



ISSN 1993-3495 online

СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВЕ ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО
MODERN INDUSTRIAL AND CIVIL CONSTRUCTION

2023, ТОМ 19, НОМЕР 3, 79–86

EDN: ZEKHCO

УДК 628.475.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПИРОЛИЗА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ТВЁРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Ю. В. Копец

Институт строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля»,

Российская Федерация, Луганская Народная Республика,

291016, г. Луганск, ул. Октябрьская, д. 4.

E-mail: Yura_87-87@mail.ru

Получена 01 сентября 2023; принята 22 сентября 2023.

Аннотация. В настоящее время вопрос состояния экологии является одним из основных. Поэтому поиск новых решений, связанных с системой обращения отходов, является всегда актуальным. В данной статье рассмотрена целесообразность использования технологии пиролиза органических твердых коммунальных отходов в городе Луганске, Луганской агломерации. Аппаратом для исследования процесса является испытательный стенд для утилизации органических отходов с электродуговым нагревом. Перечислены основные технологические параметры процесса утилизации. Проведено комплексное исследование процесса пиролиза. Уточнено, что исследование проходило в четыре этапа: – этап I. Определение оптимальных энергетических параметров процесса переработки; – этап II. Исследование влияния его продолжительности на процесс утилизации; – этап III. Определение влияния избыточного давления в реторте на протекание процесса; – этап IV. Исследование влияния отдельных компонентов отходов на протекание физико-химических процессов пиролиза. По результатам исследования подобраны наиболее эффективные параметры его протекания.

Ключевые слова: твёрдые коммунальные отходы, пиролиз, экология, утилизация, технология утилизации, проблема утилизации.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПІРОЛІЗУ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВМІСНИХ ТВЕРДИХ КОМУНАЛЬНИХ ВІДХОДІВ

Ю. В. Копец

Институт будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства

ФДБОУ ВО «Луганський державний університет ім. В. Даля»,

Російська Федерація, Луганська Народна Республіка,

291016, м. Луганськ, вул. Жовтнева, буд. 4.

E-mail: Yura_87-87@mail.ru

Отримана 01 вересня 2023; прийнята 22 вересня 2023.

Анотація. В даний час питання стану екології є одним з основних. У поданій статті розглянуто доцільність використання технології піролізу органічних твердих комунальних відходів у місті Луганську, Луганській агломерації. Апаратурою досліджуваного процесу є випробувальний стенд для утилізації органічних відходів з електродуговим нагріванням. Перераховані основні технологічні параметри процесу утилізації. Проведено комплексне дослідження процесу піролізу. Дослідження проходило у чотири етапи: – етап I. Визначення оптимальних енергетичних параметрів процесу переробки; – етап II. Дослідження впливу його тривалості на процес утилізації. – етап III. Визначення впливу надлишкового тиску в



реторти на перебіг процесу; – етап IV. Дослідження впливу окремих компонентів відходів на перебіг фізико-хімічних процесів піролізу. За результатами дослідження підібрані найбільш ефективні параметри його протікання.

Ключові слова: тверді комунальні відходи, піроліз, екологія, утилізація, технологія утилізації, проблема утилізації.

STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING PYROLYSIS FOR THE DISPOSAL OF CARBON-CONTAINING SOLID MUNICIPAL WASTE

Iurii Kopets

Institute of Construction, Architecture and Housing and Communal Services

FSBEI HE «Lugansk State University named after V. Dahl»,

Russian Federation, 291016, Lugansk, Oktyabrskaya st., 4.

E-mail: Yura_87-87@mail.ru

Received 01 September 2023; accepted 22 September 2023.

Abstract. Currently, the issue of the state of ecology is one of the main ones. Therefore, the search for new solutions related to the waste management system is always relevant. This article discusses the feasibility of using the technology of pyrolysis of organic solid municipal waste in the city of Lugansk, Lugansk agglomeration. The apparatus for studying the process is a test bench for the disposal of organic waste with electric arc heating. The main technological parameters of the recycling process are listed. A comprehensive study of the pyrolysis process has been carried out. It was clarified that the study took place in four stages: – stage I. Determination of the optimal energy parameters of the processing process; – stage II. Study of the influence of its duration on the recycling process; – stage III. Determination of the influence of overpressure in the retort on the course of the process; – stage IV. Study of the influence of individual waste components on the course of physicochemical processes of pyrolysis. According to the results of the study, the most effective parameters of its course were selected.

Keywords: municipal solid waste, pyrolysis, ecology, recycling, recycling technology, recycling problem.

Формулировка проблемы

На сегодняшний день вопрос об экологической безопасности стоит, как никогда, остро. С каждым годом количество несанкционированных свалок растет. В 2018 году по указу президента РФ был принят Национальный проект «Экология», задачами которого являются:

- формирование комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами, включая ликвидацию свалок и рекультивацию территорий, на которых они размещены, создание условий для вторичной переработки всех запрещенных к захоронению отходов производства и потребления;
- создание и эффективное функционирование во всех субъектах РФ системы общественного контроля, направленной на выявление и ликвидацию несанкционированных свалок;
- создание современной инфраструктуры, обеспечивающей безопасное обращение с

отходами I и II классов опасности, и ликвидация наиболее опасных объектов накопленного экологического вреда [1].

Проблема полной или частичной утилизации твердых коммунальных отходов актуальна прежде всего с позиции отрицательного воздействия на окружающую среду. Ведь твердые коммунальные отходы – это богатый источник вторичных ресурсов, а также – «бесплатный» энергоноситель, так как бытовой мусор – возобновляемое углеродсодержащее энергетическое сырье для топливной энергетики. Одним из перспективных направлений в области утилизации отходов является пиролиз [7, 8].

Для ответа на вопрос об эффективности применения этого метода и установки для его осуществления необходимо провести комплексное исследование процесса утилизации и определить параметры его протекания, эффективные с учетом экономической целесообразности и полноты утилизации [2, 3, 11].

Цель исследования

Целью данного исследования является эффективное обращение с твердыми коммунальными отходами путем их утилизации методом пиролиза.

Основной материал

К основным технологическим параметрам процесса утилизации относятся:

- характеристики электродугового разряда, то есть параметры электрического тока, подаваемого на электроды реторты (сила тока, напряжение);
- продолжительность процесса утилизации;
- избыточное давление, возникающее в реторте в результате процесса пиролиза;
- диаметр и материал используемых электродов (как уже было сказано, весь цикл испытаний проводился на одинаковых графитовых электродах диаметром 14 и 30 мм);
- свойства исходного сырья, определяемые количественными и качественными показателями – компонентный состав отходов [4,12].

Модель углеродосодержащих отходов использовалась при экспериментальных работах как материал со следующими параметрами (% вес):

- относительная влажность 38,55 %;
- зольность влажного осадка 8,3 %;
- элементный состав (в пересчете на органическое вещество) (% вес): углерод – 52, кислород – 38,5, водород – 7, азот – 2, сера – 0,5.

Исследования по изучению возможности переработки отходов с использованием процесса пиролиза проводились в 4 этапа.

Этап I. Определение оптимальных энергетических параметров процесса переработки.

Этап II. Исследование влияния его продолжительности (4, 10, 20 и 30 мин) на процесс утилизации.

Этап III. Определение влияния избыточного давления в реторте на протекание процесса.

Этап IV. Исследование влияния отдельных компонентов отходов на протекание физико-химических процессов пиролиза.

Результатом работы на каждом этапе является получение конкретных результатов по оптимизации параметров процесса.

На первом этапе для выполнения циклов экспериментальных исследований приняты следующие значения мощности тока, который тратится на утилизацию отходов:

$$\begin{aligned} N_1 &= 0,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (I_1 = 150 \text{ А}; U_1 = 21 \text{ В}), \\ N_2 &= 1,07 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (I_2 = 200 \text{ А}; U_2 = 25 \text{ В}), \\ N_3 &= 1,43 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (I_3 = 250 \text{ А}; U_3 = 29 \text{ В}). \end{aligned}$$

За определяющий параметр эффективности процесса пиролиза принимались относительные проценты переработки органической и жидкой (влага) фаз отходов (рис. 1).

При увеличении силы тока со 150 до 200 А процент переработки органической и жидкой (влага) фаз значительно возрастает. Дальнейшее увеличение силы тока электродугового разряда не приводит к существенному изменению

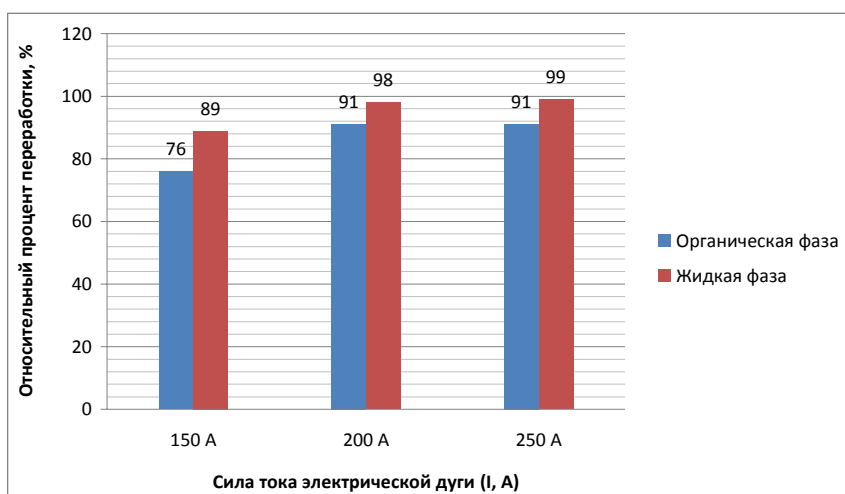


Рисунок 1 – Зависимость относительного процента переработки органической и жидкой фаз отходов от силы тока электрической дуги (I, А).

значений процента переработки. Отсюда можно сделать вывод, что технологический процесс в лабораторной установке наиболее эффективен при токе, подаваемом на электроды, $I = 200$ А и напряжении $U = 25$ В, что подтверждается количеством и скоростью выхода пиролизного газа.

На втором этапе экспериментальных исследований процесса определено необходимое время утилизации, при котором гарантируется степень

переработки отходов практически 100 %. То есть скорость газовой выделенной должна быть примерно равна нулю, что достигается (при $M = 500$ г) через 45 мин эксперимента (рис. 2).

По результатам анализа полученных данных можно оценить сложную форму процесса (рис. 2). На первой, второй и третьей минуте происходит интенсивное газовыделение. После этого наблюдается снижение скорости газообразования.

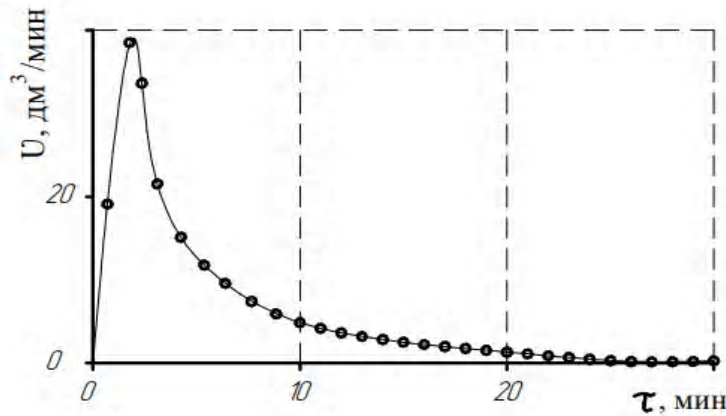


Рисунок 2 – Зависимость скорости выхода пиролизного газа (v) от времени проведения опыта (τ).

Математически процесс можно описать следующими формулами:

С первой по третью минуту:

$$v = a - \frac{0,1 \cdot I}{\tau} \cdot k, \quad (1)$$

где a – максимальная скорость газовой выделенной при непрерывном процессе (для $I = 150, 200, 250$ А, $a = 31, 42, 45$ $\text{дм}^3/\text{мин}$ соответственно),

k – переводной коэффициент, $\text{дм}^3/\text{А}$.

С четвертой по десятую минуту:

$$v = 18,5 \cdot c \cdot e^{-b\tau}, \quad (2)$$

где b – коэффициент, определяемый силой тока дугового разряда (для $I = 150, 200, 250$ А, $b = 190, 370, 390$ $1/\text{мин}$ соответственно),

c – переводной коэффициент, $\text{дм}^3/\text{мин}$.

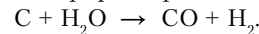
Анализ полученных экспериментальных данных позволяет принять продолжительность процесса утилизации t равной 10 мин.

Это объясняется тем, что в процессе переработки за 10 минут выделяется объем газа, V , около 150 дм^3 , а в последующие 20 минут всего около 40 дм^3 . Тогда как в последнем случае удельный расход энергии на перерабатываемую единицу массы вещества возрастает более чем в 2 раза.

На третьем этапе исследовано влияние избыточного давления в реакторе пиролиза на процесс утилизации.

Исследования на этом этапе проводились при избыточных давлениях (P , МПа): 0,025; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35 и 0,4. По результатам экспериментов получены зависимости изменения объема образующегося пиролизного газа при различных избыточных давлениях (рис. 3).

Газовая фаза, выделяющаяся в начале эксперимента, создает избыточное давление в реакторе пиролиза. Установлено, что в течение первых двух минут опыта выделяется большое количество (около 100 г) паров воды, которые по реакции не успевают прореагировать с углеродом:



Создание избыточного давления приводит к задержке выхода паров воды из реактора в начальный момент эксперимента. Они реагируют с углеродом, что приводит к увеличению объема образующегося газа.

При повышении избыточного давления до 0,3 МПа вступают в реакцию практически все пары воды. Дальнейшее повышение давления приводит к уменьшению выхода газообразной фазы.

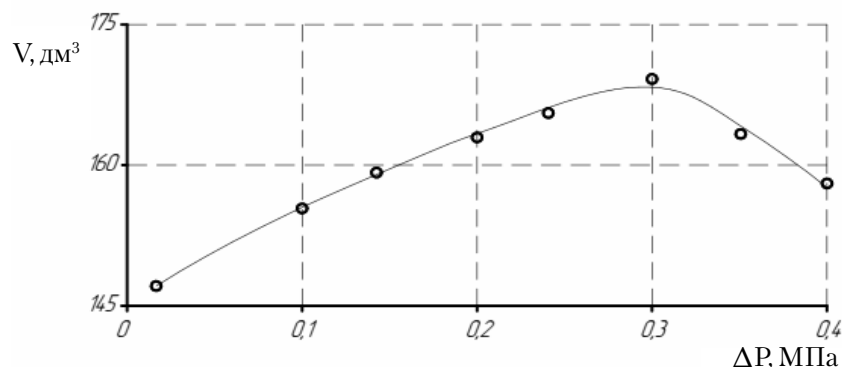


Рисунок 3 – Зависимость средних значений объема выделившегося газа (V) от избыточного давления в реакторе (ΔP).

По результатам анализа экспериментальных данных третьего этапа можно сделать вывод о необходимости проведения процесса при избыточном давлении (ΔP), равном 0,3 МПа.

На четвертом этапе исследовался процесс пиролиза для разных (раздельных) компонентов модели органических отходов.

Процесс пиролиза осуществлен при значении тока, подаваемого на электроды $I = 200$ А, и напряжении $U = 25$ В. Продолжительность испытаний принята равной $t = 10$ мин. Массу загружаемых компонентов составили – картофель 225 г, бумага 200 г, опилки и пластик 75 г. Из-за разного начального веса загружаемого материала одним из анализируемых значений является

объем выхода газа на единицу перерабатываемой массы (рис. 4).

Анализ полученных данных показал, что процесс пиролиза наиболее эффективен при переработке опилок и бумаги.

По результатам исследований четырех экспериментальных этапов можно утверждать, что предлагаемый способ при реализации на лабораторной установке наиболее эффективен при утилизации органических отходов посредством дугового разряда током 200 А и напряжением 25 В. При этом оптимальное время утилизации составляет 10 минут, а для снижения выхода жидкой фазы и некоторого увеличения выхода пиролизного газа в реакторе необходимо создать

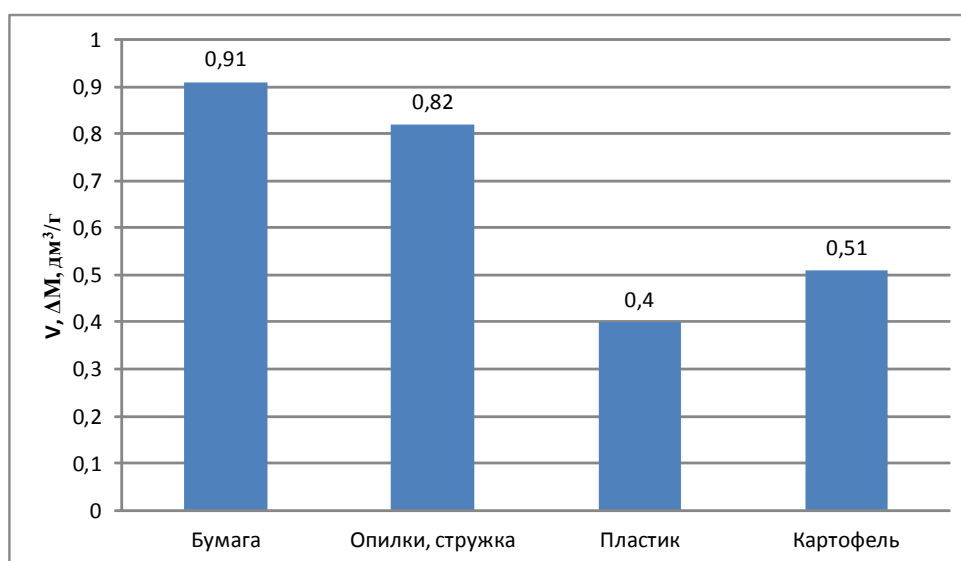


Рисунок 4 – Зависимость удельного объема выхода газа на единицу переработанной массы ($V/\Delta M$) от отдельных компонентов отходов.

избыточное давление порядка 0,3 МПа. Наибольшая эффективность процесса пиролиза достигается при использовании в качестве исходного материала опилок и бумаги [9, 10].

Математическая обработка результатов экспериментальных данных выполнена методом Стьюдента с использованием программы MathCad. Относительная погрешность результатов всех серий измерений не превышает 10 % [5].

На первых трех этапах состав газообразных продуктов варьировался в пределах абсолютной погрешности измерения (по ГОСТ она составляет 1 %) и представляет собой следующую газовую смесь (% об.): водород – 43; оксид углерода – 41; диоксид углерода – 7; метан – 4,5; азот – 3,5; кислород – 0,5; углеводороды ($C_2 - C_5$) – 0,5.

На рисунке 5 показан процентный выход компонентов пиролизного газа на четвертом этапе эксперимента.

Изменение состава газа варьируется в зависимости от загружаемого сырья, но в основном это смесь четырех газовых компонентов: водорода, метана, оксида и диоксида углерода. Концентрация метана (за исключением утилизации

опилок) и диоксида углерода изменяется незначительно, а содержание водорода и оксида углерода в газе сильно варьирует в зависимости от загружаемого материала. Концентрация оксида углерода высока, когда сырьем являются бумага и опилки [6]. При использовании пластика в качестве исходного материала отмечается увеличение концентрации углеводородов ($C_2 - C_3$) до 5 %.

Выводы

В целом из рассмотренного состава получаемого газа можно сделать вывод, что предлагаемый способ является одним из наиболее эффективных способов утилизации органических отходов и позволяет получить горючий газ с теплотворной способностью не менее 10 МДж/м³. При этом исключается образование экологически вредных веществ при сжигании газа. КПД процесса утилизации можно оценить в 35–40 %. Пиролиз позволяет значительно уменьшить объемы складированных отходов, подвергавших подземному складированию, не нарушая экологическую безопасность окружающей среды.

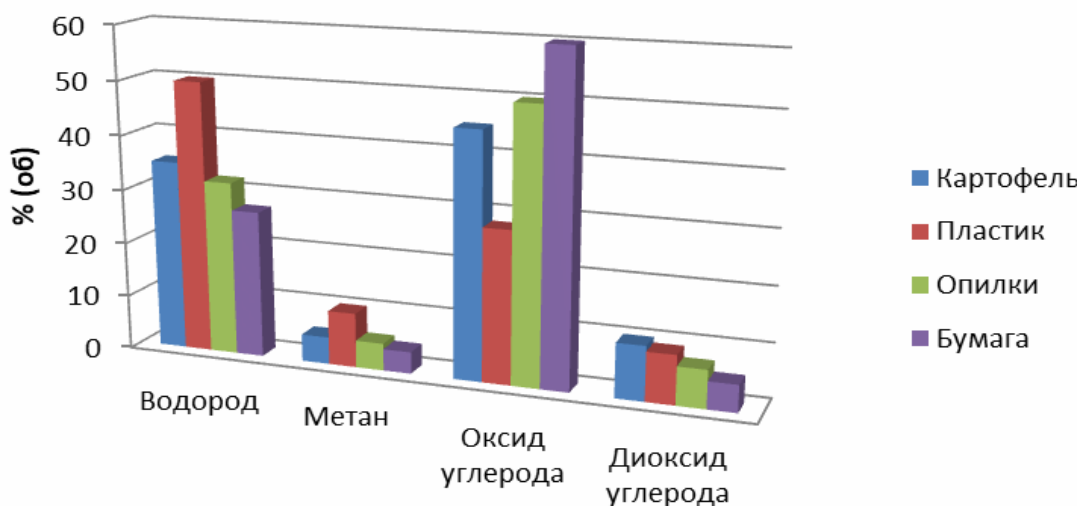


Рисунок 5 – Процентный выход газов в зависимости от исходного сырья.

Литература

1. Паспорт национального проекта : Национальный проект «Экология». – Текст : электронный // Storage.strategy24.ru : [сайт]. – 2019. – 30 с. – URL: <https://storage.strategy24.ru/files/project/202103/c17fa2a7029b87455d21730428a5689.pdf> (дата обращения: 12.06.2023).
2. Болобова, А. А. Основы комплексного управления твердыми бытовыми отходами / А. А. Болобова. – Текст : электронный // Мониторинг окружающей среды и безопасность жизнедеятельности человека : [сайт]. – 2012. – С. 405–406. – URL: http://www.mivlgu.ru/conf/zvorykin2012/pdf/Section_11.pdf (дата обращения: 15.06.2023).
3. Дрозд, Г. Я. Развитие сектора обращения с твердыми бытовыми отходами на Луганщине – настоятельная необходимость / Г. Я. Дрозд. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2017. – Выпуск 48. – С. 16–28.
4. Лобачев, Г. К. Вторичные ресурсы: проблемы, перспективы, технология, экономика : учебное пособие / Г. К. Лобачев, В. Ф. Желтобрюхов. – Волгоград : ВолГТУ, 1999. – 180 с. – Текст : непосредственный.
5. Клинков, А. С. Утилизация и вторичная переработка тары и упаковки из полимерных материалов / А. С. Клинков, П. С. Беляев. – Тамбов : ТГТУ, 2010. – 100 с. – Текст : непосредственный.
6. Мухина, Т. Н. Пиролиз углеводородного сырья / Т. Н. Мухина. – Москва : Книга по Требованию, 2019. – 237 с. – Текст : непосредственный.
7. Jordan, C. A. Occurrence, composition and dew point of tars produced during gasification of fuel cane bagasse in a downdraft gasifier / C. A. Jordan, G. Akay. – Текст : непосредственный // Biomass and Bioenergy Journal, 2012. – Volume 42. – P. 51.
8. Royte, E. Garbage Land: On the Secret Trail of Trash / E. Royte. – New York and Boston : Little, Brown and Company, 2005. – 311 p. – ISBN 0-316-73826-3. – Текст : непосредственный.
9. Oasmaa, A. Fast pyrolysis of forestry residue: Storage stability of liquid fuel / A. Oasmaa, E. Kuoppala. – Текст непосредственный // Energy Fuels. – 2003. – Volume 17, № 17. – P. 1075–1084.
10. Costner, P. Playing with fire. Hazardous waste incineration : Greenpeace Report / P. Costner, J. Thornton. – Washington, DC : Greenpeace, 1991. – 48 p. – Текст : непосредственный.
11. Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China / J. Dong, Y. Tang, A. Nzihou [et al.]. – Текст : непосредственный // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Volume 203. – P. 287–300.
12. Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor / A. Lopez I. de Marco, B. M. Caballero, M. F. Laresgoiti [et al.]. – Текст : непосредственный // Chemical Engineering Journal. – 2011. – Volume 173. – P. 62–71.

References

1. Passport of the national project : National project «Ecology». – Text : electronic // Storage.strategy24.ru : [site]. – 2019. – 30 p. – URL: <https://storage.strategy24.ru/files/project/202103/c17fa2a7029b87455d21730428a5689.pdf> (date of access: 12.06.2023). (in Russian)
2. Bolobova, A. A. Fundamentals of integrated management of solid household waste. – Text : electronic // Environmental monitoring and human safety. – [site]. – 2012. – P. 405–406. – URL: http://www.mivlgu.ru/conf/zvorykin2012/pdf/Section_11.pdf (date of access: 15.06.2023). (in Russian)
3. Drozd, G. Ya. The development of the solid waste management sector in the Luhansk region is an urgent need. – Text : direct. – In: *Collection of scientific works of the Donbass State Technical University*. – Issue 48. – 2017. – P. 16–28. (in Russian)
4. Lobachev, G. K.; Zheltobryukhov V. F. Secondary resources: problems, prospects, technology, economics : textbook. – Volgograd : VolGTU, 1999. – 180 p. – Text : direct. (in Russian)
5. Klinkov, A. S.; Belyaev, P. S. Utilization and secondary processing of containers and packaging made of polymeric materials. – Tambov : TSTU, 2010. – 100 p. – Text : direct. (in Russian)
6. Mukhina, T. N. Pyrolysis of hydrocarbon raw materials. – Moscow : Book on Demand, 2019. – 237 p. – Text : direct. (in Russian)
7. Jordan, C. A.; Akay G. Occurrence, composition and dew point of tars produced during gasification of fuel cane bagasse in a downdraft gasifier. – Text : direct. – In: *Biomass and Bioenergy Journal*. – 2012. – Volume 42. – P. 51.
8. Royte, E. Garbage Land: On the Secret Trail of Trash. – New York and Boston : Little, Brown and Company, 2005. – 311 p. – ISBN 0-316-73826-3. – Text : direct.
9. Oasmaa, A.; Kuoppala, E. Fast pyrolysis of forestry residue: Storage stability of liquid fuel. – Text : direct. – In: *Energy Fuels*. – 2003. – Volume 17, № 17. – P. 1075–1084.
10. Costner, P.; Thornton, J. Playing with fire. Hazardous waste incineration : Greenpeace Report. – Washington, DC : Greenpeace, 1991. – 48 p. – Text : direct.
11. Dong, J.; Tang, Y.; Nzihou, A. [et al.]. Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China. – Text : direct. – In: *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Volume 203. – P. 287–300.
12. Lopez I. de Marco, A.; Caballero, B. M.; Laresgoiti, M. F. [et al.]. Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor. – Text : direct. – In: *Chemical Engineering Journal*. – 2011. – Volume 173. – P. 62–71.

Конец Юрий Витальевич – старший преподаватель кафедры промышленного, гражданского строительства и архитектуры Института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля». Научные интересы: утилизации сточных вод, утилизация твёрдых бытовых отходов.

Конец Юрий Віталійович – старший викладач кафедри промислового, цивільного будівництва та архітектури Інституту будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства ФДБОУ ВО «Луганський державний університет ім. В. Даля». Наукові інтереси: утилізації стічних вод, утилізація твердих побутових відходів.

Kopets Iurii – Senior Lecturer at the Department of Industrial, Civil Engineering and Architecture; Institute of Construction, Architecture and Housing and Communal Services of the FSBEI HE «Lugansk State University named after V. Dahl». Scientific interests: waste water disposal, solid waste disposal.