

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

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

Проведен анализ существующих современных и перспективных способов обращения с отходами и их влияния на экологическую безопасность. Показана экологическая эффективность применения технологии плазменной утилизации отходов по сравнению с другими термическими способами. Рассмотрены энергетические затраты на реализацию двух разных технологий утилизации отходов, а именно обычной газификации и с применением плазменных генераторов. Для проведения энергетической оценки целесообразности применения рассматриваемых технологий сравнительный расчет проводился из стандартных условий. Исследования показали, обычная газификация обеспечила большую теплотворную способность вследствие наличия значительного количества азота, чем при плазменной газификации. С точки зрения минимизации энергетических затрат и обеспечения экологической безопасности более перспективной является предложенная усовершенствованная технология плазменной утилизации отходов. Это объясняется тем, что в процессе обработки отходов получают полезные продукты, такие как сжиженный метан, синтетический газ (94 % метана) и топливный газ для отопления, пригодные для реализации.

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

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАЗМОВОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ

В. В. Вамболь

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

Проведено аналіз існуючих сучасних і перспективних способів поводження з відходами та їх впливу на екологічну безпеку. Показана екологічна ефективність застосування технології плазмової утилізації відходів у порівнянні з іншими термічними способами. Розглянуто енергетичні витрати на реалізацію двох різних технологій утилізації відходів, а саме звичайної газифікації та із застосуванням плазмових генераторів. Для проведення енергетичної оцінки доцільності застосування розглянутих технологій порівняльний розрахунок проводився із стандартних умов. Дослідження показали, звичайна газифікація забезпечила більшу теплотворну здатність внаслідок наявності значної кількості азоту, ніж при плазмової газифікації. З точки зору мінімізації енергетичних витрат і забезпечення екологічної безпеки більш перспективною є запропонована вдосконалена технологія плазмової утилізації відходів. Це пояснюється тим, що в процесі оброблення відходів отримують корисні продукти, такі як зріджений метан, синтетичний газ (94% метану) і паливний газ для опалення, придатні для реалізації.

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

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Тема отходов многогранна. С одной стороны количество отходов, как источников формирования экологической опасности, велико и требуется их утилизация, с другой – реализация технологических процессов по их утилизации может снижать уровень экологической безопасности или процесс утилизации может оказаться энергетически и экономически не эффективным. Страны, которые намерены избегать захоронения отходов, не пригодных для вторичной переработки, отдадут предпочтение термическим способам обезвреживания и утилизации отходов, таким как инсинерация, пиролиз и газификация.

Их применение позволяет получить синтез-газ, в составе которого кроме окиси углерода (CO) и водорода (H₂), присутствуют такие компоненты, как двуокись углерода (CO₂), окислы азота (NO_x), небольшое количество метана (CH₄), этилен (C₂H₄) и др. Полученный низкокалорийный газ используют для непосредственного сжигания с целью получения тепла для хозяйственных нужд и выработки электроэнергии. Таким образом, применение тер-

мических способов утилизации отходов снижает их количество и позволяет получить полезные продукты в виде электроэнергии и теплоты.

В то же время установки, реализующие данные способы обезвреживания и утилизации отходов не обеспечивают экологическую безопасность, что приводит к необходимости дополнительной обработки выбрасываемых газов и твердых остатков (шлаков).

Альтернативой, названным способам, является плазменная технология, которая заключается в разложении высокомолекулярных токсичных веществ (диоксинов и фуранов) на простые молекулы в условиях экстремально высоких температур и при отсутствии свободного кислорода. При температуре плазменной струи полностью разрушаются любые органические и биологические материалы, гарантировано уничтожаются самые токсичные материалы, переплавляются и испаряются самые тугоплавкие неорганические соединения. Процесс плазменной газификации обеспечивает экологически чистую утилизацию отходов без образования

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

смола и диоксинов. Продуктом плазменной газификации является высококалорийный горючий газ и нейтральный твердый остаток в виде стекловидного шлака, не требующего дополнительной обработки.

Вопросы применения плазменных технологий для получения синтез-газа при утилизации различных видов отходов конкретизированы и детализированы в работах М. Н. Бернадинера, А. Н. Братцева, С. В. Петрова, И. М. Бернадинера, Г. С. Маринского, В. Н. Коржика, А. В. Чернеца и др. Технологическим переработки полимерных отходов посвящены работы А. С. Науменко, вопросам обезвреживания отходов медицинских учреждений в герметичной плазменной печи – работы А. М. Гонопольского, О. Л. Федорова, и др. Утилизации органических, медицинских и других отходов путем их пиролиза с применением паро-плазменного процесса и моделированию процесса плазменной газификации посвящены работы [1, 2].

Плазменная технология утилизации отходов предполагает большие затраты электроэнергии в отличие от процессов высокотемпературного пиролиза или газификации, которые используют в качестве топлива получаемый газ. Как показали исследования авторов, для плазменной утилизации отходов нужны затраты, сопоставимые со стоимостью производства первичной продукции [3]. В условиях массовой утилизации отходов и чрезвычайно высоких температур происходит быстрое изнашивание электродов плазменных генераторов и ввиду их небольшого ресурса требуется регламентное обслуживание плазмотронов [4].

С другой стороны экспериментально доказано, что синтез-газ, полученный при плазменной технологии утилизации более калорийный, чем при тра-

диционной газификации [5, 6, 7].

В работах [8, 9] авторами предложена технология, которая включает в себя следующие процессы: термохимическую газификацию, плазменную обработку газов, резкое охлаждение, предварительную очистку, метанирование, окончательную очистку газов и низкотемпературное разделение синтез-газа на топливные продукты.

Целью исследования является энергетическая оценка технологического процесса плазменной утилизации отходов, а также обоснование целесообразности применения усовершенствованной плазменной технологии путем сравнения энергетических затрат с другими термическими методами утилизации.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Проведем сравнительную оценку энергетических затрат на утилизацию отходов по технологии обычной газификации, назовем технология 1, и усовершенствованной технологии плазменной утилизации, назовем технология 2.

В усовершенствованной технологии плазменной утилизации отходов [8] реактор выполнен в виде двух камер, одна из которых является реактором газификации, а другая – плазменным реактором (рис. 1). В газификаторе осуществляется процесс высокотемпературной газификации отходов, после чего образовавшиеся продукты: парогазовая смесь (синтез-газ) и шлак подвергаются обработке в плазменной струе. Такая поэтапная обработка отходов позволяет сократить потребление электроэнергии, вследствие того, что в плазменном реакторе обрабатывается не все сырье, а только его часть (не более 20 %).

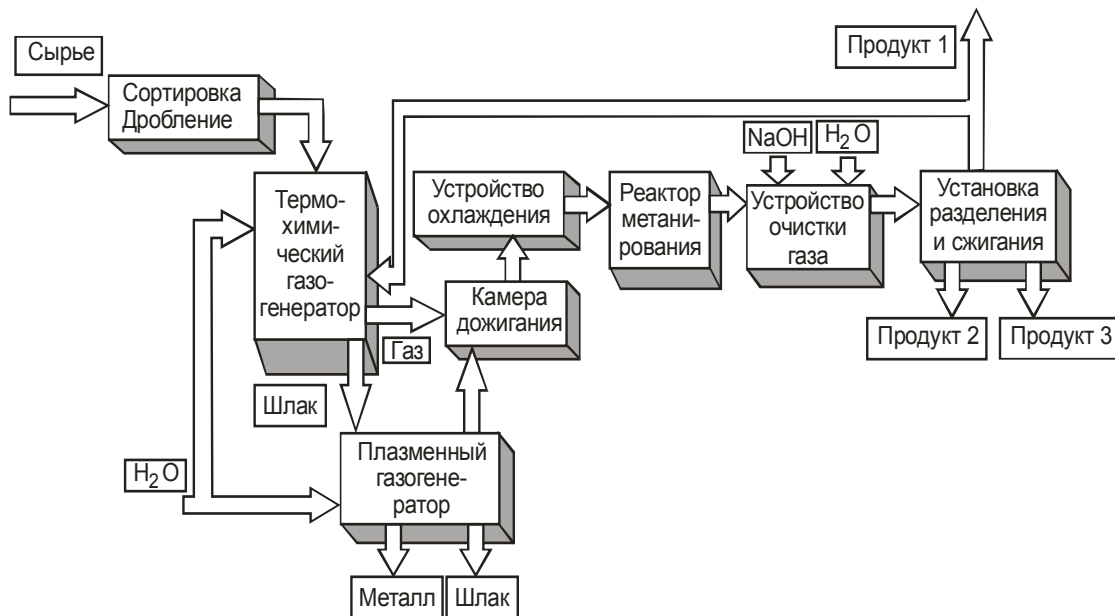


Рисунок 1 – Схема установки утилизации полимерных композиционных материалов

При дожигании в плазменном реакторе шлак превращается в экологически безопасную стекловидную массу, а синтез-газ, содержит в основном окись углерода и водород. Этот газ может исполь-

зоваться как топливный вместо метана для отопления и поддержания процесса газификации. Технология 2 предполагает также дальнейшее обогащение метаном полученного синтез-газа, путем реали-

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

зации процесса метанирования [10, 11], его очистку и низкотемпературное разделение для получения топливных продуктов, пригодных для реализации [12]. Таким образом, продуктами, переработки отходов по технологии 2 в отличие от технологии 1 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.

Для проведения энергетической оценки целесообразности применения технологии 2 сравнительный расчет проводился из стандартных условий, а именно был выбран наиболее типичный вариант и вид отходов – переработка твердых бытовых отходов производительностью 1,6 т/сут. (66,8 кг/ч, 529 т/год). Исходные данные и результаты сравнительных расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительная оценка по количеству производимой энергии

	Технология 1	Технология 2
Количество сырья кг/ч	66,80	66,80
Количество сырья т/сут	1,60	1,60
Количество сырья т/год	529,06	529,06
Продукты в час		
метан сжиженный, кг/сут		16,80
синтетический газ (94 % метана), кг/ч		6,20
топливный газ для отопления, кг/ч	60	37,10
шлак, кг/ч	6,8	6,68
Продукты в год (330 суток)		
метан сжиженный, т/год		133,06
синтетический газ (94 % метана), т/год		49,10
топливный газ для отопления, т/год	380,16	235,07
Состав, %		
N ₂	3	20,6
CH ₄	11	0,1
H ₂	31	31,14
CO	23	48,16
C ₂ H ₄	4	
CO ₂	28	
Низшая теплотворная способность, кДж/м ³	12584	9467
плотность, кг/м ³	0,96	0,827
Низшая теплотворная способность, кДж/кг	12081	7829
Низшая теплотворная способность, кВт.ч/кг	3,36	2,17
КПД парогенератора	0,9	0,9
Тепловая энергия, кВт · ч /ч	181,21	72,62
Тепловая энергия, кВт · ч /год	1435180	575123
КПД парового цикла	0,3200	0,3200
электроэнергия в паровом цикле, кВт · ч /год	459258	184039
или		
КПД газотурбинного цикла	0,45	0,45
электроэнергия в ГТ цикле, кВт · ч /год	645831	258805
шлак, т/год	53,86	52,91
Пересчет на 1 т сырья		
Продукты т на 1 т сырья		
метан сжиженный, т/т сырья		0,25
синтетический газ (94 % метана), т/т сырья		0,09
топливный газ для отопления, т/т сырья		0,44
тепловая энергия, кВт · ч /т сырья	2713	1087
электроэнергия в паровом цикле, кВт · ч /т сырья	868,07	347,86
или		
электроэнергия в ГТ цикле, кВт · ч /год	1220,72	489,18
шлак, т/т сырья	0,10	0,10

В результате утилизации отходов по технологии 1 образуется 60 кг/ч топливного газа и 6,8 кг/ч шлака. Продуктами данной технологии являются

тепло или электроэнергия.

При реализации технологии 2 получаем следующие продукты: сжиженный или газообразный

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

метан при давленні 25 МПа – 16,8 кг/сут., сжиженний или газообразний синтетический газ (94 % метана) – 6,2 кг/ч, топливный газ – 37,1 кг/ч, шлак – 6,8 кг/ч.

Для сопоставления двух технологий количество тепла выражаем в количестве эквивалентной электроэнергии.

Для определения количества электроэнергии и теплоты, которая может быть получена из топливного газа, необходимо задать его теплотворную способность, которая определяется составом газа.

Для технологии 1 типовой состав синтез-газа, который получается в процессе газификации ТБО, включает в себя компоненты: N₂ – 3 %, CH₄ – 11 %, H₂ – 31 %, CO – 23 %, C₂H₄ – 4 %, CO₂ – 28 %.

В технологии 2 принят наиболее неблагоприятный вариант, когда в качестве плазмообразующего газа используется воздух, поскольку образуется много азота, который балластирует топливный газ и снижает его теплотворную способность. Более целесообразным является использование водяного пара в этом случае азот и его окислы практически отсутствуют.

Состав топливного газа по технологии 2, полученный после отделения полезных продуктов в виде метана и синтетического газа: N₂ – 20,6 %, CH₄ – 0,1 %, H₂ – 31,14 %, CO – 48,16 %.

Низшая теплотворная способность топлива является аддитивной функцией и определяется, как сумма теплотворных способностей горючих компонентов, составляющих топливо [13]:

$$Q_n = Q_n^{CH_4} \cdot \gamma^{CH_4} + Q_n^{H_2} \cdot \gamma^{H_2} + Q_n^{CO} \cdot \gamma^{CO} + Q_n^{C_2H_4} \cdot \gamma^{C_2H_4}, \quad (1)$$

где Q_n^i – низшая теплотворная способность компонента; γ^i – объемная доля i-го компонента.

Низшая теплотворная способность на 1 кг топлива равна:

$$Q_{nm} = \frac{Q_n}{\rho}, \quad (2)$$

где ρ – плотность топлива, которая равна сумме плотностей долей компонентов, составляющих топливо. Значение их приведено в табл. 1.

Результаты расчетов показывают, что низшая теплотворная способность газа по технологии 1 составляет 12584 кДж/м³ (12081 кДж/кг), а по технологии 2 – 9467 кДж/м³ (7829 кДж/кг). Обычная газификация обеспечила большую теплотворную способность вследствие наличия значительного количества азота, чем при плазменной газификации.

Топливный газ направляется в парогенератор либо на сжигание в камере сгорания и далее на турбину для получения электроэнергии. Энергетическое сравнение производится по количеству эквивалентной электроэнергии, производимой топливным газом.

Рассматривается производство электроэнергии в паровом цикле и при непосредственном сжигании

топлива с использованием газовой турбины.

При расчете парового цикла принято, что КПД парогенератора равно 90 %, КПД парового цикла составляет 32 %, тогда количество полученной электроэнергии определяется по формуле:

$$E_{эл.эн.} = Q_n \cdot \eta_{пг} \cdot \eta_{пц}, \quad (3)$$

где Q_n – низшая теплотворная способность топливного (синтез) газа; $\eta_{пг}$ – КПД парогенератора; $\eta_{пц}$ – КПД парового цикла.

При получении электроэнергии на газотурбинной установке принято, что потери тепловой энергии составляют 10 %, а КПД газотурбинной установки равен 50 %. Количество полученной электроэнергии равно:

$$E_{эл.эн.} = 0,9 Q_n \cdot \eta_{гтц}, \quad (4)$$

где $\eta_{гтц}$ – КПД газотурбинного цикла.

Расчеты показали, что электроэнергия, произведенная в технологии 1 в паровом цикле составляет 868 кВт·ч/т сырья, в газотурбинном цикле – 1221 кВт·ч/т сырья. В технологии 2 количество электроэнергии составляет соответственно – 348 кВт·ч/т сырья и 489 кВт·ч/т сырья.

ВЫВОДЫ.

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

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.

ЛИТЕРАТУРА

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

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

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

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

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

5. Zhang, Q. Properties and optimizing of a plasma gasification & melting process of municipal solid waste [Text] / 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. – P. 296 – 316.

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

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

8. Утилизация летательных аппаратов [Текст] : [монография] / Н. В. Нечипорук, В. Н. Кобрин, В. В. Вамболь. – Х. : ХАИ, 2014. – 303 с.

9. Кобрин, В. Н. Система управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов [Текст] /

В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь // Экологічна безпека. – Кременчук : КрНУ, 2014. – Вип. 2/2014 (18). – С. 25 – 30.

10. Чубенко, А. С. Экологически чистая утилизация отходов жизнедеятельности [Текст] / 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.

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

12. Шахов, Ю. В. Математическая модель энерготехнологической установки для разделения многокомпонентных газовых смесей [Текст] / Ю. В. Шахов, И. И. Петухов, В. В. Вамболь // Вісник НТУ «ХПІ» : зб. наук. праць, серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 19 (1128). – С. 37 – 46.

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

ENERGY ANALYSIS OF ADVANCED TECHNOLOGY PLASMA WASTE DISPOSAL

V. Vambol

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

Purpose. Energy 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 energy costs to implement two different waste management technologies. **Results.** Studies have shown regular gasification ensure greater heating value due to differences, a significant amount of nitrogen than for plasma gasification. From the point of view of minimizing energy costs and environmental safety more promising is to offer advanced technology for plasma waste. To carry out the energy assessment of the appropriateness of the considered technologies-comparative calculation was carried out at the standard conditions. This is because in the processing of waste produced useful products, such as liquefied methane, synthetic gas (94% methane) and a fuel gas for heating, suitable for implementation. **Originality.** Shown and evaluated ecological efficiency of proposed plasma waste utilization technology compared with other thermal techniques. **Practical value.** Considered and grounded of energy costs 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 13, tables 1, figures 1.

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

REFERENCES

1. Modelirovaniye protsessa plazmennoy gazifikatsii opasnykh i vrednykh otkhodov [Elektronnyy resurs] / S. V. Petrov, S. G. Bondarenko, Ye. G. Didyk, A. A. Didyk. – Rezhim dostupa: ili URB: <http://plazer.com.ua/docs/pdf/modeling.pdf>.

2. Petrov, S. V. Utilizatsiya organicheskikh, v tom chisle meditsinskikh i drugikh opasnykh otkhodov

putem ikh piroliza s primeneniym paro-plazmennogo protsessa «Plazer» [Elektronnyy resurs] / S. V. Petrov, G. S. Marinskiy, A. V. Chernets, V. N. Korzhik – Rezhim dostupa: ili URB: <http://plazer.com.ua/docs/pdf/utization.pdf>.

3. Vambol, V. V. Obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti pri obrashchenii s otkhodami [Elektronnyy resurs] / V. V. Vambol, V. N. Kobrin,

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

N. V. Nechiporuk // Mezhdunar. nauch.-issled. zhurnal. – 2014. – № 12 (31). – S. 8 – 11. – <http://research-journal.org/issue/>.

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

5. Zhang, Q. Properties and optimizing of a plasma gasification & melting process of municipal solid waste [Text] / 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. – P. 296 – 316.

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

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

8. Utilizatsiya letatel'nykh apparatov [Tekst] : [monografiya] / N. V. Nechiporuk, V. N. Kobrin, V. V. Vambol. – KH. : KHAI, 2014. – 303 p.

9. Kobrin, V. N. Sistema upravleniya ekologicheskoy bezopasnost'yu pri utilizatsii tverdykh bytovykh i proizvodstvennykh otkhodov [Tekst] / V. N. Kobrin, N. V. Nechiporuk, V. V. Vambol //

Yekologichna bezpeka. – Kremenchuk : KrNU. – 2014. – Vyp. 2/2014 (18). – P. 25 – 30 .

10. Chubenko, A. S. Ekologicheskii chistaya utilizatsiya otkhodov zhiznedeyatel'nosti [Tekst] / A. S. Chubenko, V. N. Kobrin, V. V. Vambol // Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii : sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta im. N. Ye. Zhukovskogo «Khar'k. aviats. in-t». – Vyp. 62. – KH., 2014. – P. 98 – 102 .

11. Chubenko, A. S. Ekologicheskii chistaya pererabotka otkhodov s posleduyushchim metanirovaniyem produktov plazmennoy gazifikatsii [Tekst] / A. S. Chubenko, V. V. Vambol // Problemy tekhnosfernoy bezopasnosti - 2014: mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov. – M. : Akademiya GPS MCHS Rossii, 2014. – P. 230 – 232.

12. Shakhov, YU. V. Matematicheskaya model' energotekhnologicheskoy ustanovki dlya razdeleniya mnogokomponentnykh gazovykh smesey [Tekst] / YU. V. Shakhov, I. I. Petukhov, V. V. Vambol // Visnik NTU «KHPÍ»: zb. nauk. prats', seriya: Matematichne modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. – KH. : NTU «KHPÍ», 2015 – № 19 (1128). – P. 37 – 46.

13. Staskevich, N. L. Spravochnik po gazosnabzheniyu i ispol'zovaniyu Gaza [Tekst] / N. L. Staskevich, G. N. Severinets, D. YA. Vigdorichik. – L. : Nedra, 1990. – 762 p.