правило, отдают предпочтение термическим способам. Наиболее распространенные – инсинерация, пиролиз и газификация. Их реализация обеспечивает образование синтез-газа, при сжигании которого получают тепло и электроэнергию. Следовательно, такая утилизация не только снижает количество отходов, но и позволяет получить полезные продукты, что повышает экономическую эффективность процесса.

В то же время установки, реализующие данные способы обезвреживания и утилизации отходов не обеспечивают в полной мере экологическую безопасность, вследствие образования высокотоксичных соединений, например диоксинов и фуранов. Это приводит к необходимости применения дорогостоящего очистного оборудования для дополнительной обработки выбрасываемых газов и твердых остатков (шлаков).

Разложение высокомолекулярных токсичных веществ на простые молекулы в условиях экстремально высоких температур обеспечивает плазменная технология. При температуре плазменной струи полностью разрушаются любые органические и биологические материалы, а, следовательно, данная технология обеспечивает экологически чистую утилизацию отходов без образования токсичных смол и диоксинов. Продуктами плазменной газификации являются высококалорийный горючий газ и нейтральный твердый остаток в виде стекловидного шлака, для

которых не требуется дополнительное обезвреживание.

В своих работах многие ученые описали опыт использования плазменной технологии для переработки и обезвреживания твердых бытовых, промышленных и медицинских отходов [1–6]. Однако утилизация с применением плазменных генераторов является энергетически затратной по сравнению с процессами высокотемпературного пиролиза или обычной газификации. В работах [7–9] обозначено, что основными факторами, препятствующими широкому промышленному внедрению плазменных технологий для переработки отходов, являются недостаточно большой ресурс работы генераторов низкотемпературной плазмы, а также тот факт, что плазменный дуговой разряд является относительно локальным источником нагрева.

В своих научных исследованиях [10–12] авторами показано, что калорийность синтез-газа, полученного при утилизации отходов с применением низкотемпературной плазмы выше по сравнению с синтез-газом, полученным при пиролизе или обычной газификации отходов. В статье [13] сравнивается энергетическая эффективность процессов плазменной и автотермической газификации при температуре 1400 К для утилизации отходов. Показано, что дополнительный энергетический выход по синтез-газу, достигаемый за счет применения плазмотронов, при существующих методах преобразования энергии не может покрыть реальные затраты на потребляемое электричество.

В работах [14–15] авторами предложена усовершенствованная технология плазменной утилизации отходов, которая включает в себя следующие процессы: термохимическую газификацию, плазменное дожигание образовавшихся газов, резкое их охлаждение, предварительную очистку, метанирование, окончательную очистку газов и низкотемпературное разделение синтез-газа на топливные продукты.

Цель исследования – экономическая оценка технологического процесса плазменной утилизации отходов и обоснование целесообразности применения усовершенствованной плазменной технологии путем сравнения экономических показателей данной технологии с показателями других термических методов утилизации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- оценка экономической целесообразности применения плазменной утилизации отходов с точки зрения сроков окупаемости в сравнении с другими технологиями;

- исследование возможности использования топливных продуктов полученных в результате утилизации для снижения энергетических затрат и повышения экономической эффективности.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Описание усовершенствованной технологии плазменной утилизации отходов и схема установки

для ее реализации приведена в работах [14–15]. Данная технология предполагает не только получение тепла и электроэнергии из синтез-газа, но и дальнейшее обогащение его метаном, путем реализации процесса метанирования [16–17]. За метанированием, согласно описанной технологии, следуют процессы очистки обогащенного газа и его низкотемпературного разделения с целью получения топливных продуктов, пригодных для реализации [18]. Таким образом, продуктами, переработки отходов по данной технологии, в отличие от технологий пиролиза и обычной газификации, являются, помимо тепла и электроэнергии, сжиженный или газообразный метан и синтетический газ, содержащий метан, что позволяет компенсировать суточные и годовые неравномерности потребления электроэнергии путем создания запасов.

Итак, продуктами утилизации отходов при пиролизе или обычной газификации (технология 1) является электроэнергия, при усовершенствованной технологии плазменной утилизации отходов (технология 2) – электроэнергия, сжиженный метан и сжиженный синтетический газ. Оптовая цена получаемой продукции, была выбрана на основании цен, приведенных в Интернет-ресурсах. Цена продукции для технологии 1 определяется по стоимости эквивалентной электроэнергии и составляет 0,11 \$ за 1 кВт/ч, для технологии 2 – цена принята одинаковой для всех продуктов – 400 \$ за тонну. Кроме того в обеих технологиях есть твердый остаток – шлак.

Общий годовой доход определяем как сумму произведений цены продукта и количества произведенного продукта данного наименования на тонну сырья. Все расчеты выполняем в долларах США и оцениваем эффективность на тонну перерабатываемого сырья. При оценке стоимости электроэнергии за основу принят парогазовый цикл, т. к. дает меньший доход, чем газотурбинный. Кроме того, в доход включаем поступления от платы коммунальных служб за переработку отходов. Тогда, общий годовой доход в технологии 1 составит 84961 \$, а в технологии 2 – 127550 \$. Увеличение годового дохода обеспечивается за счет дополнительного продукта – сжиженного метана.

Установки, выполненные для реализации технологии 1 и технологии 2, различаются, прежде всего, капитальными вложениями. Установка по технологии 2 имеет большие капитальные вложения, чем по технологии 1. Это объясняется наличием в установке для реализации технологии 2 двух дополнительных блоков: метанирования и разделения газа. Кроме того, плазмотроны требуют применения мощных источников питания и системы управления. Результаты расчетов прибыли и сроков окупаемости установок при использовании обеих технологий приведены в табл. 1.

Результаты расчетов (столбцы 2 и 3, табл. 1) приведены с учетом капитальных вложений, необходимых для изготовления конкретной установки заданной производительности по перерабатываемому сырью.

Таблица 1 – Сравнение экономических показателей по двум технологиям

Показатели	Технология 1	Технология 2	Технология 1	Технология 2
1	2	3	4	5
Оптовая цена продукта				
метан сжиженный, \$/т сырья		400,00		400,00
синтетический газ сжиженный (метан 94 %), \$/т сырья		400,00		400,00
электроэнергия, \$/ кВт · ч	0,11	0,11	0,11	0,11
шлак, \$/т сырья	1,00	1,00	1,00	1,00
Количество продукта				
метан сжиженный, \$/т сырья		100,60		100,60
синтетический газ сжиженный (метан 94 %), \$/т сырья		37,13		37,13
электроэнергия, \$/т сырья (парогазовый цикл)	95,49	38,26	95,49	38,26
или				
электроэнергия, \$/т сырья (газотурбинный цикл)	134,28	53,81	134,28	53,81
шлак, \$/т сырья	0,10	0,10	0,10	0,10
металл, \$/т сырья		0,00		0,00
Поступления от переработки отходов, \$/т сырья	65,00	65,00	65,00	65,00
Доход от реализации продуктов, \$/т сырья	160,59	241,09	160,59	241,09
Общий годовой доход, \$	84961	127550	84961	127550
Капитальные вложения				
стоимость оборудования, тыс. \$	80	120,00	31,74	40,63
строительно-монтажные работы, тыс. \$	16	32,00	16	32,00
предпроизводственные затраты, тыс. \$	12	24,00	12	24,00
Всего капитальные затраты, тыс. \$	108,00	176,00	59,74	96,63
подлежат амортизации, тыс. \$	96,00	152,00	47,74	72,63
Эксплуатационные затраты, тыс. \$				
амортизационные отчисления (10 %), тыс. \$	9,60	15,20	4,77	7,26
капитальный ремонт (5 %), тыс. \$	4,80	7,60	2,39	3,63
текущий ремонт (1,6 %), тыс. \$	1,54	2,43	0,76	1,16
Потребление электроэнергии				
плазмотроны, кВт · ч /т		240,00		240,00
блок разделения и другие потребители	50	246,00	50	246,00
Сумма потребляемой электроэнергии	50,00	486,00	50,00	486,00
Тариф на электроэнергию, \$/ кВт · ч	0,11	0,11	0,11	0,11
Затраты на электроэнергию, тыс. \$	2,91	28,28	2,91	28,28
Заработная плата, тыс. \$	36,00	36,00	36,00	36,00
Начисления на зарплату (37,5 %), тыс. \$	13,50	13,50	13,50	13,50
Дополнительные затраты, тыс. \$	4,0	4,0	4,0	4,0
в том числе:				
инновационный фонд, тыс. \$	1,3	1,3	1,3	1,3
отчисления на содержание дорог, тыс. \$	1,2	1,2	1,2	1,2
другие, тыс. \$	1,5	1,5	1,5	1,5
Всего эксплуатационные затраты, тыс. \$	72,3	107,0	64,3	93,8
Прибыль, \$/т сырья	12615,0	20534,5	20625,6	33709,7
Окупаемость, лет	8,6	8,6	2,9	2,9

Капитальные вложения серийной установки переработки отходов с использованием плазмы определялись путем составления калькуляции расходов

с учетом действующих цен на комплектующее оборудование, изготовление нестандартного оборудования, зарплаты и прочих расходов с учетом НДС.

Для установки обычной газификации с получением синтез-газа, предназначенного для выработки электроэнергии капитальные вложения приняты в 1,5 раза меньше.

Соответственно строительно-монтажные работы и предпроизводственные затраты приняты по стоимости в 2 раза больше, т. к. связаны с большим количеством оборудования. Суммарные капиталовложения при использовании технологии 1 составляют 108 тыс. \$, а технологии 2 – 176 тыс. \$, что в 1,63 раза больше. Амортизации подлежат стоимость оборудования и строительно-монтажные работы.

Эксплуатационные расходы включают в себя:

1. Амортизационные отчисления, составляющие 10 % от капитальных вложений, подлежащих амортизации;

2. Затраты на капремонт – 5 %

3. Затраты на текущий ремонт – 1,6 %.

4. Затраты на электроэнергию. Потребление электроэнергии при использовании технологии 2 существенно больше. Здесь учитывалось потребление электроэнергии плазмотронами, блоком разделения газов и другими потребителями. В технологии 2 потребление электроэнергии плазмотронами принято исходя из опытных данных для установок компании Europlasma – 240 кВт·ч/т сырья.

Потребление электроэнергии в блоке разделения совместно с другими потребителями (компрессор для плазмообразующего газа) определено на основе расчета и составило 246 кВт·ч/т сырья. Суммарное потребление электроэнергии составляет 486 кВт·ч/т сырья.

В технологии 1 потребление электроэнергии принято равным 50 кВт·ч/т сырья, что почти в 10 раз меньше. Соответственно затраты на электроэнергию также в 10 раз меньше, чем при плазменном процессе.

Заработная плата принята одинаковой для обеих технологий. Обслуживающий персонал состоит из 6 человек, работает в течение 12 месяцев со средней зарплатой на каждого 500 \$ в месяц. Начисления на зарплату составляют 37,5 % в обоих случаях. Дополнительные затраты, связанные с отчислениями в инновационный фонд, расходы на содержание дорог, другие затраты приняты одинаковыми.

Суммарные эксплуатационные затраты составили 72,3 тыс. \$ для технологии 1 и 107 тыс. \$ для технологии 2. Таким образом, капиталовложения и эксплуатационные затраты на реализацию технологии 2 – плазменной технологии – значительно выше, чем для технологии 1 – обычной газификации.

Прибыль  $P$  рассчитана по формуле:

$$P = D - E, \quad (1)$$

где  $D$  – годовой доход;  $E$  – эксплуатационные затраты.

Срок окупаемости установки равен

$$T = KB_0 / P, \quad (2)$$

где  $KB_0$  – общие капиталовложения;  $P$  – прибыль.

Сравнение двух технологий показывает, что в обычной газификации по технологии 1 прибыль составляет 12615 \$, в технологии 2 – 20534,5 \$, что

в 1,6 раза больше. Срок окупаемости, рассчитанный по приведенной формуле, составляет 8,6 лет.

Для проверки были проведены дополнительные расчеты экономических показателей (столбцы 4 и 5, табл. 1). В этом случае оценка капитальных вложений производилась на основе работы [9], согласно которой капитальные вложения для технологии обычной газификации составляют 60 \$/т сырья, а для плазменной технологии – 96,63 \$/т сырья, что в 1,6 раза выше по сравнению с технологией обычной газификации и в 1,8 раза меньше, чем принято нами ранее для плазменной технологии.

Суммарные капиталовложения получились меньше, чем в первом случае, поскольку не учтено увеличение их при уменьшении производительности. Все остальные расчеты выполнены в соответствии с приведенными выше данными и формулами. Срок окупаемости в этом случае составил 2,9 лет.

**ВЫВОДЫ.** 1. На основе анализа исследований в этой области показана экологическая эффективность применения плазменной утилизации отходов по сравнению с другими термическими способами.

2. Предложенная усовершенствованная технология плазменной утилизации отходов более перспективна с точки зрения минимизации энергетических затрат, за счет того, что в плазменном реакторе обрабатывается не все сырье, а только его часть (не более 20 %).

3. При реализации усовершенствованной технологии плазменной утилизации отходов количество полученной электроэнергии меньше, чем по технологии 1. Однако в процессе обработки отходов по технологии 2, в отличие от технологии 1, получают полезные продукты, такие как сжиженный метан, синтетический газ (94 % метана) и топливный газ для отопления, пригодные для реализации.

4. Результаты расчетов показали, что срок окупаемости в обоих случаях одинаков, однако прибыль, при реализации усовершенствованной технологии плазменной утилизации отходов выше за счет получения топливных продуктов.

5. Установка усовершенствованной технологии плазменной утилизации отходов позволяет компенсировать суточные и сезонные неравномерности потребления электроэнергии и тепла путем создания топливных продуктов, пригодных для хранения и последующей реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование процесса плазменной газификации опасных и вредных отходов / С.В. Петров, С.Г. Бондаренко, Е.Г. Дидык, А.А. Дидык. – Режим доступа: <http://plazer.com.ua/docs/pdf/modeling.pdf>.

2. Утилизация органических, в том числе медицинских и других опасных отходов путем их пиролиза с применением паро-плазменного процесса «Плазер» / С.В. Петров, Г.С. Маринский, А.В. Чернец, В.Н. Коржик – Режим доступа: <http://plazer.com.ua/docs/pdf/utization.pdf>.

3. Бернадинер М. Н., Бернадинер И.М. Высокотемпературная обработка отходов. Плазменные источники энергии // Твердые бытовые отходы:

науч.-практ. журн. – 2011. – № 4. – С. 1–19. – Режим доступа: <http://www.solidwaste.ru/magazine/archive/shownumber/2011/4.html>.

4. Переработка упаковки с помощью термической плазмы / А.Л. Моссэ, В.В. Савчин, А.В. Ложечник // Твёрдые бытовые отходы: науч.-практ. журн. – 2008. – № 1. – С. 36–38. – Режим доступа: <http://www.solidwaste.ru/magazine/archive/shownumber/2008/1.html>.

5. Pragnesh N. Dave, Asim Joshi Plasma pyrolysis and gasification of plastics waste // A review Review Journal of Scientific & Industrial Research, 04/2010.

6. Leaching toxicity characteristics of municipal solid waste incineration bottom ash / Yi Xia, Hua Zhang, Liming Shao, Pinjing He // Frontiers of Environmental Science & Engineering, 09/2015.

7. Экологический аспект плазменной переработки твердых отходов / А.В. Артемов, А.В. Переславцев, Ю.А. Крутяков и др. // Экология и промышленность России. – 2011. – Сент. – С. 20–23. – Режим доступа: <http://www.kalvis.ru/katalog-izdanij/zhurnalyi/ekologiya-i-promyshlennost-rossii/arxiv/2011/%E2%84%969.html>.

8. Обеспечение экологической безопасности при обращении с отходами / В.В. Вамболь, В.Н. Кобрин, Н.В. Нечипорук // Междунар. науч.-исслед. журнал. – 2014. – № 12(31). – С. 8–11. – Режим доступа: <http://research-journal.org/issue/>.

9. Nickolas J. Themelis., Marco J. Castaldi Technical and economic analysis of thermal plasma-assisted Waste-to-Energy. – Columbia, Columbia University, 2010. – 80 p.

10. Properties and optimizing of a plasma gasification & melting process of municipal solid waste / Q. Zhang, L. Dor, W. Yang, W. Blasiak // Proceedings of international conference of thermal treatment technology & hazardous waste combustors (IT3/HWC). – San Francisco, California, USA. – 2010. – PP. 296–316.

11. Assessment of plasma gasification of high caloric waste streams / B. Lemmens, H. Elslander, I. Vanderreydt et al. // Waste Manage. – 2007. – Vol. 27(11). – PP. 1562–1569.

12. Integrated numerical and experimental study of a MCFC-plasma gasifier energy system / G. Falcucci, E. Jannelli, M. Minutillo et al. // Appl Energy. – 2012. – Vol. 97. – PP. 734–742.

13. Термическая утилизация твердых бытовых отходов / В.М. Батенин, В.И. Ковбасюк, Л.Г. Кротова, Ю.В. Медведев // Теплоэнергетика. – М.: 2011. – № 3. – С. 62–66.

14. Утилизация летательных аппаратов / Н.В. Нечипорук, В.Н. Кобрин, В.В. Вамболь. – Х.: ХАИ, 2014. – 303 с.

15. Система управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов / В.Н. Кобрин, Н.В. Нечипорук, В.В. Вамболь // Экологічна безпека. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 2/2014 (18). – С. 25–30.

16. Экологически чистая утилизация отходов жизнедеятельности / А.С. Чубенко, В.Н. Кобрин, В.В. Вамболь // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 62. – Х., 2014. – С. 98–102.

17. Чубенко А.С., Вамболь В.В. Экологически чистая переработка отходов с последующим метанированием продуктов плазменной газификации // Проблемы техносферной безопасности – 2014: междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 230–232.

18. Математическая модель энерготехнологической установки для разделения многокомпонентных газовых смесей / Ю.В. Шахов, И.И. Петухов, В.В. Вамболь // Вісник НТУ «ХП»: зб. наук. праць, серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 41 (1150). – С. 134–139.

19. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н.Л. Стаскевич, Г.Н. Северинец, Д.Я. Вигдорчик. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.

## ECONOMIC ANALYSIS OF THE IMPROVED TECHNOLOGY FOR PLASMA WASTE DISPOSAL

**V. Doga**

National Institute For Economic Research Academy of Sciences of Moldova,  
vul. Ion Creanga, 45, Chisinau Republic of Moldova, MD-2064

**V. Vambol**

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»  
vul. Chkalov, 17, Kharkiv, 61070, Ukraine. E-mail: violavambol@gmail.com

**Purpose.** Economic evaluation of the plasma waste utilization technological process, as well as an expediency substantiation of the use of advanced plasma technology by comparing its energy consumption with other thermal methods of utilization. **Methodology.** Analysis of existing modern and advanced methods of waste management and its impact on environmental safety. Considering of economic costs to implement two different waste management technologies. **Results.** The article describes the economic efficiency of plasma technology waste compared with other thermal techniques. As the main criteria for the selection of technologies of waste utilization it were accepted the indicators of ecological security and economic efficiency. Plasma technology provides decomposition of high-molecular toxic substances into simple molecules at extremely high temperatures. The proposed advanced technology of plasma waste utilization is more promising in terms of minimizing energy costs. During the process of waste utilization with the advanced technology we receive liquefied methane, synthesis gas (94 % methane) and the fuel gas for heating, suitable for sale as a commodity product that provides cost-effectiveness of the implementation of this technology. The payback period for the advanced technology of plasma waste utilization and process of conventional gasification is the same, but profits in case of implementation of advanced technologies of plasma waste utilization is higher due to producing fuel products. Installing the Advanced Technology Plasma Waste to compensate for daily and seasonal fluctuations of consumption of

electricity and heat by allowing the storage of fuel derived products. **Originality.** It is shown and evaluated economic efficiency of proposed plasma waste utilization technology compared with other thermal techniques. **Practical value.** It was considered and grounded of economic efficiency to implement two different waste management technologies, namely ordinary gasification and using plasma generators. Proposed plasma waste utilization technology allows to obtain useful products, such as liquefied methane, synthetic gas and a fuel gas for heating, which are suitable for sale. References 19, tables 1.

**Key words:** waste, pyrolysis, gasification, plasma recycle synthesis gas, economic performance.

REFERENCES

1. Petrov, S.V., Bondarenko, S.G., Didyk, Ye.G., Didyk, A.A. (2015), *Modelirovaniye protsessy plazmennoy gazifikatsii opasnykh i vrednykh otkhodov* [Simulation of plasma gasification of hazardous and hazardous waste], available at: <http://plazer.com.ua/docs/pdf/mo-deling.pdf> (accessed August 15, 2015).
2. Petrov, S.V., Marinskiy, G.S., Chernets, A.V., Korzhik, V.N. (2015), *Utilizatsiya organicheskikh, v tom chisle meditsinskikh i drugikh opasnykh otkhodov putem ikh piroliza s primeneniym paro-plazmennogo protsessy «Plazer»* [Recycling of organic, including medical and other hazardous waste through their pyrolysis using steam plasma process "PLAZER"], available at: <http://plazer.com.ua/docs/pdf/utizization.pdf> (accessed August 25, 2015).
3. Bernadiner, M.N. (2011), "High temperature treatment of waste. Plasma power sources", *Tverdyye bytovyye otkhody*, no. 4, pp. 1–19.
4. Mosse, A.L. (2008), "Processing package via the thermal plasma", *Tverdyye bytovyye otkhody*, no. 1, pp. 36–38.
5. Pragnesh, N.D. (2010), "Plasma pyrolysis and gasification of plastics waste", *Review Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 4, pp. 177–179.
6. Yi, Xia (2015), "Leaching toxicity characteristics of municipal solid waste incineration bottom ash", *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, vol. 9.
7. Artemov, A.V., Pereslavytsev, A.V., Krutyakov, YU.A. (2011), "The environmental aspect of the plasma processing of solid waste", *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, pp. 20–23.
8. Vambol, V.V., Kobrin, V.N., Nechiporuk, N.V. (2014), "Ensuring environmental safety in the handling of waste", *Mezhdunar. nauch.-issled. zhurnal*, no. 12(31), pp. 8–11.
9. Themelis, N.J., Castaldi, M.J. (2010), *Technical and economic analysis of thermal plasma-assisted Waste-to-Energy* [Technical and economic analysis of thermal plasma-assisted Waste-to-Energy], Columbia University, Columbia.
10. Zhang, Q., Dor, L., Yang, W., Blasiak, W. (2010), "Properties and optimizing of a plasma gasification & melting process of municipal solid waste", *Proceedings of international conference of thermal treatment technology & hazardous waste combustors (IT3/HWC)*, San Francisco, California, USA, pp. 296–316.
11. Lemmens, B., Elslander, H., Vanderreydt, I. et al. (2007), "Assessment of plasma gasification of high caloric waste streams", *Waste Manage.*, vol. 27(11), pp. 1562–1569.
12. Falcucci, G., Jannelli, E., Minutillo, M. et al. (2012), "Integrated numerical and experimental study of a MCFC-plasma gasifier energy system", *Appl Energy*, vol. 97, pp. 734–742.
13. Batenin, V.M., Kovbasyuk, V.I., Kretova, L.G., Medvedev, YU.V. (2011), "Thermal disposal of solid waste", *Teploenergetika*, no. 3, pp. 62–66.
14. Nechiporuk, N.V., Kobrin, V.N., Vambol, V.V. (2014), *Utilizatsiya letatel'nykh apparatov: monografiya* [Utilization of aircraft: monograph], KHAI, Kharkov, Ukraine.
15. Kobrin, V.N., Nechiporuk, N.V., Vambol, V.V. (2014), "The system of environmental safety management at the disposal of solid household and industrial waste", *Ecological safety*, vol. 2, no. 18, pp. 25–30.
16. Chubenko, A.S., Kobrin, V.N., Vambol, V.V. (2014), "Environmentally friendly disposal of wastes", *Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii*, vol. 62, pp. 98–102.
17. Chubenko, A.S., Vambol, V.V. (2014), "Environmentally friendly waste management with subsequent concreting plasma gasification products", *Problemy tekhnosfernoy bezopasnosti. Zbirnyk naukovykh Mizhnarodnoi nauково-tekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistiv* [Tehnosfernoy security problems. Conference proceedings of the International conference of students and young researches], Moscow, Akademiya GPS MCHS Rossii, pp. 230–232.
18. Shakhov, YU.V., Petukhov, I.I., Vambol, V.V. (2015), "Mathematical model of energy-technological plants for the separation of multicomponent gas mixtures", *Visnik NTU «KHPÍ»*, *Zbirnyk naukovykh prac Matematichne modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh*, vol. 41, no. 1150, pp. 134–139.
19. Staskevich, N.L., Severinets, G.N., Vigdorichik, D.YA. (1990), *Spravochnik po gazosnabzheniyu i ispol'zovaniyu Gaza* [Manual gas supply and use of gas], Nedra [Subsoil], Leningrad, Russia.

Стаття надійшла 27.09.2015.