

УДК 330.46

к.т.н. Лепило Н. Н.,
Бадуненко И. П.

(ЛГУ им. В. Даля, г. Алчевск, ЛНР, lepilonn@gmail.com)

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ДВУХЭТАПНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ВЫВОЗА

В статье разработана экономико-математическая модель управления потоками твердых коммунальных отходов, позволяющая оценивать эффективность различных вариантов утилизации отходов при двухэтапной технологии их вывоза.

Ключевые слова: экономико-математическая модель, моделирование, твердые коммунальные отходы, вторичные ресурсы, эффективность.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В настоящее время в мире наблюдается устойчивая тенденция увеличения объемов твердых коммунальных отходов (ТКО). По данным сайта группы Всемирного банка [1], к 2050 г. их объем может превысить 3,4 млрд т, поэтому управление ТКО является актуальной проблемой городов всего мира. В Российской Федерации распоряжением Правительства утверждена Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года [2]. В ней указывается, что в стране накоплено более 30 млрд т отходов, отсутствуют объекты их промышленной комплексной обработки, утилизации и обезвреживания и намечается создание межведомственной интегрированной информационной системы для управления процессами обработки, утилизации и обезвреживания отходов и утилизации вторичных ресурсов.

В связи с увеличением объема отходов актуальной является задача поиска эффективных инструментов для управления потоками ТКО и утилизации вторичных ресурсов.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследование [3] выделяет четыре направления управления ТКО: сбор и логистика, применение технологий и установок для обработки отходов, бизнес-

модели и инструменты данных. В работе [4] рассмотрены существующие в РФ модели управления ТКО, которые авторы предложили разделить на три группы: организационно-административные, технологические, математические. При этом наибольшее распространение получили организационно-административные и технологические модели, которые являются информационными, но не позволяют сравнивать альтернативные схемы управления ТКО.

В работе [5] рассмотрены вопросы двухэтапной технологии вывоза отходов с использованием мусоросортировочных станций, которые предназначены для приема, сортировки, прессования и отправки отходов на полигоны или пункты приема сырья. Применительно к этой технологии автором разработаны математические модели распределения материальных потоков и алгоритм определения размещений мусоросортировочных станций.

Существующие математические модели управления потоком отходов в основном ориентированы на классические технологии перевозки грузов через терминальные комплексы, что характерно для крупных городов, и не учитывают особенности региона.

Постановка задачи. Целью статьи является разработка экономико-математической модели управления ТКО при двухэтапной технологии их вывоза, позволяющей оценивать эффективность возможных вариантов утилизации отходов.

Изложение материала и его результаты. На территории ЛНР в настоящее время основным наиболее безопасным с экологической точки зрения вариантом утилизации отходов является их полигонное захоронение за исключением отходов I–III классов опасности, которые утилизируются. Предприятия, оказывающие услуги по сбору, вывозу и захоронению ТКО, в своей деятельности руководствуются Законами ЛНР «Об отходах производства и потребления» и «Об охране окружающей среды». Однако, с одной стороны, захоронение большого количества отходов приводит к нарушению экологического равновесия, засорению окружающей природной среды и поступлению в нее вредных веществ. С другой стороны, ТКО являются источником вторичных ресурсов, переработка которых, как показывает мировая практика, является выгодной.

Экономико-математическая модель для управления потоками ТКО нацелена на увеличение прибыли предприятия. Ее целевая функция имеет вид:

$$P = D_m + \sum_{j=1}^m P_j - Z_{mp} - Z_{np} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где D_m — доход, получаемый предприятием от клиентов в виде оплаты за оказанные услуги по вывозу и утилизации ТБО;

P_j — прибыль от сдачи j -того вида ресурса в пункты приема вторичного сырья;

m — количество видов ресурсов, предназначенных для отправки на переработку;

Z_{mp} — затраты на транспортировку ТКО от мест их накопления в контейнеры до полигона;

Z_{np} — затраты на заработную плату, ликвидацию несанкционированных свалок и другие, не рассматриваемые в модели, поскольку они не влияют на выбор оптимального варианта управления потоком ТКО.

Доход в виде оплаты за оказанные услуги по вывозу и утилизации ТКО вычисляется по формуле:

$$D_m = T_{\bar{o}} P \alpha_{\bar{o}} + T_{\text{ч}} P (1 - \alpha_{\bar{o}}), \quad (2)$$

где P — численность населения;

$T_{\bar{o}}$ — тариф на вывоз ТКО для жителей, проживающих в благоустроенном секторе;

$T_{\text{ч}}$ — тариф на вывоз ТКО для жителей, проживающих в частном секторе;

$\alpha_{\bar{o}}$ — доля населения, проживающего в благоустроенном секторе.

Прибыль от сдачи j -того вида ресурса в пункты приема вторичного сырья определяется по формуле:

$$P_j = \sum_{k=1}^{l_j} (C_{kj} V_{kj} \rho_j - C_{mj} S_{kj} N_{kj}), \quad (3)$$

где C_{kj} — цена приема j -го вида ресурса на k -том пункте приема, руб./кг;

V_{kj} — объем j -го вида ресурса, предназначенного для отправки на k -ый пункт приема, м³;

ρ_j — плотность j -го вида ресурса, кг/м³;

C_{mj} — стоимость транспортировки j -го вида ресурса до пункта приема, руб./км;

S_{kj} — расстояние от полигона до k -го пункта приема j -го вида ресурса;

N_{kj} — количество ежедневных ходок для перевозки j -го вида ресурса в k -ый пункт приема;

l_j — количество пунктов приема j -го вида ресурса.

Затраты на транспортировку ТКО до полигона определяются по формуле

$$Z_{mp} = \sum_{i=1}^n C_{mi} S_i N_i, \quad (4)$$

где C_{mi} — стоимость транспортировки ТКО для i -го маршрута, руб./км;

S_i — расстояние от точек накопления ТКО до полигона;

N_i — количество ежедневных ходок мусоровоза по i -му маршруту;

n — количество маршрутов от пунктов накопления ТКО до полигона.

Сформируем систему ограничений. Пункты приема вторичных ресурсов могут выдвинуть ограничение по количеству принимаемых ресурсов. Для обеспечения этого условия вводится ограничение:

$$V_{kj} \rho_j \leq W_{kj}, \quad (5)$$

где W_{kj} — максимальное количество j -го вида ресурса, принимаемого k -ым пунктом приема.

Кроме того, возможны ситуации, когда требуется исключить из рассмотрения пункты, временно не функционирующие по какой-либо причине. Для учета этого обстоятельства для каждого пункта введен ключ — двоичная переменная b_k , разрешающая (значение 1) или запрещающая (значение 0) перевозку в данный пункт.

Задача сводится к определению пунктов приема по каждому виду вторичных ресурсов x_{kj} , при которых будет достигнуто максимальное значение целевой функции.

С учетом ограничений, экономико-математическая модель примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi = D_m + \sum_{j=1}^m \Pi_j - Z_{mp} - Z_{np} \rightarrow \max, \\ D_m = T_{\delta} P \alpha_{\delta} + T_{\eta} P (1 - \alpha_{\delta}), \\ \Pi_j = \sum_{k=1}^{lj} b_k x_{kj} (C_{kj} V_{kj} \rho_j - C_{mj} S_{kj} N_{kj}), \\ Z_{mp} = \sum_{i=1}^n C_{mi} S_i N_i, \\ V_{kj} \rho_j \leq W_{kj}, \\ b_k = \{0, 1\}, \quad x_{kj} = \{0, 1\}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Модель может быть использована также для определения оптимальных вариантов утилизации отходов. Рассмотрим ее применение для управления ТКО на примере коммунального предприятия «Алчевское управление механизации» (КП «АУМ»).

Для выполнения производственной программы на балансе предприятия имеются 7 грузовых мусоровозов, для ликви-

дации несанкционированных свалок — один экскаватор, один погрузчик и три самосвала. Подготовка транспорта к работе осуществляется силами предприятия.

Для сбора ТКО имеется 140 площадок и 581 шт. контейнеров, установленных на территории благоустроенного и частного сектора, а также на предприятиях города. Наполнение контейнеров осуществляется потребителями услуги без сортировки ТКО. Вывоз ТКО, собранных в точках накопления, осуществляется ежедневно, кроме среды и воскресенья, по 15-ти маршрутам, из которых три — по благоустроенному сектору и 12 — по частному сектору и юридическим лицам. ТКО вследствие ликвидации несанкционированных свалок также вывозятся на полигон, где осуществляется их захоронение.

С целью использования вторичных ресурсов предложено в точках накопления ТКО силами потребителей услуги организовать их первичную сортировку на два вида:

- макулатура и пластик, которые будут использованы в качестве вторичных ресурсов;

- оставшаяся часть ТКО, подлежащая захоронению на полигоне.

Для макулатуры и пластика на каждой площадке необходимо выделить один из числа имеющихся контейнеров, содержимое которого будет вывозиться в пункт вторичной сортировки, организованный на полигоне. После этой сортировки макулатура и пластик должны отдельно вывозиться в пункты их переработки. В виду отсутствия средств на приобретение мусоросортировочной станции рассмотрим вариант при использовании ручной сортировки, а также варианты с вторичной переработкой либо макулатуры, либо пластика, не требующие сортировки.

Суточные данные о работе КП «АУМ» по транспортировке отходов на полигон, характерные для работы данного предприятия, приведены в таблице 1. В стоимость транспортировки включены затраты на топливо и амортизацию. Вывоз ТКО осуще-

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, БИЗНЕС-ИНФОРМАТИКА

ствляется 5 дней в неделю (кроме среды и воскресенья). Плотности макулатуры и ПЭТ-тары приняты по данным [6]. В настоящее время имеется возможность сдачи макулатуры в пункт приема в г. Брянке и

пластика в г. Луганске. Для этого на каждой площадке выделяется по одному контейнеру для вторичных ресурсов. Дополнительная информация, используемая при моделировании, приведена в таблице 2.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Маршрут по сбору ТКО	Спецавтотранспорт	Объем отходов, м ³	Стоимость транспортировки, руб./км	Расстояние до полигона, км	Количество ходок
№ 1, 2	МАЗ	134,4	45	22	3
№ 2, 3, 4	МАЗ	127,4	45	25	5
№ 3, 4	ГАЗ	127,7	29,5	19	5
№ 4/1	ЗИЛ	52,5	37	17	4
№ 8	ГАЗ	44,5	29,5	20	4
№ 15	ГАЗ	35	29,5	24	3

Таблица 2

Дополнительные данные для моделирования

Наименование	Значение
Расстояние от полигона до пункта сдачи макулатуры в г. Брянке и обратно до Алчевска, км	24
Расстояние от полигона до пункта сдачи пластика в г. Луганске и обратно до Алчевска, км	93
Плотность макулатуры, кг/м ³	60
Средняя плотность ПЭТ-тары, кг/м ³	31
Доля макулатуры в объеме ТКО, м ³ /м ³	0,2
Доля пластика в объеме ТКО, м ³ /м ³	0,1
Количество контейнеров ТКО, содержащих макулатуру и пластик, шт./сутки	140
Затраты на ручную сортировку одного контейнера, чел.-час.	0,5
Затраты на захоронение ТКО, руб./м ³	7,0
Характеристики самосвала Камаз-5511: стоимость транспортировки, руб./км объем кузова, м ³ грузоподъемность кузова, т	38 6,6 10
Зарплата водителя самосвала, руб./мес.	15000
Цена макулатуры в пункте приемки, руб./кг	2,5
Цена пластика в пункте приемки, руб./кг	10
Численность населения г. Алчевска на 2022 г. (по данным сайта Population HUB), человек	111360
Тариф на вывоз ТКО для жителей, проживающих в благоустроенном секторе, руб./чел.	16,53
Тариф на вывоз ТКО для жителей, проживающих в частном секторе, руб./чел.	17,93
Доля населения, проживающего в благоустроенном секторе	0,85

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, БИЗНЕС-ИНФОРМАТИКА

Необходимо выбрать оптимальный вариант утилизации отходов из следующих возможных:

- совместная загрузка в контейнер макулатуры и пластика с последующей ручной сортировкой на полигоне;
- загрузка в контейнер только макулатуры (сортировка не требуется, но пластик не сдается);
- загрузка в контейнер только пластика (сортировка не требуется, но макулатура не сдается).

Поскольку количество контейнеров для всех рассматриваемых вариантов не изменилось по сравнению с существующим вариантом, затраты на вывоз ТКО на полигон также не изменятся, уменьшатся только затраты на захоронение. Расчеты выполнены для трех значений доли макулатуры в объеме вторичных ресурсов ТКО. Основные результаты моделирования приведены в таблице 3.

Как видно из приведенных результатов, использование вторичных ресурсов вы-

годно для любого из рассматриваемых вариантов. Полученная ежемесячная прибыль от утилизации отходов позволит хотя бы частично улучшить финансовое состояние предприятия.

Оптимальный вариант утилизации отходов (ежемесячная прибыль выделена жирным шрифтом в таблице 3) зависит от доли ресурса в объеме ТКО. Если один из вторичных ресурсов составляет 2/3 их объема, то экономически выгодно выделить для него контейнер, а второй вид ресурса не использовать, что позволяет исключить вторичную сортировку. Если доли этих ресурсов примерно одинаковы, то становится выгодным организовать вторичную сортировку на полигоне и использовать и макулатуру, и пластик. На выбор оптимального варианта будут влиять и другие факторы, особенно характеристики используемого транспорта для вывоза отходов и местоположение пунктов приема вторичных ресурсов.

Таблица 3

Результаты моделирования

Наименование параметров	Макулатура	Пластик	Макулатура	Пластик	Макулатура	Пластик
Доля в объеме ТКО	0,2	0,1	0,15	0,15	0,1	0,2
Объемы вторичных ресурсов	104,30	52,15	78,23	78,22	52,15	104,30
Вес вторичных ресурсов, кг	6258,0	1616,6	4693,5	2425,0	3129,0	3233,3
Затраты на одну ходку до пункта сдачи	912	3534	912	3534	912	3534
Объемы уплотненных ресурсов	34,77	17,38	26,08	26,08	17,38	34,77
Количество ходок до пунктов	6	3	4	4	3	6
Уменьшение затрат на захоронение	243,37	121,68	182,53	182,53	121,68	243,37
Ежедневная прибыль	8916,4	4936,2	6768,3	8796,3	4458,2	9872,4
Ежемесячная прибыль	178327	98724	135365	175925	89164	197447
Ежемесячная прибыль при сдаче макулатуры и пластика	177051		211291		186611	
Ежемесячная прибыль для оптимального варианта:						
% от платы за услуги	9,57		11,33		10,59	
% от затрат на вывоз и захоронение ТКО	40,44		47,92		44,78	

Выводы и направление дальнейших исследований. Установлено, что проблема управления потоками твердых коммунальных отходов является актуальной вследствие постоянного увеличения объемов отходов и необходимости принятия мер по защите окружающей среды. Предложено организовать в точках накопления отходов их разделение на два вида — используемые в качестве вторичных ресурсов и не подлежащие переработке. Разработана экономико-математическая модель, учитывающая

затраты на подготовку и транспортировку вторичных ресурсов в пункты их переработки, получаемый доход и позволяющая оценить эффективность различных вариантов утилизации отходов при двухэтапной технологии их вывоза. Выполненное моделирование показало экономическую целесообразность перехода на двухэтапную технологию вывоза отходов, поэтому в дальнейшем планируется расширить перечень пунктов утилизации отходов и выбирать оптимальные из них с учетом конъюнктуры цен и расстояний.

Библиографический список

1. *WHAT A WASTE 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste> (дата обращения: 16.02.2022).
2. *Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года* : сайт правительства Российской Федерации [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nparso.ru/index.php/41-strategiya-razvitiya-promyshlennosti-po-obrabotke-utilizatsii-i-obezvrezhivaniyu-otkhodov-proizvodstva-i-potrebleniya-na-period-do-2030-goda-utverzhdenu-rasporyazheniem-pravitelstva-rossijskoj-federatsii-ot-25-yanvarya-2018-g-84-r> (дата обращения: 16.02.2022).
3. Степанова, И. А. Обзор систем сбора и удаления отходов в антропогенных экосистемах [Текст] / И. А. Степанова, А. С. Степанов // Самарский научный вестник, 2020. — Т. 9. — № 2 (31). — С. 121–131.
4. Вольнкина, Е. П. Анализ моделей управления отходами и разработка интегрированной модели для регионального управления твердыми бытовыми отходами [Текст] / Е. П. Вольнкина, С. Н. Кузнецов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. — 2013. — № 3 (5). — С. 47–59.
5. Олимпиев, А. В. Повышение эффективности двухэтапной технологии вывоза отходов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / А. В. Олимпиев ; Мос. автомобильно-дорожный гос. техн. ун-т (МАДИ). — М., 2014. — 23 с.
6. Пересчет объема твердых бытовых отходов в вес [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://netmus.ru/press-center/articles/pereschyot-obyoma-tverdyih-byitovyih-otkhodov-v-ves/> (дата обращения: 25.02.2022).

© Лепило Н. Н., Бадуненко И. П.

Рекомендована к печати д.э.н., проф. каф. СКС ДонГТИ Бизяновым Е. Е., к.э.н., доц. каф. ЭУ ЛГУ им. В. Даля Жилиной М. В.

Статья поступила в редакцию 28.02.2022.

PhD in Engineering Lepilo N. N., Badunenko I. P. (LSU named after V. Dahl, Alchevsk, LPR, lepilonn@gmail.com)

A MODEL FOR MANAGING THE FLOWS OF SOLID MUNICIPAL WASTE WITH A TWO-STAGE TECHNOLOGY FOR THEIR REMOVAL

The article develops an economic and mathematical model for managing the flows of solid municipal waste, which allows to assess the effectiveness of various waste disposal options with a two-stage technology of their removal.

Key words: economic and mathematical model, modeling, solid municipal waste, secondary resources, efficiency.