DOI: 10.15593/24111678/2016.03.08

УДК 504.064

С.В. Польшгалов, Г.В. Ильных, Я.И. Вайсман

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ СОРТИРОВКИ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

Приведен краткий обзор технологий оптического распознавания различных материалов, применяемых в сортировке отходов. В частности, рассмотрены рентгеновская трансмиссия, рентгенофлуоресцентный анализ, лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия, спектроскопия в видимой области, ближняя инфракрасная спектроскопия, терагерцевая спектроскопия и микроволновая спектроскопия. Для идентификации немагнитных и неметаллических материалов представлены датчики, работающие с проникающим или отраженным излучением в разных диапазонах длин волн. Рассмотрены основные возможности сортировки твердых коммунальных отходов при помощи датчиков, работающих в ближней инфракрасной и видимой областях спектра, которые позволяют существенно увеличить производительность процесса по сравнению с ручной сортировкой и идентифицировать компоненты, которые не могут быть выделены визуально. Представлен компонентный состав смешанных, отдельно собранных и экскавированных отходов (отходы, экскавированные из тела полигона твердых коммунальных отходов, пролежавшие там 3–5 лет) с точки зрения оценки их ресурсного потенциала и выбора направлений использования, основными из которых являются вторичное сырье и твердое топливо из бытовых отходов. В качестве вторичного сырья были выделены следующие компоненты, которые пользуются спросом у потребителей: картон, бумага, полиэтиленовая (ПЭ) тара, полиэтиленовая пленка, полиэтилентерефталатная (ПЭТ) бутылка, полипропиленовая (ПП) пленка. Представлена доля компонентов твердого топлива из бытовых отходов, а именно: картона, бумаги, ПЭ тары, ПЭ пленки, ПЭТ бутылки, ПП пленки, прочего пластика, текстиля, дерева, тетрапака, кожи, резины и обуви.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, сортировка твердых коммунальных отходов, оптическая сортировка, смешанные отходы, отдельно собранные отходы, экскавированные отходы.

S.V. Polygalov, G.V. Il'nykh, Ia.I. Vaisman

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

POSSIBILITIES OF SOLID WASTE OPTICAL SORTING

This article provides a brief overview of the optical character recognition technology of various materials used in the sorting of waste, in particular, consider the X-ray transmission, X-ray fluorescence analysis, laser-induced breakdown spectroscopy, visual spectrometry, near infrared spectroscopy, terahertz spectroscopy and microwave spectroscopy. To identify nonmagnetic and nonmetallic materials represented sensors operating with or penetrating the reflected radiation in different wavelength ranges. The basic possibilities of municipal solid waste sorting using sensors operating in the near infrared and visible regions of the spectrum, which can significantly increase the productivity of the process compared to manual sorting and identification of components that can not be distinguished visually. Presented component composition mixed, separately collected and excavated waste (waste

from the body excavated landfill of municipal solid waste that had lain there 3–5 years) in terms of the assessment of the resource potential of waste and the choice of directions of its use. The main directions of use – raw materials and solid recovered fuels from waste. As a raw material allocated the following components: cardboard, paper, polyethylene (PE) containers, plastic film, polyethylene terephthalate (PET) bottle, polypropylene (PP) film, which are in demand by consumers. The proportion by the solid recovered fuel components from the waste represented, namely cardboard, paper, packagings PE, PE films, PET bottles, PP film, other plastics, textiles, wood, tetrapack, leather, rubber and footwear.

Keywords: municipal solid waste, municipal solid waste sorting, optical sorting, mixed waste, separately collected waste, excavated waste.

По данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, объем образования твердых коммунальных отходов (ТКО) в 2012 г. составил 53,12 млн т, в 2014 г. – 56,68 млн т, однако объем использования и обезвреживания ТКО увеличился с 3,67 до 4,26 млн т в 2012 и 2014 гг. соответственно [1]. Основная доля ТКО подвергается захоронению на несанкционированных свалках и специализированных полигонах, что способствует загрязнению окружающей среды за счет поступления эмиссий в атмосферный воздух, подземные и поверхностные воды и выщелачивания загрязняющих веществ. Для решения этой проблемы разрабатывают различные программы по обращению с отходами, которые позволяют рационально управлять ими как с экологической, так и с экономической точки зрения.

Важным элементом в современной системе обращения с отходами является сортировка, которая решает ряд вопросов. Во-первых, при сортировке уменьшается количество отходов, которые размещаются на объектах захоронения, что приводит к сокращению затрат и снижению нагрузки на окружающую среду. Во-вторых, извлеченные вторичные ресурсы повторно вовлекаются в производственный цикл после соответствующей подготовки, что ведет к экономии первичных материальных и энергетических ресурсов. Промышленная сортировка ТКО обычно осуществляется на мусоросортировочных комплексах, а ее аппаратное оформление зависит от объемов и компонентного состава отходов и финансовых возможностей. Для сортировки отходов первоначально применялся исключительно ручной труд (работники визуально определяли нужные компоненты и вручную выделяли их из общего потока). Подобная схема до сих пор используется на многих сортировочных заводах в России. В европейских странах линии сортировки отходов обычно оборудованы установками оптического сканирования. Подобные технологии постепенно внедряются и в России (например, на заводе по механизированной переработке бытовых отходов

(Янино, Санкт-Петербург) данная технология работает в опытном режиме [2]).

В основе оборудования оптической сортировки лежит использование систем распознавания (идентификации) нужных компонентов по их специфическим химическим и/или физическим характеристикам (датчики и технологии сканирования) и систем выделения, которые позволяют извлекать различные материалы по команде системы распознавания (выдуть воздухом, захватывать, перемещать и т.п.). Такое автоматическое оборудование дает возможность извлекать компоненты с гораздо более высокой производительностью, идентифицировать и выделять материалы, не различимые глазом человека.

Для идентификации немагнитных и неметаллических материалов большое распространение получили датчики, работающие с проникающим (рис. 1, а) или отраженным (рис. 1, б) излучением в разных диапазонах длин волн (рис. 2).

Рис. 1. Датчик, работающий с проникающим излучением (а); датчик, работающий с отраженным излучением (б)

Рис. 2. Шкала электромагнитного излучения

На рис. 3 представлена классификация датчиков/технологий идентификации материалов в зависимости от спектра и свойств лучистой энергии и взаимодействия материалов с ней.

Рис. 3. Классификация датчиков/технологий оптического распознавания материалов

Рентгеновская трансмиссия (англ. X-ray transmission, XRT), или рентгеновская абсорбция, – технология сенсорной сортировки, основанная на способности рентгеновских лучей проникать сквозь материалы. Данная технология позволяет идентифицировать пластики (в том числе черные), черные и цветные металлы, древесину и инертные материалы [3, 4].

Рентгенофлуоресцентный анализ (англ. X-ray fluorescence, XRF). Под флуоресценцией понимают наблюдаемое у твердых тел явление, при котором падающее электромагнитное излучение частично поглощается и затем вновь испускается в виде излучения равной или большей длины волны. В случае рентгеновской флуоресценции возникает вторичное рентгеновское излучение, вызванное первичным рентгеновским излучением. При облучении пробы мягким рентгеновским излучением характерные для каждого атома длины волн в зоне рентгеновского излучения исходят в виде флуоресцентного свечения. С помощью сортировки, основанной на рентгенофлуоресцентном анализе, можно выделять такие компоненты, как пластик, черные и цветные ме-

таллы, древесину и инертные материалы. Использование технологии рентгеновского излучения предполагает обязательное применение систем защиты во избежание негативных воздействий на здоровье персонала [3, 4].

Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия (англ. laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS) – один из методов атомно-эмиссионного спектрального анализа, в котором используют спектры плазмы лазерного пробоя (лазерной искры) для анализа твердых образцов, жидкостей, газовых сред, взвешенной пыли и аэрозолей. При помощи лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии можно определять пластики, черные и цветные металлы [5].

Спектроскопия в видимой области (англ. visual spectrometry, VIS) – технология распознавания материалов по цвету, которая позволяет определять материал, сравнивая спектральную характеристику отраженного от поверхности распознаваемого материала светового сигнала с информацией, содержащейся в базе данных системы. Изучаемый материал облучается монохроматическим светом (т.е. светом с одинаковой длиной волны) при помощи специальных ламп или лазеров. Сортировка, основанная на спектроскопии в видимой области, позволяет разделять компоненты (пластики, стекло, черные и цветные металлы) по цвету.

Ближняя инфракрасная спектроскопия (англ. near infrared spectroscopy, NIR) – технология распознавания материалов, основанная на поглощении излучения поверхностью, способная идентифицировать материалы без контакта с ними и без их разрушения. Источником излучения обычно служит галогенная лампа с вольфрамовой нитью. Инфракрасное излучение проникает в материал пробы на определенную глубину, поэтому посторонние вещества в виде наклеек или грязи не мешают процессу измерения. Данная технология идентифицирует бумагу, картон, пластики, текстиль, древесину, инертные материалы и тетрапак [6].

Терагерцевая спектроскопия (англ. terahertz spectroscopy, THz) основана на когерентном детектировании импульсов терагерцевого излучения, прошедшего через образец. При помощи сортировки, основанной на терагерцевой спектроскопии, выделяются следующие компоненты: бумагу, картон, пластик и древесину.

Микроволновая спектроскопия (англ. microwave spectroscopy, microwave) изучает сверхвысокочастотное излучение в диапазоне радио-

частот, примыкающее к инфракрасному. Данное электромагнитное излучение относится к неионизирующему и включает в себя дециметровый, сантиметровый и миллиметровый диапазоны радиоволн (длина волны – от 1 м (частота 300 МГц) до 1 мм (частота 300 ГГц)). Технология позволяет определять из компонентов только пластик [7].

В зависимости от своих особенностей каждый метод сортировки, основанный на электромагнитном излучении, наиболее подходит для идентификации только некоторых компонентов. Одним из наиболее универсальных и получивших наибольшее распространение методов сортировки является спектроскопия в ближней инфракрасной области (NIR), которая способна выделять широкий перечень различных компонентов.

Специалистами кафедры охраны окружающей среды Пермского национального исследовательского политехнического университета при помощи лабораторного комплекса оптической сортировки, которая снабжена системой датчиков и сенсоров, работающих в ближней инфракрасной и видимой области спектра, выполняются различные исследования в данном направлении. Лабораторный комплекс оптической сортировки позволяет задавать параметры сортировки, в том числе перечень требуемых компонентов вторичного сырья и/или компонентов для твердого топлива из бытовых отходов [8–10].

Определение компонентного состава смешанных, отдельно собранных и экскавированных отходов (отходы, экскавированные из тела полигона твердых коммунальных отходов, пролежавшие там 3–5 лет) интересно с точки зрения оценки их ресурсного потенциала и выбора направлений дальнейшего использования. Для выполнения таких исследований были отобраны образцы отходов, которые оценивались с точки зрения доли вторичного сырья и компонентов для твердого топлива из бытовых отходов (англ. refuse derived fuel, RDF).

В рамках экспериментальных исследований были выделены следующие компоненты вторичного сырья, пользующиеся спросом у потребителей: картон, бумага, полиэтиленовая тара, полиэтиленовая пленка, полиэтилентерефталатная бутылка, полипропиленовая пленка. Результаты исследования доли вторичного сырья для разных потоков отходов представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что содержание ресурсно-ценных компонентов в отдельно собранных отходах (около 70 %) в 1,5 раза выше, чем в смешанных, и почти в 5 раз больше, чем в экскавированных отходах.

Низкая доля ресурсно-ценных компонентов в экскавированных отходах объясняется тем, что отходы слишком загрязненные, достаточно влажные и частично разложившиеся (бумага и картон).

Рис. 4. Доля ресурсно-ценных компонентов в разных отходах

Важной особенностью оптической сортировки является возможность распознавать компоненты, нежелательные по той или иной причине. В частности, поливинилхлорид (ПВХ) не должен попадать в поток топлива из отходов (RDF), так как при его сжигании образуются крайне токсичные соединения. Идентификация ПВХ при ручной сортировке основана на субъективных признаках и знаниях (например, рабочие проинструктированы, что линолеум обычно содержит ПВХ), что обычно не позволяет полностью его исключить [11–15]. Уверенное распознавание ПВХ установкой оптической сортировки и активированная функция «Подавление ПВХ» позволяют полностью исключить попадание ПВХ в поток материалов, которые планируется сжигать, даже если он используется в комбинации с другим материалом.

На рис. 5 представлена доля компонентов RDF для экскавированных, смешанных и раздельно собранных отходов, отсортированных установкой оптической сортировки. Видно, что наибольшее количество компонентов для твердого топлива – в раздельно собранных отходах (более 80 %), наименьшее – в экскавированных отходах (41 %). Однако даже такое количество горючих компонентов может представлять определенный интерес с точки зрения использования энергетического потенциала отходов.

Рис. 5. Доля компонентов RDF для разных потоков отходов

Подводя итог сказанному, отметим, что среди многообразия применяемых в сортировке отходов технологий оптического распознавания различных материалов наибольшей универсальностью отличается использование датчиков, работающих в ближней инфракрасной области. Линии автоматической сортировки отходов, использующие подобные датчики, широко используются в Европе и постепенно внедряются в России. Отличительной особенностью установки оптического сканирования в ближнем инфракрасном диапазоне является возможность предотвратить попадание ПВХ (даже если он используется в комбинации с другим материалом) в горючую фракцию (RDF).

Исследования, выполненные с использованием оборудования оптической сортировки, позволили оценить содержание ресурсно-ценных компонентов и компонентов для твердого топлива из бытовых отходов для смешанных, раздельно собранных и экскавированных отходов. Как показали результаты выполненных работ, отходы, пролежавшие на полигоне 3–5 лет, обладают определенным ресурсным потенциалом, хотя и значительно меньшим в сравнении со свежими смешанными и тем более раздельно собранными отходами.

Список литературы

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2014 году [Электронный ресурс]: гос. докл. / М-во природных ресурсов и экологии Российской Федерации. – URL: <http://www.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=142679> (дата обращения: 29.06.2016).
2. Завод по механизированной переработке бытовых отходов [Электронный ресурс]. – URL: <http://mpbo2.ru> (дата обращения: 29.06.2016).
3. Eule B. Inert material recovery with X-Ray from municipal solid waste // Sensor-Based Sorting: Eurogress, Aachen, Germany, 11–13 March. – 2014. – P. 99–105.
4. Knights M. Tech update: X-Ray & optical inspection // Food Engineering. – 2013. – May. – P. 66–68.
5. Feierabend A., Bohling Ch., Cordts L. Using LIBS-spectroscopy for analysis of raw materials and production waste // Sensor-Based Sorting: Eurogress, Aachen, Germany, 11–13 March. – 2014. – P. 35–37.
6. Pigorsch E., Hollstein E., Meinschmidt P. Sorting of waste wood by NIR imaging techniques // Sensor-Based Sorting: Eurogress, Aachen, Germany, 11–13 March. – 2014. – P. 127–136.
7. Галкина О.А., Ильиных Г.В., Вюнш К. Анализ методов оптической сортировки твердых бытовых отходов // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – № 4. – С. 127–140.
8. Вюнш К., Вайсман Я.И., Коротаев В.Н. Основные направления исследований с применением комплекса оборудования глубокой оптико-механической сортировки потоков отходов и материалов // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 2. – С. 28–37.
9. Оптико-механическая сортировка отходов: перспективы использования / Г.В. Ильиных, Д.Л. Борисов, Ю.В. Куликова, В.Н. Коротаев // Твердые бытовые отходы. – 2013. – № 10. – С. 35–39.
10. Управление отходами. Сбор, транспортирование, прессование, сортировка твердых бытовых отходов: монография / Я.И. Вайсман [и др.]. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 236 с.

11. Внедрение раздельного сбора отходов в г. Перми / Я.В. Базылева, С.В. Польшгалов, Г.В. Ильиных, Н.Н. Слюсарь // Твердые бытовые отходы. – 2014. – № 10. – С. 56–59.

12. Перспективы использования комплекса оптико-механической сортировки с целью извлечения энергетического потенциала ТБО / Я.И. Вайсман, В.Н. Коротаев, Д.Л. Борисов, Я.В. Базылева // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Прикладная экология. Урбанистика. – 2013. – № 3. – С. 138–146.

13. Зависимость качества и количества вторичного топлива от способа выделения и состава исходного потока отходов / Я.В. Базылева, С.В. Польшгалов, Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Прикладная экология. Урбанистика. – 2015. – № 3. – С. 97–111.

14. Базылева Я.В., Ильиных Г.В., Польшгалов С.В. Перспективы получения вторичного топлива из твердых бытовых отходов города Перми // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – С. 199–203.

15. Ильиных Г.В. Процент отбора вторичного сырья при сортировке твердых бытовых отходов: расчетный и фактический // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – № 4. – С. 115–126.

References

1. O sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2014 godu [On the state and protection of environment], available at: <http://www.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=142679> (accessed 29 June 2016).

2. Zavod po mekhanizirovannoi pererabotke bytovykh othodov [Plant of the mechanized waste recycling], available at: <http://mpbo2.ru> (accessed 29 June 2016).

3. Eule B. Inert material recovery with X-Ray from municipal solid waste. *Eurogress "Sensor-Based Sorting"*, Aachen, Germany, 11-13 March, 2014, pp. 99-105.

4. Knights M. Tech update: X-Ray & optical inspection. *Food Engineering*, 2013, May, pp. 66-68.

5. Feierabend A., Bohling Ch., Cordts L. Using LIBS-spectroscopy for analysis of raw materials and production waste. *Eurogress "Sensor-Based Sorting"*, Aachen, Germany, 11-13 March, 2014, pp. 35-37.

6. Pigorsch E., Hollstein E., Meinlschmidt P. Sorting of waste wood by NIR imaging techniques. *Eurogress "Sensor-Based Sorting"*, Aachen, Germany, 11-13 March, 2014, pp. 127-136.

7. Galkina O.A., Il'inykh G.V., Viunsh K. Analiz metodov opticheskoi sortirovki tverdykh bytovykh otkhodov [Analysis of methods of municipal solid waste optical sorting]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia ekologiya. Urbanistika*, 2014, no. 4, pp. 127-140.

8. Viunsh K., Vaisman Ia.I., Korotaev V.N. Osnovnye napravleniia issledovaniia s primeneniem kompleksa oborudovaniia glubokoi optiko-mekhanicheskoi sortirovki potokov otkhodov i materialov [Main research areas using of complex for optical-mechanical sorting of waste and materials]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti*, 2013, no. 2, pp. 28-37.

9. Il'inykh G.V., Borisov D.L., Kulikova Iu.V., Korotaev V.N. Optiko-mekhanicheskaiia sortirovka otkhodov: perspektivy ispol'zovaniia [Optical-mechanical sorting of waste: prospects for the use]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2013, no. 10, pp. 35-39.

10. Vaisman Ia.I. [et al.]. Upravlenie otkhodami. Sbor, transportirovanie, pressovanie, sortirovka tverdykh bytovykh otkhodov [Waste management. Collection, transport, compaction, sorting of municipal solid waste]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2012. 236 p.

11. Bazyleva Ia.V., Polygalov S.V., Il'inykh G.V., Sliusar' N.N. Vnedrenie razdel'nogo sbora otkhodov v gorode Permi [Introduction of separate collection waste in the city of Perm]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2014, no. 10, pp. 56-59.

12. Vaisman Ia.I., Korotaev V.N., Borisov D.L., Bazyleva Ia.V. Perspektivy ispol'zovaniia kompleksa optiko-mekhanicheskoi sortirovki s tsel'iu izvlecheniia energeticheskogo potentsiala tverdykh bytovykh otkhodov [Prospects for using of the researching centre for optical-mechanical sorting of waste for recovery the energy potential of MSW]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2013, no. 3, pp. 138-146.

13. Bazyleva Ia.V., Polygalov S.V., Il'nykh G.V., Korotaev V.N. Zavisimost' kachestva i kolichestva vtorichnogo topliva ot sposoba vydeleniia i sostava iskhodnogo potoka otkhodov [Dependence of the quality and amount of secondary fuel from the method of extraction and composition of the original waste stream]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia ekologiia. Urbanistika*, 2015, no. 3, pp. 97-111.

14. Bazyleva Ia.V., Il'nykh G.V., Polygalov S.V. Perspektivy polucheniia vtorichnogo topliva iz tverdykh bytovykh otkhodov goroda Permi [Reception prospects solid recovered fuels city of Perm]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm, 2015, pp. 199-203.

15. Il'nykh G.V. Protsent otbora vtorichnogo syr'ia pri sortirovke tverdykh bytovykh otkhodov: raschetnyi i fakticheskii [Recyclable recovery rate when household waste sorting: estimated and real]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia ekologiia. Urbanistika*, 2014, no. 4, pp. 115-126.

Получено 10.08.2016

Об авторах

Полыгалов Степан Владимирович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: polygalov-s@pstu.ru).

Ильиных Галина Викторовна (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: galina.perm.59@yandex.ru).

Вайсман Яков Иосифович (Пермь, Россия) – доктор медицинских наук, профессор кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: eco@pstu.ru).

About the authors

Stepan V. Polygalov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: polyste17@mail.ru).

Galina V. Il'inykh (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: galina.perm.59@yandex.ru).

Iakov I. Vaisman (Perm, Russian Federation) – Doctor of Medical Sciences, Professor, Environmental Protection Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: eco@pstu.ru).