

УДК 504.064.47

О.А. Галкина, Г.В. Ильиных

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

К. Вюнш

Технический университет г. Дрезден, Германия

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ СОРТИРОВКИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Проанализированы основные виды сортировки, описана сущность методов оптической сортировки. Произведено парное сравнение методов оптической сортировки по технологическим, экологическим и экономическим критериям. Сделаны выводы об эффективности применения методов оптической сортировки для отдельных компонентов твердых бытовых отходов.

Ключевые слова: оптическая сортировка, спектроскопия, твердые бытовые отходы, Парето-анализ, метод экспертной оценки.

Производственная и повседневная жизнедеятельность человека связана с появлением непрерывно увеличивающегося количества отходов производства и потребления. Основными способами утилизации твердых отходов является их захоронение на специальных полигонах и сжигание. Однако неправильная организация захоронения может привести к загрязнению почв, грунтовых вод химикатами и патогенной микрофлорой, а сжигание оказывает негативное влияние на атмосферу, так как сопровождается выбросами токсичных соединений [1].

Уменьшение количества отходов возможно при внедрении в схему управления отходами операций сортировки и выделения ресурсов, пригодных для дальнейшего использования.

Изучаемая тема является актуальной, так как внедрение сортировки в процесс переработки отходов позволяет уменьшить объем отходов, поставляемых на полигоны. В результате сокращаются площади земель для полигонов, эмиссии вредных веществ и уменьшаются расходы, связанные с загрязнением окружающей среды, что имеет положительный экологический и экономический эффект.

В настоящее время можно выделить три основные разновидности сортировки: ручная, автоматизированная, автоматическая. При ручной сортировке распознавание материалов производится персоналом, отбор осуществляется вручную. При автоматизированной сортировке некоторые операции механизированы, но распознавание компонентов выполняется оператором. На линиях автоматической сортировки идентификация материалов и их выделение из общего потока происходит без участия персонала. На территории РФ чаще всего применяется технология ручной сортировки. Развитая в Европе технология автоматической сортировки с применением оптического распознавания материала только начинает завоевывать отечественный рынок. Техническое преимущество автоматической сортировки перед ручной заключается в более высокой производительности и чистоте конечного продукта [2].

В данной статье под оптической сортировкой понимается метод определения и разделения материалов, основанный на облучении поверхности определенными длинами волн и последующего сканирования отраженного или прошедшего через материал излучения для разделения компонентов.

Деление методов оптической сортировки в зависимости от диапазонов используемых электромагнитных излучений приведено в табл. 1.

Таблица 1

**Классификация методов оптической сортировки
по типам используемого излучения**

Область спектра	Название метода в отечественной литературе	Название метода в зарубежной литературе	Длина волны λ , м
Рентгеновские лучи	Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА)	X-ray Fluorescence (XRF)	$10^{-12} - 10^{-9}$
	Рентгеновская трансмиссия (РТ)	X-ray Transmission (XRT)	
Ультрафиолет	Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия (ЛИЭС)	Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)	$10^{-9} - 4 \cdot 10^{-7}$
Видимая область	Спектроскопия в видимой области	Visual spectrometry (VIS)	$4 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-7}$
Инфракрасная область	Ближняя инфракрасная спектроскопия (БИК спектроскопия)	Near infrared spectroscopy (NIR)	$8 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-5}$
Терагерцевая область	Терагерцевая спектроскопия	Terahertz (THz) spectroscopy	$3 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$

Методы спектроскопии можно разделить на контактные, в которых для анализа требуется предварительная пробоподготовка, и бесконтактные, без перевода пробы в раствор или в газовую среду. Ниже рассматриваются методы оптической сортировки, основанные на непрерывном анализе материалов в режиме реального времени.

Рентгенофлуоресцентный анализ. При облучении пробы рентгеновским излучением в случае рентгеновской флуоресценции возникает вторичное рентгеновское излучение (рис. 1). Это излучение представляет собой характеристические для каждого атома длины волн.

Генерация первичных рентгеновских лучей происходит при работе электронной рентгеновской трубки. Для регистрации вторичного излучения (2) используются специальные детекторы, электрический сигнал которых пропорционален энергии рентгеновского излучения, что позволяет выделить необходимый участок спектра, применяя амплитудную селекцию. После попадания на детектор фотоэлектрон преобразовывается в импульс напряжения, который подсчитывается счетной электроникой и передается на компьютер. По пикам полученного спектра можно качественно определить элементный состав образца.

Рентгеновская трансмиссия. Рентгеновская трансмиссия, или рентгеновская абсорбция – технология сенсорной сортировки, основанная на способности рентгеновских лучей проникать сквозь материалы.

Материал, поступающий на конвейер, равномерно распределяется по нему. Затем частицы поступают в область рентгеновского излучения (рис. 2).

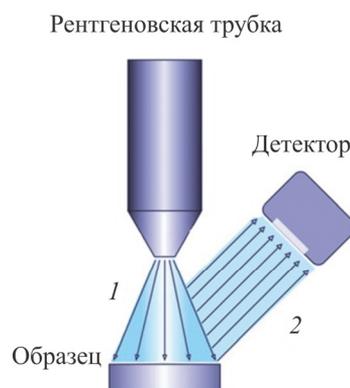


Рис. 1. Схема установки для рентгенофлуоресцентного анализа: 1 – первичное излучение; 2 – вторичное излучение [3]

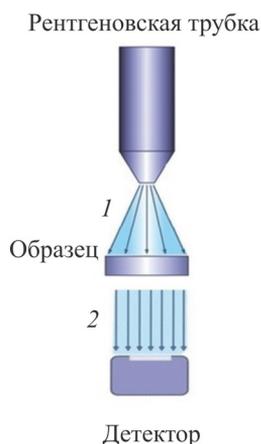


Рис. 2. Схема установки для рентгеновской трансмиссии: 1 – падающее излучение; 2 – проходящее излучение [4]

Рентгеновские лучи, испускаемые электронной рентгеновской трубкой (1), просвечивают сортируемый материал, проходят через него. Камера – детектор, чувствительная к этим лучам, расположенная под материалом, определяет интенсивность излучения (2), проходящего через материал. По разнице интенсивности между входящим и исходящим излучением делается вывод об атомной структуре просвечиваемого материала.

Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. Лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия (ЛИЭС) – один из методов атомно-эмиссионного спек-

трального анализа, в котором используют спектры плазмы лазерного пробоя (лазерной искры) для анализа твердых образцов, жидкостей, газовых сред, взвешенной пыли и аэрозолей.

Принцип работы данного метода представлен на рис. 3. Лазерный свет проходит через систему зеркал (1), затем сквозь линзу (2), которая фокусирует энергию на образец. Лазерный пробой формируют при фокусировке импульсного лазерного излучения на поверхности образца.

Анализируемую пробу вводят в источник возбуждения спектров, где она подвергается абляции (т.е. «вырыванию» с поверхности микрочастиц), нагреву и испарению. Высокая температура в фокусе луча приводит к образованию плазмы (3). Плазма остывает и распадается за время около 1 мкс после импульса, и в течение этого времени попавшие в эту высокотемпера-

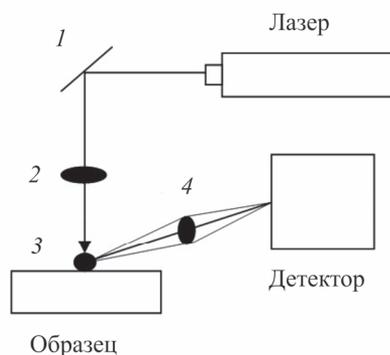


Рис. 3. Схема установки для метода ЛИЭС: 1 – система зеркал; 2 – фокусирующая линза; 3 – лазерная плазма; 4 – преломляющая линза

турную область пространства микрочастицы анализируемой пробы распадаются на атомы. Эти атомы пробы при столкновениях с другими частицами переходят в возбужденное и ионизированное состояния. Поскольку частицы удаляются с поверхности образца, они ионизируются, формируя небольшую струю плазмы, называемую «лазерной искрой» [5]. Самопроизвольно возвращаясь в нормальное или промежуточное состояние, они испускают избыточную энергию в виде фотонов, совокупность которых и образует эмиссионный спектр. В области 200–980 нм излучают все элементы. Измеряя интенсивность линий спектра атомов, прошедшего через преломляющую линзу (4), определяют концентрацию конкретного химического элемента в анализируемой пробе.

Детекторы системы регистрируют сигнал, а прилагаемое программное обеспечение отображает результаты измерений. Аналитическое программное обеспечение включает в себя значительную базу данных для различных атомов, ионов и молекул. Уникальная база данных по различным атомам и молекулам позволяет быстро и точно идентифицировать спектральные линии.

Спектроскопия в видимой области. Спектроскопия в видимой области, или фотосортировка – технология распознавания материалов по цвету.

Материал для обследования поступает в машину из бункера. Вибрирующий лоток, расположенный под бункером, подает продукт в распределительные каналы, где он размещается равномерно, в один слой и с постоянной скоростью направляется в зону обследования.

Зона обследования находится между двумя отсеками (передним и задним), снабженными источниками света, датчиками сигнала (оптическими сенсорами) и фоновыми экранами. В качестве источников света видимой области находят применение лампы накаливания или лазеры (рис. 4).

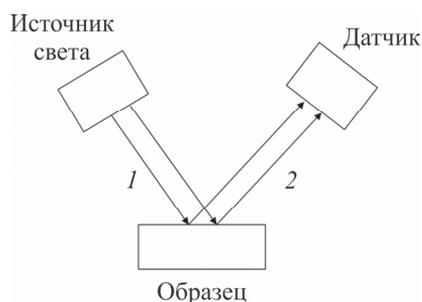


Рис. 4. Схема установки для видимой спектроскопии:

- 1 – падающий свет;
- 2 – отраженный свет

Попадая в освещенную зону обследования, материал отражает падающий свет (1) от источника излучения. Сенсоры или камеры получают отраженный свет (2) от материала, обнаруживают мельчайшую разницу в цвете частиц продукта, и посылают импульсы в электронную часть. Компьютерная система контроля, обрабатывая и сравнивая полученную информацию с заданными параметрами годного продукта, в случае несоответствия приводит в движение пневмосистему, удаляющую ненужные материалы.

Ближняя инфракрасная спектроскопия. Инфракрасная область спектра подразделяется на несколько диапазонов:

- 1) область 0,8–2 мкм – ближняя инфракрасная область;
- 2) область 2–40 мкм – средняя (фундаментальная) инфракрасная область;
- 3) область до 200 мкм – дальняя инфракрасная область.

Поскольку в ближней инфракрасной области наиболее мощное излучение в инфракрасном диапазоне, то этот метод подходит для анализа сложных органических молекул. Источником излучения обычно служит галогенная лампа с вольфрамовой нитью (рис. 5).

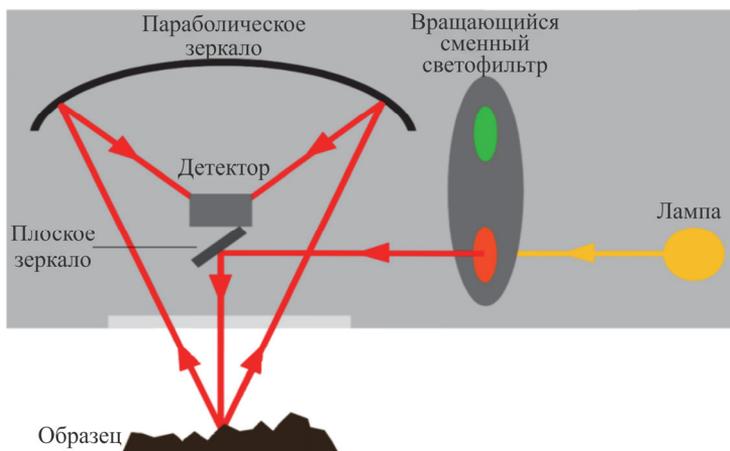


Рис. 5. Схема установки для БИК-спектроскопии [6]

Галогенная лампа генерирует полихроматический спектр излучения, которое превращается в монохроматическое излучение одной или нескольких длин волн с использованием вращаю-

щегося сменного светофильтра. Монохроматическое излучение (1) направляется на поверхность образца с помощью плоского зеркала, попадает на образец, молекулы которого начинают колебаться на определенных частотах и поглощают часть света. Другая часть света отражается (2). Отраженное излучение собирается параболическим зеркалом, которое перенаправляет его на фотодетектор. Обнаруженное излучение переводится детектором в пропорциональный электрический сигнал, после обработки которого выдаются данные о спектральных характеристиках материалов.

Терагерцевая спектроскопия. Импульсная терагерцевая спектроскопия с разрешением по времени основана на измерении временного терагерцевого сигнала, прошедшего через образец. В основе терагерцевого спектрометра (рис. 6) лежит принцип когерентного детектирования импульсов терагерцевого излучения.

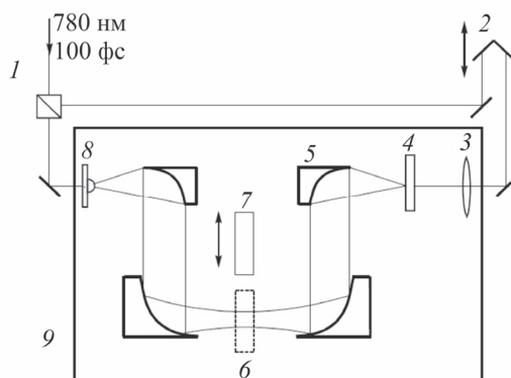


Рис. 6. Схема установки для терагерцевой импульсной спектроскопии: 1 – делитель; 2 – линия задержки; 3 – фокусирующая линза; 4 – генератор-кристалл; 5 – параболические зеркала; 6 – область перетяжки терагерцевого луча; 7 – исследуемый образец; 8 – детектор; 9 – герметичный кожух

Из лазера излучение падает на делитель (1), делящий луч на два луча. Первый луч с большей мощностью, проходя линию задержки 2, линзой 3 фокусируется на поверхность кристалла ZnTe 4, в котором на эффекте генерации разностной частоты идет генерация импульсного терагерцевого излучения. Система из четырех параболических зеркал 5 излучение, выходящее из кристалла, фокусирует в перетяжку 6, куда помещается исследуемый образец 7, а затем прошедшее сквозь него излучение фокусирует на дипольную антенну 8.

Излучение, пройдя через образец, регистрируется дипольной антенной за счет того, что вместе с терагерцевым импульсом на антенну приходит второй оптический импульс, создающий в подложке антенны свободные носители, которые начинают двигаться под действием поля терагерцевого импульса. С электродов антенны снимается напряжение в зависимости от времени задержки между оптическим и терагерцевым импульсом. Таким образом, делением спектров опорного сигнала и сигнала после образца получают информацию о поглощении и преломлении терагерцевого излучения в исследуемом образце.

Идентификация компонентов отходов методами оптической сортировки. Каждый метод оптической сортировки вследствие своих особенностей подходит для идентификации только некоторых компонентов. В табл. 2 показано применение оптических методов для обнаружения и сортировки некоторых материалов.

Таблица 2

Определение компонентов отходов методами
оптической сортировки

Компонент	Технология					
	XRF	XRT	LIBS	VIS	NIR	THz
Макулатура					+	
Пластик	+	+	+	+	+	+
Стекло				+		
Текстиль					+	
Черные и цветные металлы	+	+	+	+		
Древесина	+	+			+	+
Инертные материалы	+	+			+	

По данным таблицы можно сделать вывод, что наиболее универсальными методами оптической сортировки для выбранных компонентов являются: рентгеновская трансмиссия (XRT) и спектроскопия в ближней инфракрасной области (NIR). Данные методы способны выделять большое количество различных компонентов. Наименее универсален метод терагерцевой спектроскопии, так как с помощью этого метода можно обнаружить только два компонента отходов.

Наиболее просто поддаются обнаружению пластмассы. Их можно идентифицировать всеми вышеописанными методами. Стекло, черные и цветные металлы способны обнаружить боль-

шинство методов оптической сортировки. Макулатура, текстиль и инертные материалы (камни, керамика и др.) распознаются только некоторыми способами сортировки.

Парное сравнение методов. Выбор наилучшего оптического метода по извлечению компонентов и видов вторичного сырья из приведенных выше осуществлялся по алгоритму, представленному на рис. 7.

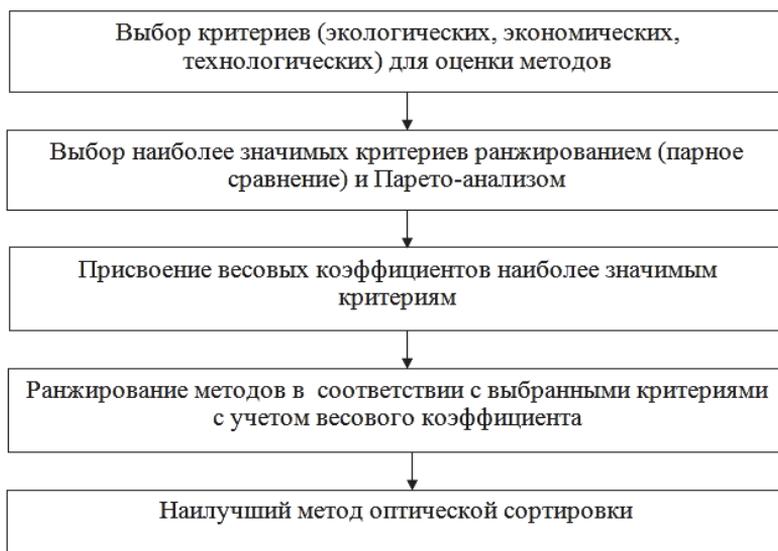


Рис. 7. Алгоритм выбора наилучшего метода оптической сортировки

Выбор наилучшего метода оптической сортировки производился с учетом экологических, экономических, технологических критериев и осуществлялся на основе экспертной оценки.

Экологические критерии направлены на определение воздействий методов на природную и окружающую среду, а также причинение вреда здоровью населения. К ним относятся:

- степень чистоты отбираемого вторичного сырья;
- физическое (ионизирующее и электромагнитное) воздействие на окружающую среду.

Экономические критерии, определяющие экономическую эффективность и целесообразность применения технологий, включают в себя:

- капитальные затраты;
- эксплуатационные затраты;
- стоимость вторичных ресурсов.

Технологические критерии ориентированы на осуществление процесса. К ним относятся:

- производительность технологического оборудования;
- сложность предварительной подготовки отходов;
- простота эксплуатации и обслуживания технологического процесса;
- универсальность метода;
- возможность аварийных ситуаций.

Определение наиболее значимых критериев проранжировано с помощью метода парного сравнения. Метод парного сравнения основан на сравнении двух объектов по отношению лучше ↔ хуже по степени важности и имеет три вариации (рис. 8).

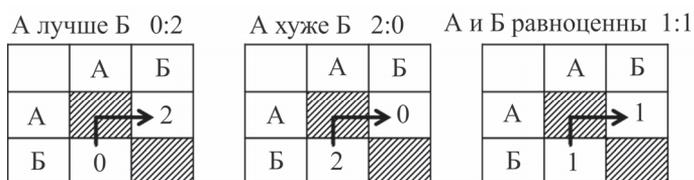


Рис. 8. Варианты присвоения оценок при парном сравнении

После парного сравнения всех критериев были просуммированы баллы каждого критерия и оценка в процентах, а затем по результатам ранжирования выбраны наиболее значимые критерии по анализу Парето, которые попали в область 80 % (рис. 9).

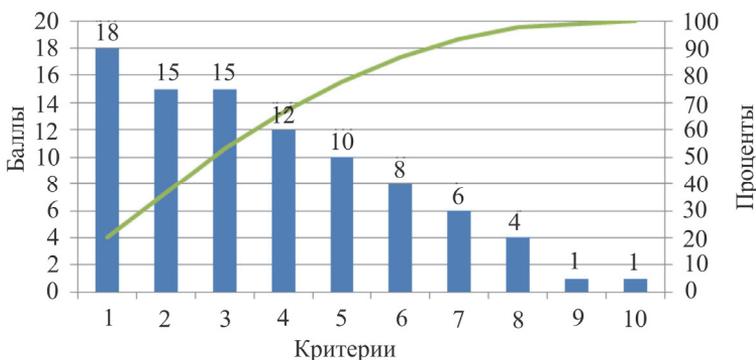


Рис. 9. Результаты Парето-анализа критериев: 1 – универсальность метода; 2 – степень чистоты отбираемого вторичного сырья; 3 – производительность технологического оборудования; 4 – эксплуатационные затраты; 5 – капитальные затраты; 6 – стоимость вторичных ресурсов; 7 – простота эксплуатации и обслуживания технологического процесса; 8 – сложность предварительной подготовки отходов; 9 – радиационное загрязнение; 10 – возможность аварийных ситуаций

Критерии, попавшие в область 80 % и используемые для сравнительного анализа методов оптической сортировки: универсальность метода, степень чистоты отбираемого вторичного сырья, производительность технологического оборудования, эксплуатационные затраты, капитальные затраты.

Наиболее значимым критериям для оценки методов оптической сортировки присваивались весовые коэффициенты, отражающие значимость каждого критерия.

Методы оптической сортировки сравнивались между собой с учетом весового коэффициента методом парного сравнения. В результате ранжирования методов по каждому наиболее значимому критерию осуществлялось суммирование итоговых ранговых коэффициентов с учетом веса критерия для каждого метода (табл. 3).

Таблица 3

Итоговые результаты ранжирования

Метод	Критерии					Итоговый ранговый коэффициент	Ранг
	1	2	3	4	5		
	Весовой коэффициент						
	0,20	0,17	0,17	0,14	0,11		
NIR	5,24	4,86	3,24	3,00	2,62	18,96	1
XRT	5,24	4,45	4,45	3,00	1,57	18,71	2
XRF	3,81	4,45	4,45	2,00	1,05	15,76	3
VIS	1,90	2,02	2,02	4,00	3,14	13,08	4
LIBS	1,90	2,02	2,02	0,33	0,00	6,27	5
THz	1,90	0,40	0,81	0,33	0,52	3,96	6
Microwave	0,00	0,40	0,00	1,33	2,1	3,83	7

На основании парного сравнения было выявлено, что наилучшим методом, с учетом технологических, экономических и экологических критериев, является спектроскопия в ближней инфракрасной области.

Обобщая все вышесказанное, можно сделать вывод, что для обнаружения и идентификации каждого компонента и вида вторичного сырья может использоваться несколько методов оптической сортировки. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать при анализе материалов для выбора наиболее оптимального. Кроме того, для наиболее

полной и качественной сортировки можно использовать комбинацию методов в зависимости от поступающих отходов и материалов.

Настоящая работа выполнена в рамках реализации соглашений о предоставлении и целевом использовании субсидии для реализации научных проектов международными исследовательскими группами ученых на базе государственных образовательных учреждений Пермского края.

Библиографический список

1. Чуняева А.В., Коротаев В.Н., Григорьев В.Н. Оптическая сортировка для совершенствования технологической схемы сортировки ТБО // Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 2. – С. 5–11.

2. Вюнш К., Вайсман Я.И., Коротаев В.Н. Основные направления исследований с применением комплекса оборудования глубокой оптико-механической сортировки потоков отходов и материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 2. – С. 28–37.

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

4. Knights M. Tech update: X-Ray & optical inspection // Food Engineering. – Aachen, Germany, 2013. – P. 66–68.

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

6. Pigorsch E., Hollstein E., Meinschmidt P. Sorting of waste wood by NIR imaging techniques // Sensor-Based Sorting. March 11–13, 2014. – Eurogress, Aachen, Germany, 2014. – P. 127–136.

References

1. Chunyaeva A.V., Korotaev V.N., Grigorev V.N. Opticheskaya sortirovka dlya sovershenstvovaniya tekhnologicheskoi skhemy sortirovki TBO [Optical sorting for develop of technological scheme of sorting of MSW]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushchej sredy, transport, bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, 2010, no. 2, pp. 5–11.

2. Wunsch K., Vajsman Ya.I., Korotaev V.N. Osnovnye napravleniya issledovaniy s primeneniem kompleksa oborudovaniya glubokoj optiko-mekhanicheskoy sortirovki potokov otkhodov i materialov [Main research areas using of complex for optical-mechanical sorting of waste and materials]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo*

politekhnikeskogo universiteta. Okhrana okruzhayushhej sredy, transport, bezopasnost zhiznedeyatelnosti, 2013, no. 2, pp. 28–37.

3. Eule B. Inert material recovery with X-Ray from municipal solid waste. *Sensor-Based Sorting*. Germany, 2014, pp. 99–105.

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

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

6. Pigorsch E., Hollstein E.; Meinschmidt P. Sorting of waste wood by NIR imaging techniques. *Sensor-Based Sorting*. Germany, 2014, pp. 127–136.

Получено 25.10.2014

O. Galkina, G. Ilinykh, C. Wunsch

ANALYSIS OF METHODS OF MUNICIPAL SOLID WASTE OPTICAL SORTING

The main types of the sorting are analysed, the essence of the methods of optical sorting are described. Comparison of the methods on technological, environmental and economic criteria are made. Conclusions about the effectiveness of the methods of optical sorting for individual components of municipal solid waste are made.

Keywords: optical sorting, spectroscopy, municipal solid waste, Pareto analysis, the method of peer review.

Галкина Ольга Александровна (Пермь, Россия) – студентка, кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: galkina.perm@yandex.ru).

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

Вюниш Кристоф (Дрезден, Германия) – преподаватель кафедры управления отходами Технического университета г. Дрезден (Германия, г. Пирна, ул. Пратшвайцер, 15, 01796, e-mail: christoph.wuensch@tu-dresden.de).

Galkina Olga (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: galkina.perm@yandex.ru).

Ilinykh Galina (Perm, Russian Federation) – Senior lecturer of Department "Environmental protection", Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: galina.perm.59@yandex.ru).

Wunsch Christoph (Dresden, Germany) – Lecturer of Chair of Waste Management at the Technical University of Dresden (Germany, Pirna, Pratzschwitzer Str. 15, 01796, e-mail: christoph.wuensch@tu-dresden.de).