

## Технико-экономическое обоснование технологии утилизации органических и неорганических углеродсодержащих отходов методом пиролиза

*О.А. Мишустин, С.Б. Хантимирова, Н.В. Грачева, В.Ф. Желтобрюхов*

*Волгоградский государственный технический университет*

**Аннотация:** В данной статье рассматриваются вопросы применения технологий утилизации отходов, их технологическая и эколого-экономическая оценка. Проведен анализ российского и зарубежного опыта их применения. Приведена схема производственного комплекса с использованием технологии пиролиза, ориентированного не только на переработку отходов, но и получение востребованного полезного конкурентоспособного продукта.

**Ключевые слова:** экология, технология пиролиза, переработка отходов, твердые коммунальные отходы, ТКО, биотопливо.

Использование природных ресурсов, необходимых для производства энергии, различных продуктов и услуг ведет к их неуклонному истощению, а так же, образованию и накоплению большого количества отходов, негативно влияющих на окружающую среду. Кроме того, с повышением уровня потребления невозобновляемых природных ресурсов становится актуальным вопрос применения ресурсосберегающих технологий в сфере переработки отходов. Учеными было разработано значительное количество технологий, отвечающих данному требованию, но не все из них являются эффективными с точки зрения технико-экономических и экологических показателей [1].

Значительная доля отходов, образующихся в связи с человеческой деятельностью, насыщены углеродом: твердые коммунальные отходы (ТКО), отходы химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Ежегодно в развитых странах образуется около 2,5 млрд. тонн углеродсодержащих отходов. Из них, на территории Российской Федерации образуется более 650 млн. тонн углеродсодержащих отходов, на территории США - более 550 млн. тонн, в европейских странах – более 740 млн. тонн, в Японии – более 450 млн. тонн [2].

Необходимо отметить, что органические и неорганические углеродсодержащие отходы могут быть разделены на нетоксичные, токсичные и обладающие бактериологической или эпидемиологической опасностью. Следовательно, к ним неприменим достаточно распространенный метод обращения с отходами – размещение на полигонах. В устоявшейся мировой практике для обезвреживания и утилизации ТКО и иных органических и неорганических углеродсодержащих отходов принято использовать термические, химические, биологические и физико-химические методы [2]. Общемировая практика обращения с отходами предполагает глубокую сортировку и разделение потоков отходов на подлежащие рециклингу, регенерации и рекуперации, а также подлежащие обезвреживанию (Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 29.07.2018) "Об отходах производства и потребления" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2019) // consultant.ru, 2018, URL: [consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_19109/bb9e97fad9d14ac66df4b6e67c453d1be3b77b4c/](http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/bb9e97fad9d14ac66df4b6e67c453d1be3b77b4c/)). В силу данного фактора и высокой культуры населения по обращению с отходами, в развитых странах, обезвреживанию или захоронению подлежит лишь 4-38% от общей массы отходов. Лидерами по данному показателю являются Швеция, Германия, Япония и США [3]. В Российской Федерации наибольшее распространение, после захоронения на полигонах, получили термические методы обезвреживания: сжигание, газификация и пиролиз [4, 5].

Сжигание – наиболее технологичный и распространенный способ обезвреживания отходов, использующий печи различной конструкции при температуре от 1200°C. Метод подразумевает преобразование отходов в золу, дымовой газ и тепловую энергию. Зола в основном состоит из неорганических веществ и может быть в виде твердых кусков или пыли, переносимой дымовым газом и относится к III классу опасности. Дымовые

---

газы предполагают очистку от частиц и газообразных загрязнений перед выбросом их в атмосферу. Выделяемое в процессе тепло может быть использовано при производстве пара и электроэнергии. Сжигание сокращает количество отходов на полигонах, уменьшая их массу на 95-96%.

Процесс сжигания отходов также имеет ряд недостатков: в процессе переработки отходов образуются значительное количество атмосферных выбросов, содержащих токсичные компоненты и требующие применения дорогостоящих технологий очистки; высокие затраты на создание предприятия и его обслуживания.

Необходимо отметить, что на территории Российской Федерации из-за недостаточно тщательной предварительной сортировки отходов, эффективность процесса сжигания не превышает 2% от общего объема образования отходов. Обязательность и полезность сортировки отходов обосновывается возможностью извлечения компонентов для вторичного использования [2, 6]. В развитых странах Европы, в Японии и США обезвреживанию методом сжигания подлежат только те отходы, которые невозможно подвергнуть таким методам утилизации, как рециклинг, рекуперация и регенерация [7]. Таким образом, высокая эффективность метода сжигания, применяемого в развитых странах, обосновывается тщательной сортировкой образующихся отходов.

Газификация – малораспространенный способ переработки, заключающийся в переводе отходов из жидкого и твердого состояния в газообразное. Процесс происходит при температуре свыше 1100°C, в присутствии окислителя. При помощи данной реакции возможно получение некоторого количества генераторного газа, используемого в качестве топлива, для выработки тепла и электрической энергии, при определенных условиях метод может использоваться при переработке некоксуемых углей. Следует заметить, что данный способ неприменим для

---

обезвреживания неподготовленных отходов, что вместе с высокой стоимостью оборудования 265-500 млн. евро и его обслуживания, порядка 10-15% от начальных капиталовложений, делает данный метод экономически невыгодным. Данный недостаток привел к закрытию либо переоборудованию большинства заводов в Японии и Европе. Также, недостатком технологии является низкий выход синтез-газа и значительное содержание тяжелых металлов в отходящих газах и зольном остатке [8].

Пиролиз – способ переработки отходов, заключающийся в процессе разложения веществ при высокой температуре в отсутствие кислорода. Можно выделить низкотемпературный (до 850°C) и высокотемпературный пиролиз (от 900°C). При повышении температуры происходит интенсификация процесса газификации отходов, а также, значительное снижение выхода жидких и твердых продуктов. По сравнению с обезвреживанием отходов методом сжигания, пиролиз имеет ряд серьезных преимуществ. В окружающую среду не поступают продукты горения отходов. Одним из основных видов сырья являются твердые коммунальные отходы, органические и углеродсодержащие неорганические отходы промышленности. Продукты, получаемые в результате пиролиза, не содержат в себе агрессивных веществ и могут быть подвергнуты регенерации. Такой способ обращения с отходами способствует созданию эффективного оборота твердых коммунальных отходов. Состав получаемых на выходе продуктов зависит от применяемого сырья и вида пиролиза [9, 10]. Пример источников углеродсодержащих отходов, подлежащих переработке методом пиролиза, их состав и калорийность приведены на рис. 1. Приведенные данные показывают, что средняя расчетная калорийность массы отсортированных отходов (~2550-3100 ккал/кг), пригодных для переработки методом пиролиза, сопоставима с калорийностью торфяной крошки (2590 ккал/кг) и бурого угля (3100 ккал/кг),

---

что эквивалентно 0,276 л дизельного топлива, 0,294 л мазута или 0,356 м<sup>3</sup> природного газа.

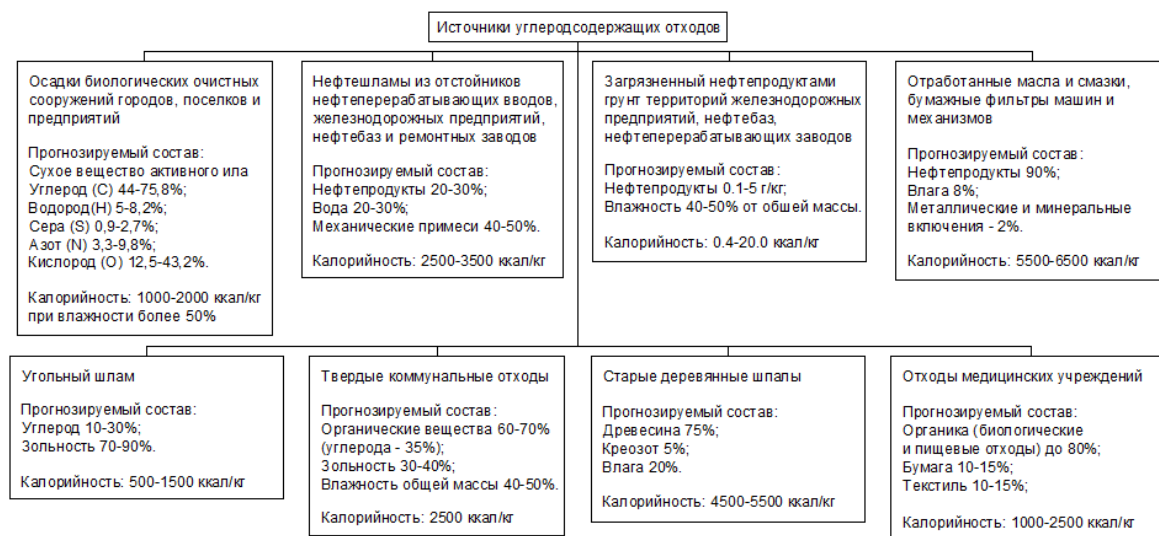


Рис 1. – Источники углеродсодержащих отходов подлежащих переработке методом пиролиза [2]

На рис. 2 представлена принципиальная схема производственного комплекса, основанного на применении технологии пиролиза и нацеленного на получение выгоды от реализации продуктов реакции.

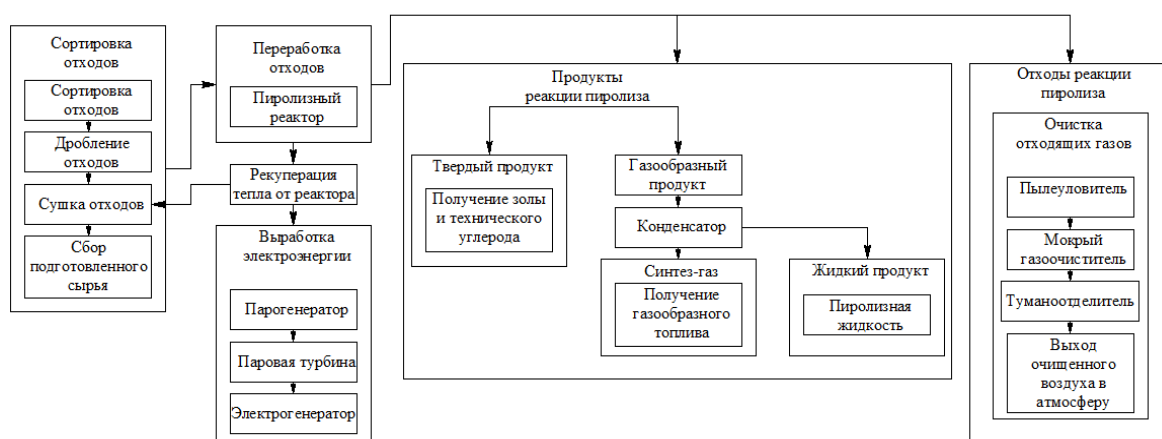


Рис. 2. – Принципиальная схема комплекса по переработке отходов методом высокотемпературного пиролиза

Для обеспечения наибольшей эффективности работы комплекса по переработке отходов, процесс разделен на несколько стадий:

1. Обработка отходов, включающая в себя процессы сортировки отходов, выделения из общей массы высокотоксичных отходов, а также отходов подлежащих вторичному использованию, согласно действующему законодательству. Отходы, подходящие для переработки методом пиролиза, подвергаются дроблению на более мелкие фракции, с целью гомогенизации массы отходов для оптимального прохождения реакции. Гомогенизированная масса отходов поступает в сушильные камеры и затем транспортируется в бункера-хранилища подготовленного сырья.

2. Подготовленное сырье дозировано поступает в пиролитический реактор, где в зависимости от оборудования и технологического процесса может быть подвергнуто низкотемпературному, либо высокотемпературному пиролизу.

3. Пиролиз требует затрат только для очистки отходящих в атмосферу топочных газов.

4. Основным продуктом реакции пиролиза является синтез-газ. По выходу из реактора газообразный продукт проходит через очистное оборудование и поступает в блок конденсаторов, где разделяется на синтез-газ и жидкую фракцию (конденсат). Синтез-газ проходит цикл очистки, в результате которого получается готовое к использованию газообразное топливо, которое можно использовать в качестве альтернативы природному газу. Полученный конденсат, или пиролизная жидкость, насыщен углеводородами, обладает горючестью, но характеризуется отсутствием стабильных физико-химических свойств, и различиями в химическом составе, в зависимости от производственной установки и состава отходов. Пиролизная жидкость может применяться в качестве печного топлива, однако, использование для непосредственной замены дизельного топлива или бензина, невозможно без специальной обработки, например, методом первапарации [11, 12]. Твердый непиролизуемый остаток, представляет

---

собой смесь золы и технического углерода, которые после разделения могут использоваться в строительной области, металлургии и химической промышленности. Продукты сгорания, отходящие из топочных устройств реактора, могут использоваться для выработки пара, применяющегося как в процессе реакции, так и для получения электроэнергии.

Прогнозируемый выход продуктов реакции пиролиза, получаемых при переработке 1 тонны твердых коммунальных отходов, представлен на рис. 3. Показано, что 1 тонна твердых коммунальных отходов, при переработке методом пиролиза, практически не оставляет отходов и способствует возвращению в цикл производства и потребления большого количества полезных компонентов, применяемых в роли сырья для создания различных продуктов на замену природному сырью.



Рис. 3. – Диаграмма выхода продуктов реакции при пиролизе 1 тонны  
ТКО [14]

Таким образом, переработка больших объемов отходов методом пиролиза является перспективным методом защиты окружающей среды. Данная технология позволит значительно снизить отрицательное влияние человека на окружающую среду и частично решит проблему замещения природного ископаемого топлива.

## Литература

1. The green fuel from carbon waste: optimization and product selectivity model studies // Springerlink, 2018. URL: [link.springer.com/article/10.1007/s40789-018-0211-8](http://link.springer.com/article/10.1007/s40789-018-0211-8).
  2. Учебно-методический комплекс по курсу «Введение в специальность: Инженерная защита окружающей среды» // Document Base.net, 2013. URL: [documentbase.net/2280449](http://documentbase.net/2280449).
  3. Управление в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами: современное состояние // ecotrends.ru, 2016. URL: [ecotrends.ru/index.php/eco/article/view/1602](http://ecotrends.ru/index.php/eco/article/view/1602).
  4. Шеина С.Г., Бабенко Л.Л., Неделько С.С. и др. Система управления твердыми бытовыми отходами с использованием ГИС-технологий // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1258](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1258).
  5. Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов жилого фонда в городах России // rpn.gov.ru, 2012, URL: [rpn.gov.ru/results\\_reports](http://rpn.gov.ru/results_reports).
  6. Ламзина И.В., Голдов А.В., Князев Я.И. и др. Эколого-экономическое обоснование использования Refused Derived Fuel, как альтернативного топлива для цементной промышленности // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2332](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2332).
  7. Организация утилизации и переработки бытовых отходов в Европе, США и Японии // ropecon.ru, 2017, URL: [ropecon.ru/otrivki/865-organizacija-utilizacii-i-pererabotki-bytovyh-othodov-v-evrope-ssha-i-japonii.html](http://ropecon.ru/otrivki/865-organizacija-utilizacii-i-pererabotki-bytovyh-othodov-v-evrope-ssha-i-japonii.html).
  8. Erratum to: Study of plasma off-gas treatment from spent ion exchange resin pyrolysis // SpringerLink, 2018. URL: [link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-9027-0](http://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-9027-0).
-





9. Пиролиз-Экопром. Печное топливо // piroliz-ecoprom.ru, 2015, URL: piroliz-ecoprom.ru/печное-топливо/.

10. Waste Tire Pyrolysis: Influential Parameters and Product Properties // SpringerLink, 2014, URL: link.springer.com/article/10.1007%2Fs40518-014-0019-0.

11. Буртная И.А., Гачечиладзе О.О., Ружинская Л.И. Первапорационное разделение продуктов переработки изношенных шин. Статья первая. // Промышленный сервис. 2012. № 2. С. 2-4.

12. Переработка пиролизной жидкости в дизельное топливо // blending.globecore.ru, 2018. URL: blending.globecore.ru/peregonka-piroliznoj-zhidkosti-v-dize/.

13. Оборудование для утилизации отходов // pirolizeco.ru, 2017, URL: pirolizeco.ru/utilizaciya-tbo/.

### References

1. The green fuel from carbon waste: optimization and product selectivity model studies SpringerLink, 2018. URL: link.springer.com/article/10.1007/s40789-018-0211-8.

2. Uchebno-metodicheskiy kompleks po kursu «Vvedeniye v spetsial'nost': Inzhenernaya zashchita okruzhayushchey sredy» [Educational-methodical complex for the course «Introduction to the specialty: Engineering environmental protection»] Document Base.net, 2013, URL: documentbase.net/2280449.

3. Upravleniye v sfere obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami: sovremennoye sostoyaniye [Management in the field of solid waste management: the current state] ecotrends.ru, 2016. URL: ecotrends.ru/index.php/eco/article/view/1602.

4. Sheina S.G., Babenko L.L., Nedelko S.S. and others. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1258.



5. Obosnovaniye vybora optimal'nogo sposoba obezvrezhivaniya tverdykh bytovykh otkhodov zhilogo fonda v gorodakh Rossii [Justification of the choice of the optimal method of disposal of municipal solid waste in the cities of Russia]. rpn.gov.ru, 2012. URL: [rpn.gov.ru/results\\_reports](http://rpn.gov.ru/results_reports).

6. Lamzina I.V., Goldov A.V., Knyazev Ya.I. and others. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2332](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2332).

7. Organizatsiya utilizatsii i pererabotki bytovykh otkhodov v Yevrope, SShA i Yaponii [Organization of recycling and recycling of household waste in Europe, USA and Japan]. popecon.ru, 2017, URL: [popecon.ru/otrivki/865-organizacija-utilizacii-i-pererabotki-bytovyh-othodov-v-evrope-ssha-i-japonii.html](http://popecon.ru/otrivki/865-organizacija-utilizacii-i-pererabotki-bytovyh-othodov-v-evrope-ssha-i-japonii.html).

8. Erratum to: Study of plasma off-gas treatment from spent ion exchange resin pyrolysis SpringerLink, 2018. URL: [link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-9027-0](http://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-9027-0).

9. Piroliz-Ekoprom. Pechnoye toplivo [Pyrolysis-Ecoprom. Heating oil] piroliz-ecoprom.ru, 2015. URL: [piroliz-ecoprom.ru/печное-топливо/](http://piroliz-ecoprom.ru/печное-топливо/).

10. Waste Tire Pyrolysis: Influential Parameters and Product Properties SpringerLink, 2014. URL: [link.springer.com/article/10.1007%2Fs40518-014-0019-0](http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40518-014-0019-0).

11. Burtmaya I.A., Gachechiladze O.O., Ruzhinskaya L.I. Promyshlenny servis. 2012. № 2. pp. 2-4.

12. Pererabotka piroliznoy zhidkosti v dizel'noye toplivo [Processing of pyrolysis liquid into diesel fuel] blending.globecore.ru, 2018. URL: [blending.globecore.ru/peregionka-piroliznoj-zhidkosti-v-dize/](http://blending.globecore.ru/peregionka-piroliznoj-zhidkosti-v-dize/).

13. Oborudovaniye dlya utilizatsii otkhodov [Equipment for waste disposal] pirolizeco.ru, 2017. URL: [pirolizeco.ru/utilizaciya-tbo/](http://pirolizeco.ru/utilizaciya-tbo/).