

# ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ СБОРА И СОРТИРОВКИ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ НА РАССРЕДОТОЧЕННЫХ ОБЪЕКТАХ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

**В.А. Пенчук, д.т.н., профессор; В.М. Даценко, к.т.н., доцент; Б.Е. Павлюк, А.А. Кравченко**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**Аннотация.** В работе рассматривается вопрос повышения эффективности технологии и средств механизации сбора и транспортировки твердых бытовых отходов (ТБО) с мест их рассредоточенного образования. Произведен анализ современных методов обращения с отходами в удаленных населенных пунктах, в ходе которого установлено то, что затраты на транспортировку отходов преобладают над другими затратами при их дальнейшей переработке или утилизации. Обоснована возможность применения мобильных установок сортировки ТБО. Численным анализом установлено, что наиболее эффективно применение мобильных установок при объемах  $2 \leq V \leq 7$  м<sup>3</sup> и дальности их сбора и доставки  $1 \leq L \leq 7$  км.

Предложена методика технико-экономического обоснования применения различных технологий и видов установок сортировки ТБО, позволяющая установить область рационального применения мобильных и стационарных установок для сортировки ТБО.

**Ключевые слова:** твердые бытовые отходы, транспортировка, степень сжатия, объем накопления отходов, контейнер, мобильная установка.



**Пенчук**  
Валентин Алексеевич



**Даценко**  
Виталий Михайлович



**Павлюк**  
Богдан Евгеньевич



**Кравченко**  
Анатолий Андреевич

## ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Организация механизированной уборки городских территорий является одной из важных и сложных задач охраны окружающей среды населенных пунктов. Улучшение благоустройства, повышение санитарного состояния городских территорий требуют решения на современном техническом уровне вопросов сбора и удаления твердых отходов (ТБО) из домовладений. Качество работ по санитарной очистке городов в значительной степени зависит от рациональной их организации и правильного выполнения предусмотренных технологических операций.

Одной из значимых составляющих этих затрат, связанных с удалением ТБО, являются затраты на сбор и транспортировку ТБО, особенно в рассредоточенных местах их образования. Поэтому изучение и создание новых энергосберегающих способов сбора и транспортировки твердых бытовых отходов с применением специализированного оборудования является актуальной и важной научно-технической задачей.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Экологической проблеме, связанной с твердыми бытовыми отходами, в последнее время уделено достаточно много внимания. В работах рассматриваются различные административно-экономические аспекты мусороудаления и уборки населенных пунктов.

В работах говорится об организации раздельного сбора ТБО непосредственно в местах их образования. Важнейшим элементом в успешной реализации масштабных схем раздельного сбора ТБО является вовлечение и участие населения.

Современные тенденции в области управления, мониторинга, технических решений, связанных с вопросом об отходах и современных способах их переработки, проанализированы в работах [3,4].

В работах [6-9] рассмотрены проблемы утилизации отходов, различные способы утилизации и переработки.

Особое внимание в выше рассматриваемых источниках уделяется минимизации затрат на сбор, транспортировку и переработку ТБО. В рассредоточенных местах образования отходов затраты на сбор и транспортировку многократно увеличиваются, преобладавая над другими составляющими [10].

### ЦЕЛЬ

Установление области применения мобильных сортировочных установок путем разработки методики назначения рациональных маршрутов движения и количества перестановок мобильных сортировочных установок для конкретных городских условий.

### ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Четкого определения понятия «малообъемности» работ по сортировке ТБО пока еще нет.

В работе делается одна из попыток дать определение категории – «рассредоточенный объект» для строительных работ.

Специфика условий производства работ на малообъемных и рассредоточенных объектах имеет много общего независимо от их частных конструктивных решений, конфигураций, габаритов и других особенностей. Эта специфика может быть сведена к следующему:

1. Довольно простая технологическая организация производства работ, не требующая сооружения временных баз для стоянки и хранения и обслуживания машин и оборудования.

2. Преимущественное использование универсальных машин.

3. Применение мобильных машин или легко транспортируемых машин и оборудования.

4. Использование широкой номенклатуры механизированного инструмента и малогабаритных машин.

Важнейшим элементом сформулированной выше системы сбора и переработки ТБО должна стать мобильная установка по сортировке. Она должна представлять собой некую территорию, расположенную на удобном расстоянии между жилым сектором и полигоном ТБО либо перерабатывающим заводом, оснащенную небольшим комплексом специализированного оборудования – гидравлическим манипулятором, сортировочной линией и при необходимости компрессором (прессом). Схема взаимодействия мобильной

сортировочной установки с рассредоточенными местами образования ТБО показана на рис. 1.

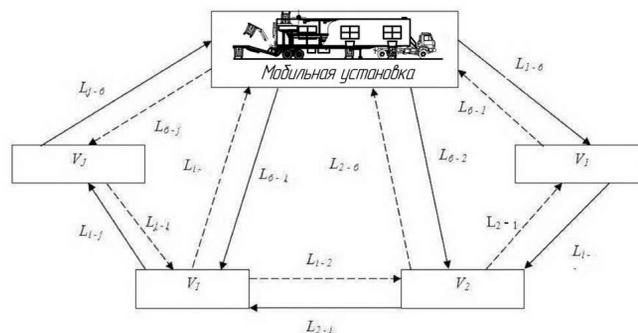


Рис. 1. Схема взаимодействия мобильной сортировочной установки с рассредоточенными местами образования ТБО:

$L_{i-j}$  – расстояние перебазировки с  $i$ -го на  $j$ -ый объект;  $V_i$  – соответственно объемы ТБО в рассредоточенных местах их образования

«Средняя» производительность машин  $P_{ЭК}^{CP}$  измеряется с объемом ТБО на конкретном объекте  $V_j^{CP}$ , а, следовательно, и ее параметр связан со «средней» производительностью.

Эффективность эксплуатации машины при условии, что  $P_{ЭК}^{год} \gg V_j$ , во многом зависит от объема ТБО на новом объекте  $V_{j+1}$  и дальности перебазировки  $L_{j,j+1}$ . Объем ТБО на объекте  $V_j$  и дальность его расположения от или до баз отдыха  $L_j$  можно охарактеризовать обобщенной характеристикой – коэффициентом рассредоточения:

$$K_p = \frac{C_{п.з} + C_{пер} L_j}{V_j \gamma_m}, \quad (1)$$

где  $C_{п.з}$  – стоимость подготовительно-заключительных работ по перебазировке машины для сбора ТБО;  $C_{пер}$  – стоимость перебазировки машины для сбора ТБО на 1 км;

$L_j$  – дальность перебазировки машины на  $j$ -ый объект;

$V_j$  – объем ТБО на  $j$ -ом объекте;

$\gamma_m$  – стоимостный эквивалент коммунальных услуг по сбору ТБО.

Коэффициент рассредоточенности стремится  $K_p \rightarrow \min$  при  $L_j \rightarrow \min$ , а  $V_j \rightarrow \max$ .

Для строительных машин в работе [10] предложен экономический показатель мобильности машин, равный:

$$M = \frac{C_{м0} \cdot T_{м0} + C_{пер} L_j}{\Pi_{см}^{F_1} \gamma_{F_1}}, \quad (2)$$

где  $C_{м0}$  и  $C_{пер}$  – соответственно стоимость часа работ по подготовке к перебазировке и на 1 км перебазировки;

$\Pi_{см}^{F_1}$  – сменная эксплуатационная производительность машин;

$\gamma_{F_1}$  – договорной коэффициент единицы объема работ, выполняемых машиной.

Применительно к мобильной сортировочной установке экономический показатель мобильности выглядит следующим образом:

$$M = \frac{\sum c_{пер} L_j}{\prod_{см}^{F_1} \gamma_{F_1}}, \quad (3)$$

где  $C_{пер}$  – стоимость транспортирования ТБО на 1 км перебазируемки;

$\prod_{см}^{F_1}$  – сменная эксплуатационная производительности машин;

$\gamma_{F_1}$  – договорной коэффициент единицы объема работ, выполняемых машиной.

Как можно увидеть, формула (3) отличается от формулы (2) лишь тем, что мы исключили фактор работ по подготовке к перебазируемке, поскольку наша установка остается стационарной, в то время как к ней осуществляется подвоз ТБО отдельными автомобилями с крановым манипулятором.

Такой экономический показатель  $M$  позволяет оценить эффективность расположения мобильной установки по сортировке ТБО. Т.е. чем ближе к нулю этот показатель, тем выгоднее мы расположили мобильную установку к местам рассредоточенного образования отходов.

Задача решается с помощью привязки к географическим координатам. С этой целью вводится локальная система координат, в которой жилые дома и место расположения мобильной установки будут представлять собой отдельные точки на плоскости. Координаты исходных домов могут быть записаны как координаты соответствующих точек в виде:  $(x_i, y_i)$ , где,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ . Искомые координаты участка можно положить равными:  $(x, y)$ . Очевидно, что они служат переменными для рассматриваемой задачи, каждая из которых может принимать действительные значения из  $R^1$ .

В качестве целевой функции данной задачи будем рассматривать сумму расстояний от искомой точки  $(x, y)$  до каждой из заданных точек  $(x_i, y_i)$   $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ , рассчитанных по формуле Евклида.

Каждое отдельное расстояние в этом случае равно:  $r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$ , где  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ , тогда общее расстояние будет определяться выражением  $r = r_1 + r_2 + \dots + r_n$ .

Таким образом, математическая постановка задачи может быть записана в следующем виде:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \rightarrow \min_{x, y \in R^1}. \quad (4)$$

В принципе, данная постановка задачи достаточно гибкая, и при необходимости под знак суммы в формуле (4) можно вносить другие показатели, такие как число жителей в доме, стоимость транспортировки (если она неодинакова) и т.п. В таком случае будем находить минимальную не сумму, а сумму произведений.

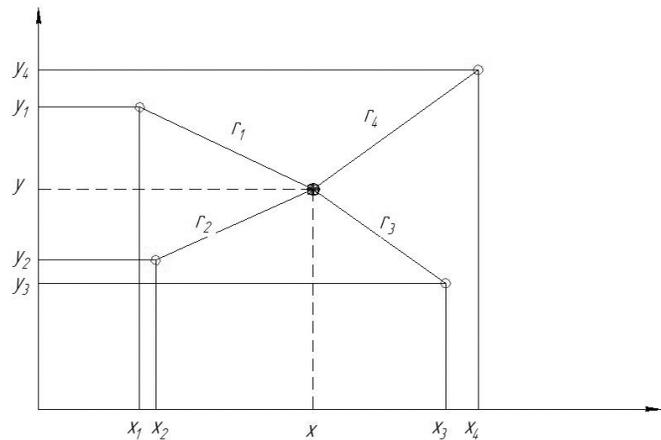


Рис. 2. Иллюстрация математической задачи о поиске месторасположения

Так, на примере города Макеевка была проведена эта работа. На рис. 3 показана математическая модель решения задачи о поиске оптимального месторасположения участка V1 и V2 с графической иллюстрацией в локальной системе координат рис. 4. Локальная система была введена с целью удобства, поскольку в реальной системе координат разница исследуемых точек в математических моделях была бы в сотых долях координат, а целая часть была бы одна и та же.

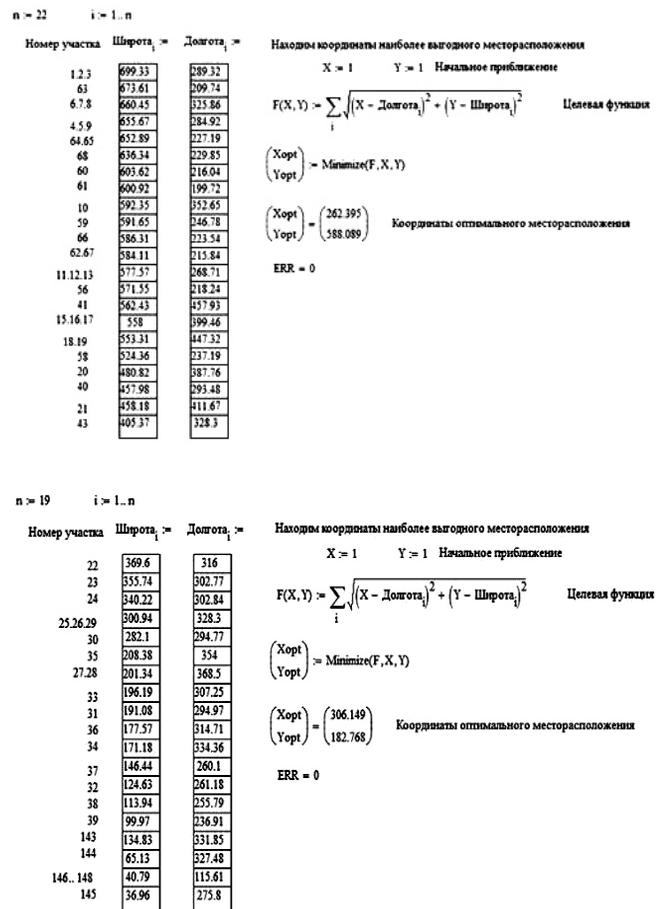


Рис. 3. Математические модели определения точек V1 и V2

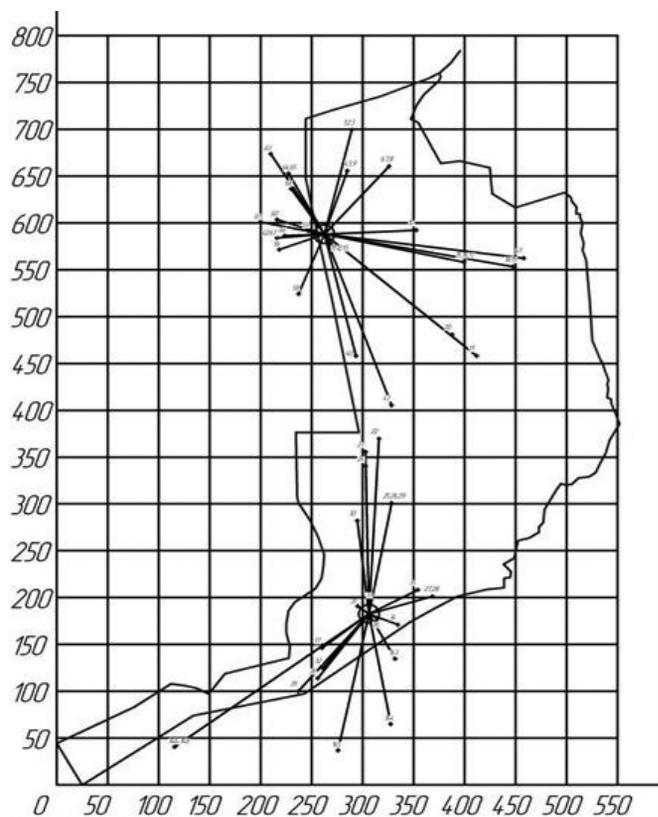


Рис. 4. Локальная система координат для точек V1, V2

Используя подобный алгоритм, были найдены оптимальные точки координат для других мест расположения установки.

Город Макеевка на основе административного деления при помощи задачи о поиске оптимального местоположения был поделен на семь участков (V1-V7) (рис. 5). Точками V1-V7 показаны рациональные места расположения, определенные при помощи задачи о поиске оптимального месторасположения.

После определения координат рациональных мест расположения точки (V1-V7), что отражено на рис. 5, необходимо решить задачу о поиске оптимального маршрута передвижения между этими точками. В данном случае эту задачу можно решать при помощи алгоритма лексического перебора, поскольку количество точек относительно невелико и процесс решения займет мало времени.

В общем случае математическая постановка задачи может быть сформулирована следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \longrightarrow \min_{x \in \Delta_{\beta}}, \quad (5)$$

где множество допустимых альтернатив  $\Delta_{\beta}$  формируется следующей системой ограничений типа равенств и неравенств:



Рис. 5. Рациональные точки расположения и маршрут движения мобильной установки сортировки ТБО

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}); \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}); \\ u_i - u_j + n \cdot x_{ij} \leq n - 1 (\forall i, j \in \{2, 3, \dots, n\}); \\ x_{ij} \in \{0, 1\}, (\forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}); \\ u_i \in R^1, (\forall i \in \{2, 3, \dots, n\}). \end{array} \right. \quad (6)$$

В данной математической модели используются также вспомогательные переменные:  $u_i (\forall i \in \{2, 3, \dots, n\})$ , которые могут принимать любые действительные значения.

Отталкиваясь от полученного рисунка 5, составляется граф возможных перемещений между точками (рис. 6).

На следующем рисунке показано решение данной задачи методом лексического перебора. На рисунке показаны: в первой рамке – исходные данные (матрица расстояний между точками). Числовые значения взяты из чертежа графа. Вторая рамка – данные на выходе (1 – вектор входит в маршрут, 0 – вектор не входит в маршрут).

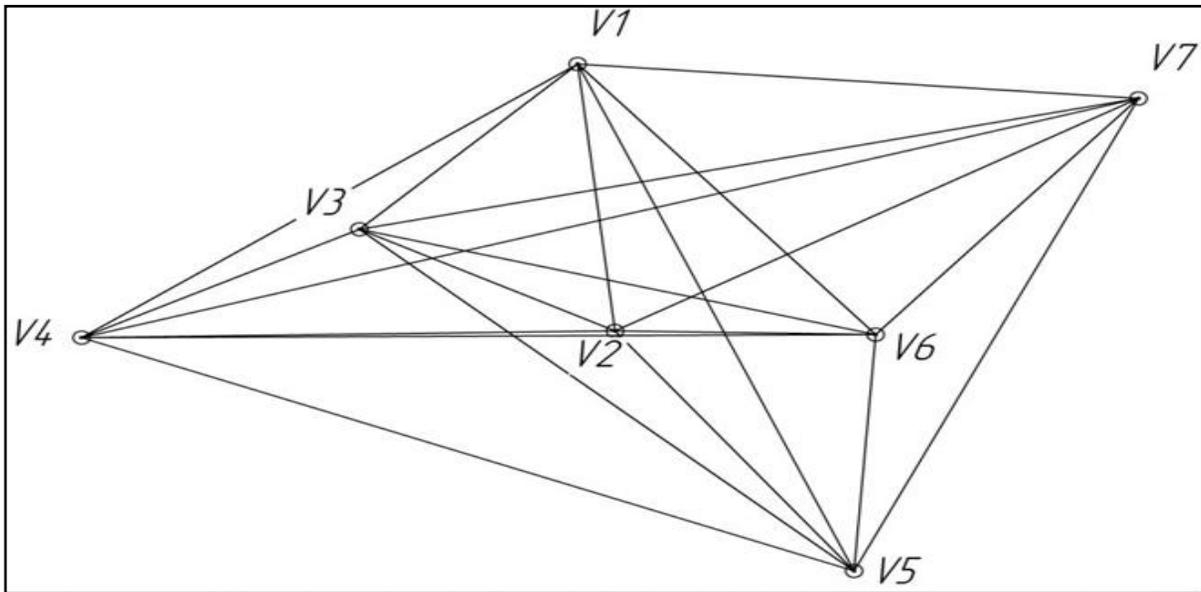


Рис. 6. Граф возможных перемещений между точками

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1		Коэффициенты целевой функции (матрица расстояний)								Значение ЦФ	
2		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7		3300,6	
3	V1	1000000	407,68	358,34	714,69	835,37	539,33	659,4			
4	V2	407,68	1000000	336,97	625,3	459,9	305,52	707,92			
5	V3	358,34	336,97	1000000	364,9	778,16	625,81	934,49			
6	V4	714,69	625,3	364,9	1000000	972,38	930,7	1290,97			
7	V5	835,37	459,9	778,16	972,38	1000000	359,86	791,36			
8	V6	539,33	305,52	625,81	930,7	359,86	1000000	472,9			
9	V7	659,4	707,92	934,49	1290,97	791,36	472,9	1000000			
10											
11	Переменные Xij	Xi1	Xi2	Xi3	Xi4	Xi5	Xi6	Xi7	Ограничения 1		
12	X1j	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
13	X2j	0	0	5,55E-17	1	1,51E-16	0	0	0	1	
14	X3j	1	0	0	2,07E-16	0	0	0	0	1	
15	X4j	4,63E-17	0	1	0	0	0	0	0	1	
16	X5j	2,31E-16	1	0	0	0	0	0	0	1	
17	X6j	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
18	X7j	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
19	Ограничения 2	1	1	1	1	1	1	1	1		
20											
21	Переменные Ui		3	5	4	2	1	0			
22	Значения ограничений										
23	Ui-Uj+6*X2j		0	-2	5	1	2	3			
24	Ui-Uj+6*X3j		2	0	1	3	4	5			
25	Ui-Uj+6*X4j		1	-1	0	2	3	4			
26	Ui-Uj+6*X5j		5	-3	-2	0	1	2			
27	Ui-Uj+6*X6j		-2	-4	-3	5	0	1			
28			-3	-5	-4	-2	5	0			

Рис. 7. Решение задачи о поиске маршрута

В результате решения задачи при помощи модели (рис. 7) маршрут передвижения включает следующие векторы: 1-7, 2-4, 3-1, 4-3, 5-2, 6-5, 7-6. Как видно из матрицы расстояний, расстояние между точками, например 7-1 и 1-7, одинаково, т.е. задача является симметричной и, следовательно, направление передвижения установки по этим точкам значения не имеет.

Решенный граф с учетом полученных векторов показан на рис. 5. На данном рисунке черными линиями показаны оптимальные векторы передвижения, синей – маршрут с учетом существующей дорожной сети города.

## ВЫВОДЫ

- Мобильные сортировочные установки ТБО – это установки на прицепе, полуприцепе, которые могут перемещаться от одного места работ к другому. В предлагаемых мобильных установках процесс сбора и доставки производится с использованием контейнеров, доставляемых к месту сортировки с помощью тракторов с гидроманипуляторами. Таким образом, в технологии с использованием мобильных установок сортировки ТБО отсутствует процесс их сжатия. Численным анализом установлено, что наиболее эффективно применение мобильных установок при объемах  $2 \leq V \leq 7 \text{ м}^3$  и дальности их сбора и доставки  $1 \leq L \leq 7 \text{ км}$ .
- Рациональное применение мобильных установок возможно в городских условиях при соответствующем оборудовании площадок их временной установки. В качестве ориентировочных точек расположения мобильных установок могут быть использованы площадки вблизи избирательных участков по выбору депутатов в городские советы, на этих участках составляются списки избирателей в количестве около 50000 чел. что соответствует объему продуктов ТБО  $150 \text{ м}^3$ .
- Не менее важен для эффективного применения технологии переработки ТБО с использованием мобильных установок, маршрут их перемещения. Для определения маршрута движения мобильной установки целесообразно использовать алгоритм лексического перебора.

4. Горох Н. П. Проблемы и перспективы накопления и переработки полимерных отходов [Текст] / Н. П. Горох, В. А. Юрченко, С. В. Свергузова и др. // – Харьков – Белгород : изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2006. – 132 с.
5. Промышленные и бытовые отходы: хранение, утилизация, переработка : учеб. пособие [Текст] / А. С. Гринин, В. Н. Новиков. // – М. : ФАИР-ПРЕСС, 2002. – 332 с., : ил.
6. Контрерас Ф. Сбалансированное управление ТБО (на примере городов Йокогама и Бостон) [Текст] / Ф. Контрерас, С. Ишии, К. Ханакэ // Твердые бытовые отходы. – 2007. – №1. – С. 50–55.
7. Краснянский М.Е. Утилизация и рекуперация отходов: учеб. пособие [Текст] / М. Е. Краснянский // 2 – е изд. – Харьков; К. : Бурун и К., КНТ, 2007.
8. Любарская М. А. Организация обращения с твердыми бытовыми отходами: учеб. пособие [Текст] / М.А. Любарская. // – СПб.: СПбГИЭУ, 2004. – 154 с.
9. Пенчук В.А. Исследование влияния подпрессовки твердых бытовых отходов на время сортировки [Текст] / Пенчук В.А., Даценко В.М. // Вестник ДОННАСА. Выпуск 2013 – 6 (104), С. 73–77.
10. Пенчук В.А. Основы механизации малообъемных и расщепоченных строительных и коммунальных работ. Монография [Текст] / Пенчук В.А., Даценко В.М., Пенчук В.В. // Донецк: изд-во «Ноулидж» (Донецкое отд.). 2011. – 265 с.
11. Пособие по мониторингу полигонов ТБО. [Текст] / Thales E&C – GKW – Consult // Донецк: Тасис. 2004. – 293 с.
12. Пупырев Е. И. Технологии переработки твердых бытовых отходов / Е. И. Пупырев // Жилищное и коммунальное хозяйство. 2007. № 3. С. 34 – 38.
13. Maarten Dubois. Municipal solid waste treatment in the EU [Текст] / Maarten Dubois, Ana Maria Martin Gonzblez, Maria Knadel // Environmental Studies, Aarhus University, 2004. – 90 p.
14. Pires A. Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques [Текст] / Ana Pires, Graca Martinho // Journal of Environmental Management, 2011. – #92. – P. 1033– 1050.

## Список литературы

1. Анализ и оценка зарубежного опыта обращения с твердыми бытовыми отходами [Текст] / Лихачев Ю.М., Федашко М.Я., Селиванова С.В. и др. // – СПб: Рос. муницип. акад., 2008. – 265 с.
2. Бабанин И.В. Оценка эффективности раздельного сбора отходов [Текст] / И. В. Бабанин // Твердые бытовые отходы. – 2006. – №7. – С. 40–43.
3. Булгаков С. Н. Новые технологии комплексной переработки твердых коммунальных отходов - дублирующая сырьевая экономика [Текст] / С. Н. Булгаков // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2007. – № 6(101). – С. 62–64.