

УДК 504.064.47

М.В. Григорьева

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ РУЧНОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ СОРТИРОВКИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Представлены перспективы методов сортировки твердых бытовых отходов (ТБО) с применением технологий ручной и оптической сортировки. Проанализированы основные методы извлечения вторичного сырья из отходов. Описаны сущность метода анализа материальных потоков, методики определения предотвращенного экологического ущерба, рассмотрены принципы затратно-прибыльного анализа. Разработан метод оценки технологий сортировки ТБО, сочетающий метод анализа материальных потоков, предотвращенного экологического ущерба и затратно-прибыльного анализа. Определены основные экологические, технические и экономические показатели различных технологических схем сортировки отходов с использованием предложенного метода. Построены модели ручной и оптической сортировки ТБО, определены коэффициенты трансформации для всех технологических операций. Произведен расчет величины предотвращенного экологического ущерба и показателей экономической эффективности. Сделаны выводы об эколого-экономической эффективности применения методов ручной и оптической сортировки отходов.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, оптическая сортировка отходов, ручная сортировка отходов, предотвращенный экологический ущерб, экономическая эффективность.

Жизнедеятельность человека связана с появлением постоянно возрастающего количества разнообразных отходов. Резкий рост потребления в последние десятилетия во всем мире привел к существенному увеличению объемов образования твердых бытовых отходов (ТБО). Известно, что морфологический состав и объем отходов потребления чрезвычайно разнообразны и зависят не только от страны, уровня жизни населения, а также от времени года и многих других факторов. В Перми объем образования ТБО составляет до 333 тыс. т в год. Морфологический состав отходов (% по массе) следующий [1]:

макулатура	25,1
пищевые отходы	9,4
металл	4,4
стекло	15,95
дерево	2,5

пластмасса	5,85
текстиль	4,25
резина, кожа	1,55
строительные отходы	6,7
прочее	24,3

В настоящее время поток ТБО практически полностью направляется на захоронение. Захоронение отходов на полигоне является наиболее распространенным, вследствие простоты эксплуатации и низкой стоимости эксплуатации, способом обезвреживания ТБО. Однако полигон является источником негативного воздействия на окружающую среду: вызывает загрязнение поверхностных и подземных вод, атмосферного воздуха, почв.

Полигон захоронения ТБО оказывает негативное влияние практически на все элементы биосферы (рис. 1). К основным видам воздействия полигона на окружающую среду можно отнести привнесение в атмосферный воздух компонентов биогаза с участка депонирования ТБО, выбросы загрязняющих веществ от технологических машин, функционирующих на полигоне; в поверхностные воды – стоки фильтрата, отводимого из тела полигона, промливневых и хозяйственных сточных вод от хозяйственной зоны полигона; загрязнение почв [1].

Кроме этого, при захоронении теряются все ценные компоненты ТБО, которые могут использоваться в качестве вторичного сырья. Стекло, бумага, пластмасса, черные и цветные металлы, текстиль потенциально являются вторичным сырьем. Вторичное сырье – утильные фракции, которые после полного первоначального использования могут применяться повторно в производстве как исходное сырье [2]. Поэтому основной задачей переработки бытовых отходов является выделение утильных фракций и их использование (реализация) как вторичных ресурсов для последующей переработки.

В настоящее время существуют следующие методы извлечения вторичного сырья из ТБО: сепарация, грохочение, ручная сортировка, оптическая сортировка и др. Методы сепарации и грохочения позволяют разделить отходы по фракциям и отделить ценные компоненты из потока отходов. Наиболее распространенной является ручная сортировка, когда ТБО движутся по конвейеру и сортируются вручную [3].

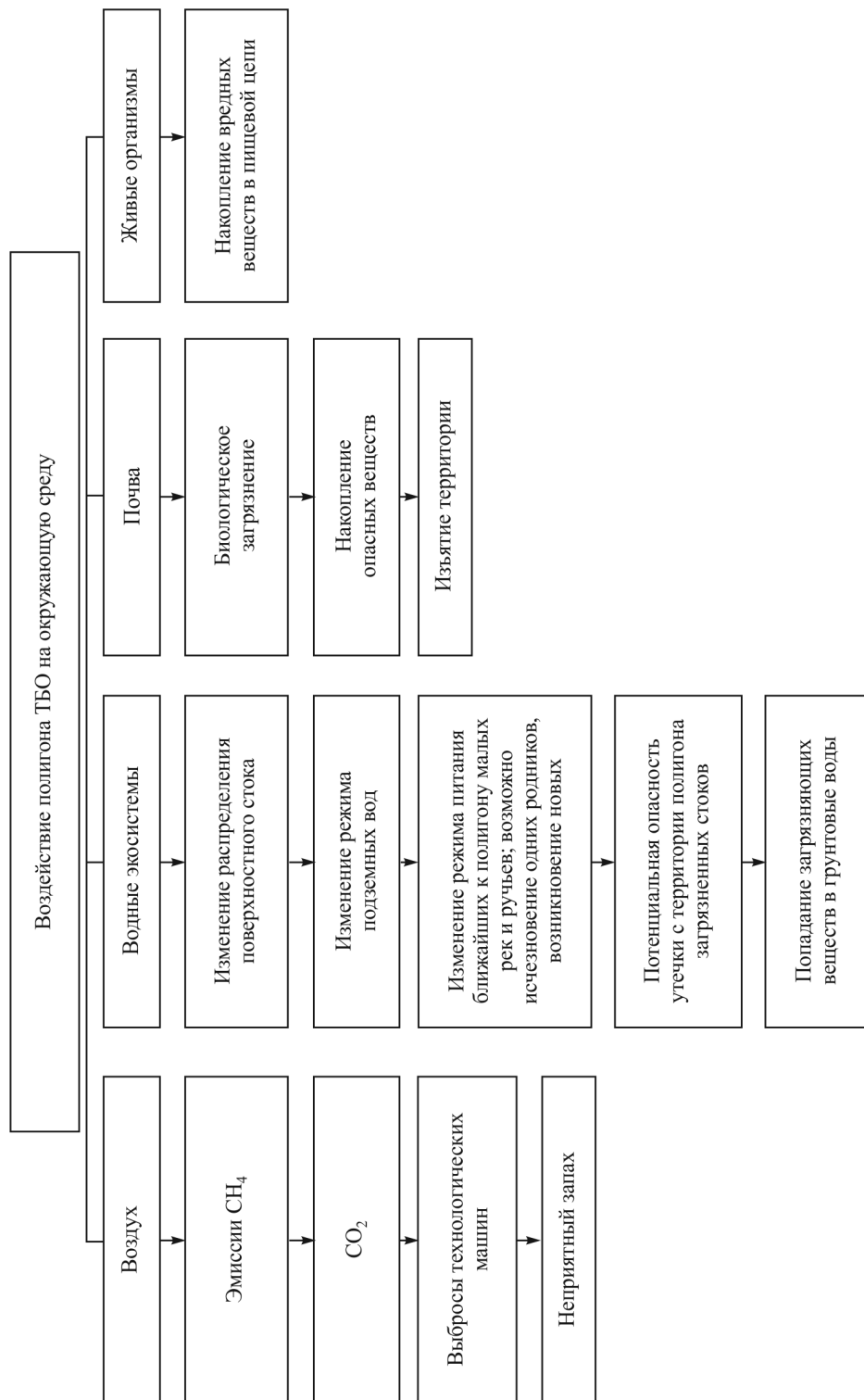


Рис. 1. Воздействие полигона ТБО на окружающую среду

Принцип работы оборудования оптической сортировки TITECH GmbH (Германия) основывается на работе сенсора длинноволновой ИК-области спектра (NIR technology) и сенсора (VIS), который работает в диапазоне частот видимого света, улавливает характерное отражение спектра с очень высоким оптическим разрешением и различает материалы по специфическому отражению цвета. Двойное сканирование делает возможным увеличить расстояние между сканером и транспортером при сохранении высокой степени разрешения, оба сенсора могут комбинироваться и дополнять друг друга (рис. 2) [4, 5].

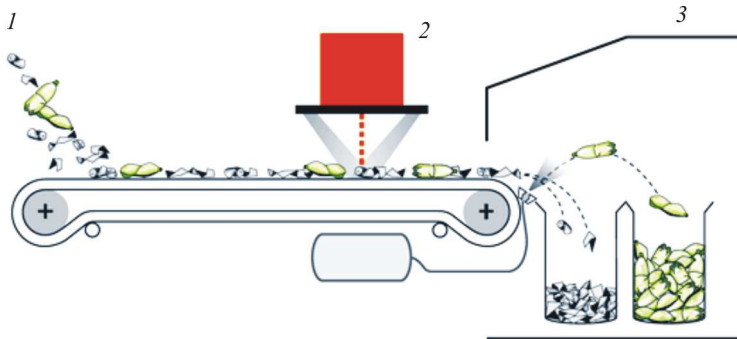


Рис. 2. Схема процесса оптической сортировки: 1 – подача несортированного материала; 2 – спектрометрическое сканирование; 3 – разделительная камера

В процессе сортировки отходы идентифицируются и разделяются по форме, цвету и свойствам материала. Распознанные компоненты перемещаются к соплам подачи сжатого воздуха, каждое из которых запрограммировано удалять только один вид компонента, сдувая его в соответствующий контейнер. Все нераспознанные компоненты продолжают движение до конца сортировочного участка, где попадают в емкость для отходов.

Актуальность проблемы сортировки ТБО в современных условиях обусловлена тем, что основной целью технологий сортировки отходов является извлечение вторсырья, получение прибыли от его сбыта, и снижение объемов отходов, направляемых на захоронение, тем самым уменьшая платежи за загрязнение окружающей среды. Таким образом, при выборе метода переработки ТБО важную роль имеет и экономическая и экологическая оценка технологии.

В качестве инструмента, позволяющего оценивать состав и величину материальных потоков и их изменения, а также моделировать систему, использован метод анализа материальных потоков (АМП). АМП – это систематическая оценка потоков и запасов материалов в пределах системы, определенной по месту и времени. Она соединяет источники, пути, промежуточные и конечные выходы материала. По закону сохранения массы, результаты АМП могут контролироваться простым материальным балансом, сравнивающим все входы, запасы и выходы процесса (рис. 3). Именно эта характеристика АМП делает метод привлекательным как инструмент поддержки решения в управлении ресурсами, отходами и экологической безопасностью.

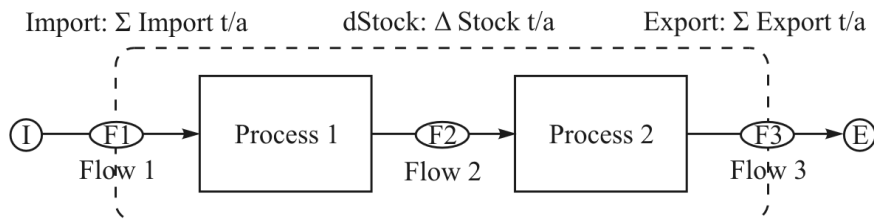


Рис. 3. Пример системы анализа материальных потоков

Для осуществления анализа материальных потоков в соответствии с австрийским стандартом ÖNORM S 2096 (анализ материальных потоков, применяемый в менеджменте отходов) в Венском техническом университете был разработан программный продукт STAN. После построения графической модели с известными компонентами (процессами, потоками, системными границами текстовых полей) программа позволяет импортировать данные (масса, потоки, запасы, концентрации, коэффициенты перевода) для различных уровней для вычисления неизвестных величин. Потоки могут быть отображены в различном стиле, где ширина потока пропорциональна его ценности [6, 7].

В качестве исходных данных для построения функциональной модели были приняты результаты экспериментальных исследований состава и свойств ТБО, образованных в Перми в 2011 г. Для построения схемы материального баланса в модель введены коэффициенты трансформации, которые представ-

ляют собой процентное отношение массы выходящего потока к массе входящего потока. При построении модели оптической и ручной сортировки коэффициенты трансформации были определены на основе компонентного и фракционного состава ТБО. Коэффициенты трансформации задавались один раз для каждого процесса в составе модели. Сумма коэффициентов трансформации принималась равной 1, или 100 %.

При *оптической сортировке* поток отходов (333 тыс. т) подвергается грохочению, который позволяет разделить отходы на два потока: крупная (>280 мм) и мелкая (подгрохотная) (<280 мм) фракции. Из мелкой фракции вручную выбирается стекло (20 756 т, что составляет 7 мас.%). Крупная фракция отходов подвергается дроблению (36 630 т, что составляет 11 мас.%). Отходы размером менее 280 мм (296 370 т, 89 мас.%) поступают на барабанный грохот, образуя два потока отходов, которые подвергаются магнитной сепарации. В потоке отходов с фракцией менее 50 мм происходит отделение черных металлов (2116 т, или 1,54 мас.%) от потока отходов подлежащих захоронению (135 276 т, 98,46 мас.%). В потоке отходов размером 50–280 мм в результате сепарации отделяются черные металлы (11 820,7 т, 6,76 мас.%) и цветные металлы (5038 т, 3,09 мас.%).

После отделения металлов поток отходов подвергается оптической сортировке разных видов пластика. В результате выделяется полипропилен РР – 449,9 т (2,33 %), полиэтиленететрафталат РЕТ – 3681,48 т (2,81 %) и полиэтилен высокой плотности HDPE – 8611,2 т (5,45 %). Оставшиеся отходы подвергаются баллистической сепарации, из них 109 499 т направляют на захоронение, а на дополнительную оптическую сортировку поступает 31 771 т, в результате чего отделяется полиэтиленовая пленка (1804,64 т, 5,68 %) и недифференцированные отходы, подлежащие захоронению. Схема оптической сортировки в виде материальных потоков представлена на рис. 4.

Материальный баланс движения отходов при *ручной сортировке* представлен на рис. 5. Поток отходов (333 тыс. т, из которых 22,56 % – макулатура, 17,27 % – стекло, 3,03 % – пластик, 1,67 % – цветной металл) поступает на подающий конвейер, затем подвергается грохочению с образованием двух фракций.

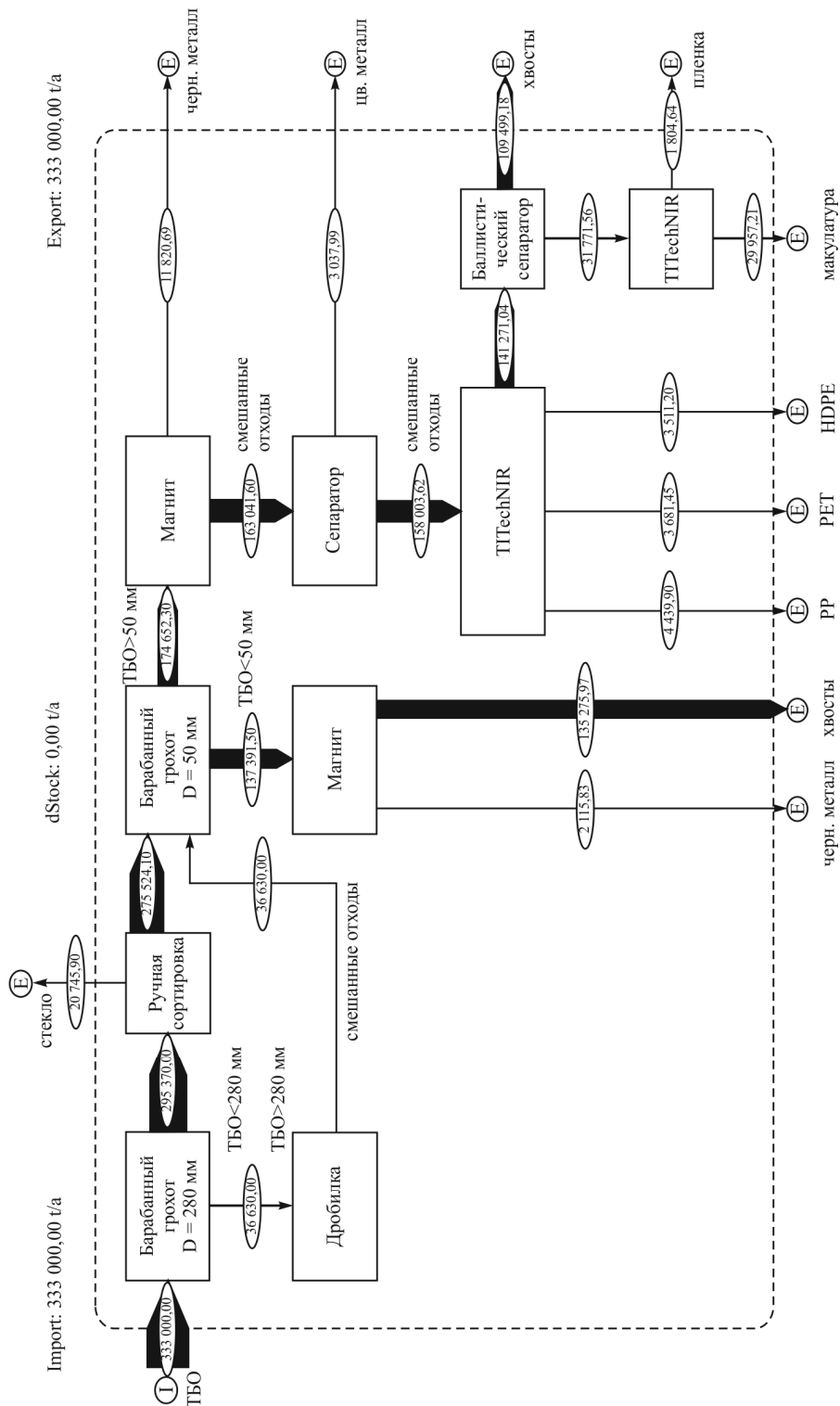


Рис. 4. Модель оптической сортировки

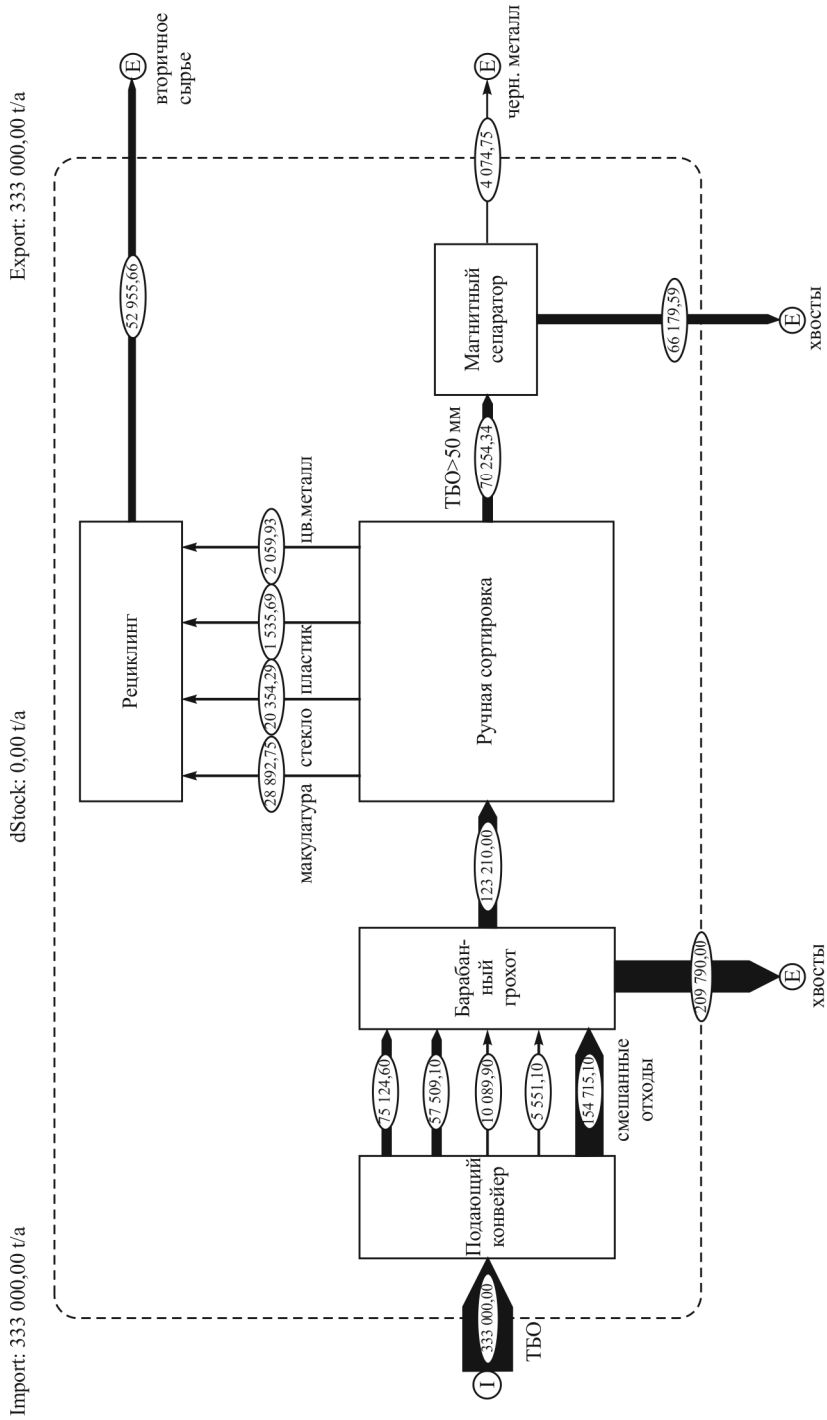


Рис. 5. Модель ручной сортировки

Отходы размером менее 50 мм (209 790 т, 63 мас.%) подвергаются захоронению. Отходы размером более 50 мм поступают на ручную сортировку (12 3210 т, 37 мас.%). Вторичное сырье включает в себя макулатуру (28 892 т, 23,45 мас.%), стекло (20 354 т, 17,27 мас.%), пластик (1639 т, 1,33 мас.%) и цветной металл (2069,93 т, 1,68 мас.%). Отсортированное вторсырье направляется на вторичное использование (52 955,66 т). Поток отходов после отбора вторсырья, так называемые «хвосты» сортировки, проходит через металлосепаратор, где отделяются черные металлы (4074,75 т, 5,8 мас.%). Оставшиеся отходы поступают на захоронение (66 179,6 т, 94,2 мас.%). Таким образом, в результате ручной сортировки образуется 57 300 т вторичного сырья и 275 970 т отходов, подлежащих захоронению. Схема ручной сортировки в виде материальных потоков представлена на рис. 5.

С помощью рассмотренных моделей сортировки ТБО установлено, что выход вторичного сырья после оптической сортировки составляет 88 225 т/год, после ручной сортировки – 57 031 т/год. Разделение общего потока отходов по материалам для вторичного использования представлено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение методов сортировки по выходу вторичного сырья

Вид вторичного сырья	Количество извлекаемого вторичного сырья (тыс.т/год) при разных видах сортировки	
	оптическая	ручная
Стекло	20,7	20,3
Макулатура	30,0	28,0
Пластик	18,3	1,8
Цветной металл	5,0	2,0
Черный металл	14	4,0

Для оценки перспектив применения технологий сортировки отходов необходимо использовать не только метод АМП, но и оценку предотвращенного экологического ущерба и затратно-прибыльный анализ.

С учетом специфики эколого-ресурсных компонентов окружающей природной среды и направлений природоохранной

деятельности оценка предотвращенного ущерба проведена по следующим направлениям: ущерб от загрязнения атмосферного воздуха; ущерб водным ресурсам; ущерб от загрязнения почвы и изъятию земельных ресурсов.

Известно, что затратно-прибыльный анализ применяют для решения об осуществимости проекта, сравнивая предполагаемые затраты с ожидаемой прибылью. Положительное отношение означает, что прибыль превосходит затраты, проект экономически эффективен и его осуществление экономически рентабельно. Если затраты превосходят прибыль, логично поискать иное решение. Для обоснования целесообразности применения методов ручной и автоматической сортировки рассмотрены два модельных завода, на которые поступают смешанные отходы одинакового морфологического состава. При определении технико-экономических показателей учтены как капитальные (стоимость зданий и сооружений, технологического оборудования, машин и механизмов), так и эксплуатационные затраты (электроэнергия, заработная плата персонала, топливо, страховые взносы и т.п.).

Предотвращенный экологический ущерб рассчитывался для ручной и оптической сортировки, в качестве нулевого сценария использовалась величина предотвращенного экологического ущерба при захоронении 333 тыс. т отходов (рис. 6).

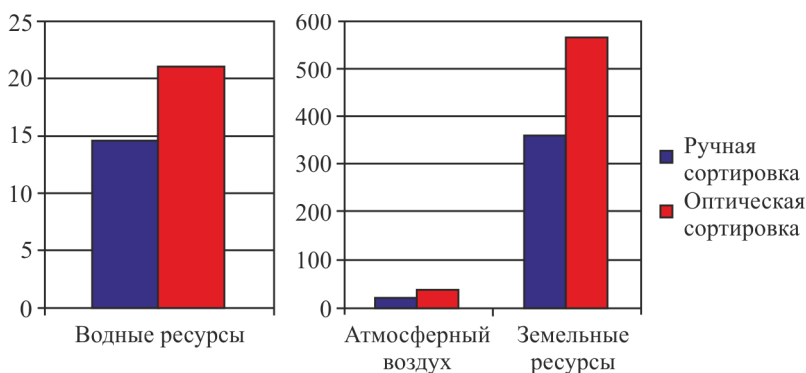


Рис. 6. Величина предотвращенного экологического ущерба, млн руб./год

Результаты сравнения затрат по переработке отходов представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Показатели экономической эффективности
методов сортировки**

Наименование	Ручная сортировка	Оптическая сортировка
Предотвращенный экологический ущерб водным ресурсам, тыс.руб./год	14 609	20 997
Предотвращенный экологический ущерб атмосферному воздуху, тыс.руб./год	20	33
Предотвращенный экологический ущерб земельным ресурсам, тыс.руб./год	360,5	567,5
Общий предотвращенный экологический ущерб, тыс.руб./год	14 987	21 597
Капитальные затраты, тыс.руб.	126 440	226 503
Эксплуатационные затраты, тыс.руб./год	349 650	308 025
Прибыль производства, тыс. руб./год	-197 264	392 519
Коэффициент общей экономической эффективности капитальных вложений	-1,56	1,73
Окупаемость	-0,56	1,37
Общий экономический эффект (прибыль + общий предотвращенный экологический ущерб), тыс.руб./год	-182 276	351 116

Сравнение капитальных и эксплуатационных затрат показало, что оптическая сортировка имеет приоритет перед ручной сортировкой, в том числе и по чистоте отбираемого сырья, что делает ее более эффективной и рентабельной в рыночных условиях.

Библиографический список

1. Управление отходами. Полигоны захоронения твердых бытовых отходов / Я.И. Вайсман [и др.]. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 464 с.
2. Концепция обращения с твердыми бытовыми отходами в Российской Федерации: утв. Постановлением коллегии Госстроя России от 22.12.1999 № 17. МДС 13-8.2000.
3. Петров В.Г., Чечина А.А. Линии сортировки мусора. Перспективы применения. – Ижевск: Изд-во Ин-та прикл. мех. УрО РАН, 2005. – 112 с.
4. Автоматические системы сортировки отходов [Электронный ресурс] // Твердые бытовые отходы. – URL: <http://www.solidwaste.ru/technologys/view/146.html>
5. Слюсарь Н.Н., Борисов Д.Л., Григорьев В.Н. Разработка комплексной технологической схемы сортировки твердых бытовых отходов // Вестник ПГТУ. Урбанистика. – Пермь, 2011. – № 3. – С. 75–82.

6. Rebernig G. Methode zur Analyse und Bewertung der Stoffflüsse von Oberflächen einer Stadt // Vortrag: Seminar Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement, Wien, 08.01.2007. – URL: http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_148594.pdf.

7. Brunner P.H. MFA Case Studies for Industries. – Vortrag: CTCI Foundation – Workshop, Taipeh, Taiwan R.O.C., 05.10.2009. – URL: http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_177691.pdf.

Получено 24.06.2012

M. Grigoryeva

**ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC EVALUATION
OF MANUAL AND OPTICAL METHODS OF SORTING
OF MUNICIPAL SOLID WASTE**

In this paper the perspectives of sorting of municipal solid waste using manual and optical sorting techniques are presented. Basic methods of extraction of secondary raw materials from waste are analyzed. The method of material flow analysis and methods of determination of prevented environmental damage are described; the principles of cost-benefit analysis are stated. A method of evaluation of municipal solid waste sorting technologies, that includes material flow analysis, prevented environmental damage assessment and the analysis of cost-effectiveness, is developed. The main environmental, technical and economic indices of various technological schemes for sorting municipal solid waste using the proposed method are defined. Models of manual and optical sorting of municipal solid waste are developed, transformation ratios for all the production steps are defined. The values of prevented environmental damage and cost-effectiveness indices are evaluated. The last ones include capital and operating costs, sales income, capital expenditures payback period, total cost-effectiveness of capital investments. The conclusions on environmental and cost efficiency of manual and optical methods of sorting of municipal solid waste are drawn.

Keywords: municipal solid waste, optical sorting of waste, manual sorting of waste, prevented environmental damage, cost-effectiveness.