

УДК 330.46:338.465

А. А. Попов

ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова»,
Москва, e-mail: popov.aa@rea.ru, a1710p@mail.ru

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОМПЛЕКСА ПРОГРАММНЫХ
МОДУЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СБОРА И ТРАНСПОРТИРОВКИ
ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ В РАМКАХ РАЗВИТИЯ
ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА**

Ключевые слова: жилищно-коммунальное хозяйство, твердые коммунальные отходы, сбор и транспортировка, информационная система, многоквартирный дом, программный модуль, алгоритм.

Статья посвящена исследованиям вопросам автоматизации сбора и транспортировки твердых коммунальных отходов. Целью работы является анализ состояния и определение тенденций развития сферы жилищно-коммунального хозяйства, а также разработка методики обоснования выбора и оценки экономической эффективности внедрения программного обеспечения для управления сбором и транспортировкой твердых бытовых отходов. Рассмотрены математические модели, используемые для прогнозирования вида и количества отходов. Модели могут быть реализованы в перспективных информационных системах управления твердыми коммунальными отходами. Определен перечень параметров, характеризующих сбор и транспортировку твердых коммунальных отходов. Полученный набор параметров позволяет отслеживать выполнение цикла сбора и транспортировки твердых коммунальных отходов. Окончание цикла наступает при балансе между количеством твердых коммунальных отходов, сгенерированным организациями по управлению многоквартирными домами, и количеством твердых коммунальных отходов, выгруженных из мусоровозов на сортировочные предприятия. Обоснован состав и функциональные возможности набора программных модулей для автоматизации сбора и транспортировки твердых коммунальных отходов. Набор программных модулей использует математические модели для определения совокупности маршрутов движения мусоровозов, которой соответствует минимальные затраты. Рассмотрены порядок взаимодействия программных модулей и условия, при которых внедрение набора программных модулей будет экономически эффективным.

А. А. Попов

Plekhanov Russian University of Economics, Moscow,
e-mail: popov.aa@rea.ru, a1710p@mail.ru

**SUBSTANTIATION OF THE CHOICE OF THE COMPLEX OF SOFTWARE
MODULES FOR AUTOMATION OF THE COLLECTION AND TRANSPORT
OF SOLID MUNICIPAL WASTE WITHIN THE FRAMEWORK
OF THE DEVELOPMENT OF HOUSING AND COMMUNAL SERVICES**

Keywords: housing and communal services, municipal solid waste, collection and transportation, information system, apartment building, software module, algorithm.

The article is devoted to research on automation of collection and transportation of municipal solid waste. The aim of the work is to analyze the state and determine development trends in the housing and communal services, as well as the development of methods for substantiating the selection and evaluation of the economic efficiency of introducing software for managing the collection and transportation of municipal solid waste. The mathematical models used to predict the type and amount of waste are considered. Models can be implemented in promising solid municipal waste management information systems. A list of parameters characterizing the collection and transportation of municipal solid waste has been determined. The resulting set of parameters allows you to track the implementation of the collection and transportation cycle of municipal solid waste. The end of the cycle occurs when there is a balance between the amount of municipal solid waste generated by apartment building management organizations and the amount of municipal solid waste unloaded from garbage trucks to sorting plants. The composition and functionality of a set of software modules for automating the collection and transportation of municipal solid waste has been substantiated. A set of software modules uses mathematical models to determine the set of routes for the movement of garbage trucks, which corresponds to the minimum cost. The order of interaction of software modules and the conditions under which the use of a set of software modules will be cost-effective are considered.

Введение

Управление твердыми коммунальными отходами (ТКО) является одной из наиболее сложных проблем из-за от-

сутствия достоверных данных хранению, сбору, транспортировке, разделению, переработке и захоронению. Существует положительная взаимосвязь, в которой от-

ходы образуются прямо пропорционально уровню экономического процветания и достигнутому уровню промышленного роста. Состав отходов становится более сложным (широкое распространение получили пластиковые и электронные потребительские товары). Такая тенденция усложняет управление отходами. Стратегия управления ТКО, их состав и количество зависят от культурных, климатических и социально-экономических характеристик региона. Основные проблемы управления ТКО включают интеграцию управления ТКО в развивающихся и промышленно развитых городах, увеличение и стандартизацию сбора и анализа данных о количестве и видах ТКО, которые имеют тенденцию к усложнению [1–3]. В США разработана стратегия иерархического ранжирования управления отходами. При этом иерархия управления отходами состоит из четырех уровней [4]. Европейский союз ввел пятиступенчатую иерархию управления отходами (предот-

вращение, подготовка к повторному использованию, повторное использование, рециркуляция, утилизация) в которой иерархия управления отходами представлена в виде пирамиды и указывает на порядок предпочтения действий по управлению отходами [5]. Усовершенствованной версией такой иерархии является иерархия управления отходами «Три R»: сокращение отходов (reduce), включающее их предотвращение (prevention), повторное использование (reuse), переработка (recycle). Целью такого иерархического управления отходами является нулевое количество отходов для захоронения на полигоне или для сжигания. Произведенные товары и продукты должны производиться и потребляться в соответствии с принципом максимального и оптимального использования [6] (рис. 1). Элементы иерархии «Три R», соответствующие рассматриваемой в данной работе информационной системе сбора и транспортировке ТКО, отмечены на рис. 1 темным цветом.

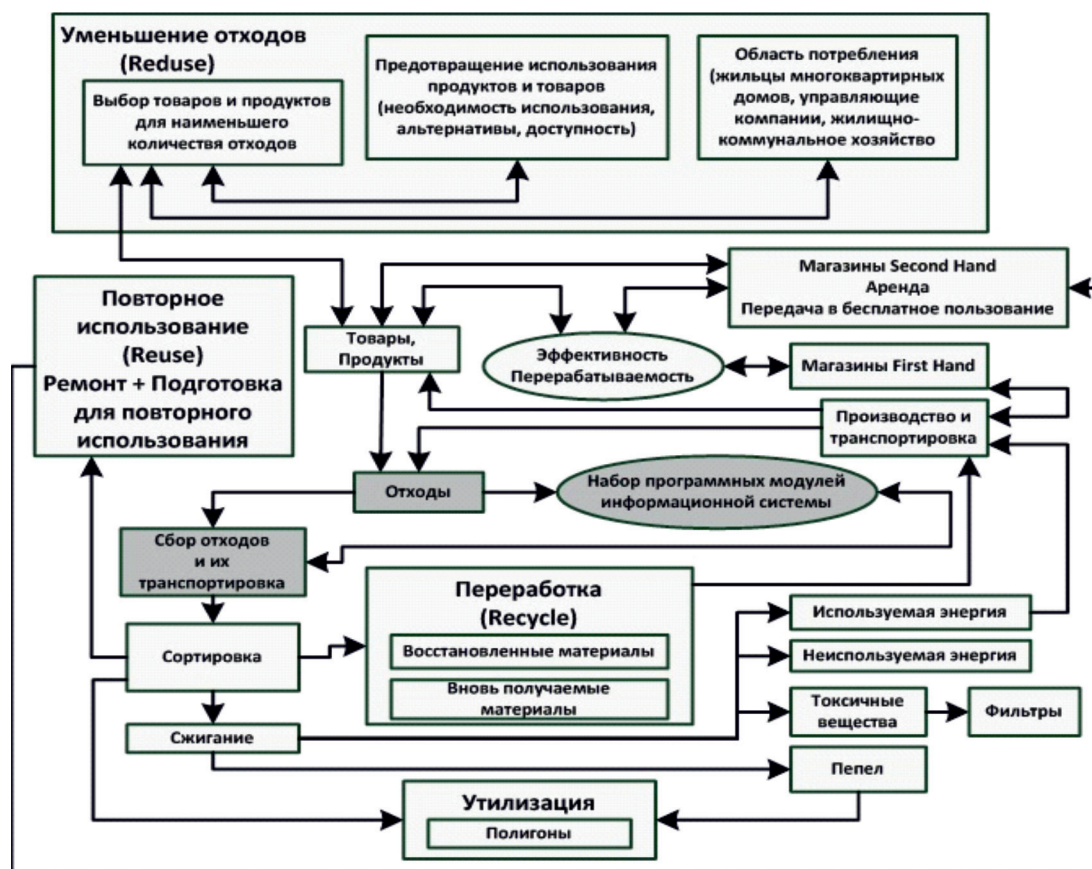


Рис. 1. Усовершенствованная иерархия «Три R»

Таким образом, вопросы управления ТКО является актуальной. В частности, является актуальным рассмотрение вопросов автоматизации управления ТКО в рамках усовершенствованной иерархии «Три R».

Целью работы является анализ состояния и определение тенденций развития сферы жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), а также разработка методов обоснования выбора и оценки экономической эффективности внедрения программных средств для управления сбором и транспортировкой ТКО. Работа выполнена в рамках специальности 08.00.05.

Объектом исследования является система управления ТКО в рамках управления ЖКХ, в частности, в рамках управления многоквартирными домами (МКД).

Предметом исследования является определение состава модулей информационной системы управления сбором и транспортировкой ТКО.

Математические модели для управления отходами

Принятие решений в управлении сбором и транспортировкой ТКО является сложной проблемой, включающей в себя несколько уровней. Различные компоненты ТКО по-разному влияют на процессы сбора и транспортировки ТКО. Рассмотрим математические модели, которые могут быть использованы в работе программных модулей перспективной информационной системы для управления сбором и транспортировкой ТКО.

В [7] приведены модели для прогнозирования частоты образования ТКО с помощью нейронной сети и множественной линейной регрессии. В [8] для прогнозирования количества ТКО используется оптимизированная многомерная модель Грея. Определен наиболее важный фактор (плотность населения), который оказывает наибольшее влияние на количество ТКО. В [9] демографические показатели используются в качестве входных переменных для прогнозирования количества видов ТКО с помощью регрессионного анализа и анализа временных рядов. В [10] для планирования системы управления ТКО используется смешанное целочисленное

линейное программирование с нечеткими случайными ограничениями. В [11] используются целочисленное линейное программирование и смешанное целочисленное программирование для моделирования сценариев управления ТКО. В [12] для управления отходами используется метод линейного программирования с нечетким стохастическим интервалом. В [13] используется нечеткое параметрическое программирование для выбора вида отходов и выбора объектов для их обработки и утилизации (производится распределение ТКО с учетом нечетких значений, характеризующих количество отходов и эксплуатационные возможности объектов по обращению с отходами). В [14, 15] использована мультиагентная модель представления системы управления ТКО. В [16] рассматривается использование генетического алгоритма для минимизации транспортных расходов при выполнении сбора и транспортировки ТКО с учетом технических, экономических и экологических ограничений. В [17] представлены полустатическая и динамическая модель маршрутизации мусоровозов по кратчайшему пути, которая дополнена возможностью использования устройств Интернета вещей.

Использование цифровых технологий в управлении ТКО

Для управления ТКО стали использоваться цифровые технологии (облачные технологии, технология Интернет вещей, нейросети и искусственный интеллект, технология блокчейн). В [15, 18] рассматривается задача управления отходами за счет использования устройств Интернета вещей, устанавливаемых в мусорных контейнерах. С помощью данных, полученных от датчиков, производится минимизация транспортных расходов. В [19] рассмотрено использование плат Arduino с микроконтроллером и модулем GSM и инфракрасных датчиков для определения уровня ТКО в мусорных контейнерах. Реализована интеллектуальная составляющая для управления ТКО (сбор и транспортировка ТКО производится только тогда, когда это необходимо). В [20] рассматривается использование облачных технологий и устройств Интернета вещей, исполь-

зующих протокол беспроводной связи ZigBee, установленных в мусорных контейнерах для определения уровня отходов в мусорных контейнерах и выдачи водителям мусоровозов сигналов о наполнении мусорных контейнеров. В [21] рассматривается возможность использования мобильного программного приложения для организации сбора некоторых типов ТКО. В [22] предлагается использовать микрокомпьютеры Raspberry Pi и ультразвуковые датчики для измерения уровня отходов в мусорных контейнерах. Данные, характеризующие уровень отходов в мусорных контейнерах, используются для прогнозирования уровня ТКО в контейнерах, а также для динамического формирования маршрутов мусоровозов. В [23] рассматривается использование среды Big Bucket IoT Cloud, в которой интеллектуальные мусорные контейнеры оснащены устройствами Интернета вещей и программным обеспечением с открытым исходным кодом. В [24] показана возможность использования технологий Интернета вещей и технологии блокчейн (интеллектуальных контрактов, децентрализованной автономной организации и собственной криптовалюты) для разработки интеллектуальной системы управления ТКО, использующей для взаимодействия с пользователями системы программного робота Telegram. В [25] рассматривается использование устройств Интернета вещей, взаимодействующих с помощью протокола MQTT, для определения уровня заполнения контейнеров для мусора. Данные о достижении уровнем отходов порогового значения используются для определения оптимального маршрута для сбора ТКО отходов из заполненных контейнеров с использованием формулы Хаверсайна и алгоритма коммивояжера. После этого информация о маршруте для сбора ТКО передается водителям мусоровозов через приложение обмена сообщениями Telegram. В [26] рассматривается интеллектуальная система мониторинга ТКО с использованием технологии Интернета вещей и облачной платформы ThingSpeak. Данные об уровнях заполнения мусорных контейнеров отправляются уведомления (твиты) в соответствующие органы управления о состоянии

мусорных контейнеров. В [27] рассматривается облачная платформа WasteIQ, которая обеспечивает взаимодействие CRM-системы, ERP-системы, а также различного программного обеспечения, подключенного к инфраструктуре сбора отходов с помощью программных интерфейсов для обмена данными.

Таким образом, перспективная информационная система по управлению сбором и транспортировкой ТКО представляет собой совокупность программных модулей, позволяющих использовать умные контейнеры, которые в режиме реального времени передают данные о своём состоянии и расположении на сервер, расположенный в организации по сбору и транспортировке отходов или в облаке. При этом данные, полученные от контейнеров, используются для прогнозирования состава и количества отходов, а также для определения оптимальных маршрутов мусоровозов для сборки отходов. Также типовое решение должно предоставлять возможность работы с мобильным приложением, в том числе, для доведения маршрутов движения водителям мусоровозов

Параметры, характеризующие сбор и транспортировку твердых коммунальных отходов

В качестве источника отходов рассматриваются организации по управлению МКД, входящие в состав массива $ORG = \{org(io); io = 1, 2, \dots, IO\}$, где IO – количество организаций, генерирующих отходы. Каждая io -я организация в течение фиксированного интервала времени генерирует отходы iw -го вида (элемент $w(io, iw)$ матрицы W , $iw = 0$ – ТКО в смешанном виде, $iw \neq 0$ – раздельно собираемые отходы iw -го вида). Окончание такого интервала времени является началом цикла работ по сбору и транспортировке ТКО. При этом

$$W = \{w(io, iw); iw = 0, 1, 2, \dots, IW; io = 1, 2, \dots, IO\},$$

где IW – количество видов отходов.

Общее количество отходов, сгенерированных всеми организациями, равно

$$WG = \sum_{io=1}^{IO} \sum_{iw=0}^{IW} w(io, iw).$$

Для прогнозирования количества и вида отходов, сгенерированных организациями по управлению МКД, могут быть использованы положения, лежащие в основе математических моделей, приведенных в [7–9].

Для сбора отходов используются «умные» контейнеры, предназначенные как для смешанного, так и для раздельного сбора отходов. По аналогии с [27] может быть KT типов контейнеров («умные» вакуумные контейнеры, «умные» подземные контейнеры, обычные «умные» наземные контейнеры), на которых установлены датчики, фиксирующие уровень отходов в контейнере. Для iw -го вида ТКО используются $K(iw)$ мусорных контейнеров $K(iw) = J(1, iw) + J(2, iw) + \dots + J(KT, iw)$, где $J(k, iw)$, количество контейнеров k -го типа для раздельного сбора iw -го вида ТКО. Отходы iw -го вида, поступившие от io -й организации, размещаются в одном или нескольких контейнерах k -го типа для iw -го вида ТКО. Таким образом:

$$w(io, iw) = kn(io, iw, 1) + kn(io, iw, 2) + \dots + kn(io, iw, KT);$$

$$kn(io, iw, k) = kr(io, iw, k, 1) + kr(io, iw, k, 2) + \dots + kr(io, iw, k, J(iw, k));$$

где $kn(io, iw, k)$, $kr(io, iw, k, j)$ – соответственно количество отходов iw -го вида, которые io -я организация размещает в контейнерах k -го типа, и количество отходов iw -го вида, которые io -я организация размещает в j -м контейнере k -го типа.

Общее количество отходов, загруженных в контейнеры, равно

$$WS = \sum_{io=1}^{IO} \sum_{iw=1}^{IW} \sum_{k=1}^{KT} \sum_{j=1}^{J(k, iw)} kr(io, iw, k, j).$$

Цикл загрузки сгенерированных отходов в контейнеры завершается при $WS = WG$.

Для сбора и транспортировки ТКО используются MR мусоровозов. При этом для транспортировки отходов iw -го вида используется $M(iw)$ мусоровозов. Количество ТКО iw -го вида, загруженных в m -й мусоровоз из контейнеров, равно $WR(iw, m)$. В m -й мусоровоз для

ТКО iw -го вида загрузка ТКО может производиться из одного или нескольких контейнеров различных типов:

$$WR(iw, m) = mr(iw, m, 1) + mr(iw, m, 2) + \dots + mr(iw, m, KT);$$

$$mr(iw, m, k) = r(iw, m, k, 1) + r(iw, m, k, 2) + \dots + r(iw, m, k, J(k, iw)),$$

где $mr(iw, m, k)$, $r(iw, m, k, j)$ – количество ТКО iw -го вида, загружаемых в m -й мусоровоз из мусорных контейнеров t -го типа, и количество ТКО iw -го вида, загружаемых в m -й мусоровоз, из j -го мусорного контейнера k -го типа.

Общее количество перевозимых ТКО равно

$$WP = \sum_{iw=1}^{IW} \sum_{m=1}^{M(iw)} \sum_{k=1}^{KT} \sum_{j=1}^{J(k, iw)} r(iw, m, k, j).$$

Цикл загрузки отходов в контейнеры завершается при $WP = WS$.

Контейнеры и мусоровозы характеризуются значениями параметров, отображающими местоположение (координаты). Каждый контейнер характеризуется уровнем заполнения ТКО. Каждый мусоровоз характеризуется остатком горючего и максимальным количеством ТКО, которое может быть загружено. Таким образом:

$KP(iw, k, j)$, $KL(iw, k, j)$ – местоположение j -го контейнера k -го типа для сбора ТКО iw -го вида, а также уровень заполнения j -го контейнера k -го типа для сбора ТКО iw -го вида;

$MP(iw, m)$, $MF(iw, m)$, $MM(iw, m)$ – местоположение m -го мусоровоза для сбора и транспортировки отходов iw -го вида, остатки горючего в m -м мусоровозе, а также максимальное количество ТКО iw -го вида, которое может быть загружено в m -й мусоровоз.

Параметры, характеризующие мусорные контейнеры, входят в состав множества

$$KF = \{kn(iw, io, k), KP(iw, k, j), KL(iw, k, j);$$

$$w = 1, 2, \dots, IW; k = 1, 2, \dots, KT;$$

$$j = 1, 2, \dots, J(k, iw)\}.$$

Параметры, характеризующие работу мусоровозов по сбору и транспортировке ТКО, входят в состав множества ST :

$$ST = \{WMR(iw, m), MP(iw, m);$$

$$iw = 1, 2, \dots, IW; m = 1, 2, \dots, M(iw)\}.$$

Ограничения, накладываемые на работу мусоровозов, входят в состав множества $DR = \{MP(iw, m), MF(iw, m), MM(iw, m);$

$$iw = 1, 2, \dots, IW; m = 1, 2, \dots, M(iw)\}.$$

Выгрузка отходов из мусоровозов производится на PP предприятий, осуществляющих сортировку отходов. Отсортированные отходы в соответствии с рис. 1 могут направляться на повторное использование, на переработку, на утилизацию на полигоне и на сжигание. Количество ТКО iw -го вида, выгруженных на pp -е предприятие:

$$WW(pp) = ZW(pp, 0) + ZW(pp, 1) +$$

$$+ ZW(pp, 2) + \dots + ZW(pp, IW),$$

$$ZW(pp, iw) = s(pp, iw, 1) + s(pp, iw, 2) +$$

$$+ \dots + s(pp, iw, M(iw)),$$

$ZW(pp, iw)$, $s(pp, iw, m)$ – количество отходов iw -го вида, выгруженных из мусоровозов на pp -е сортировочное предприятие, и количество отходов iw -го вида, а также количество ТКО iw -го вида, выгружаемые на pp -е сортировочное предприятие из m -го мусоровоза. Количество ТКО всех видов, выгруженных из мусоровозов на сортировочные предприятия:

$$WT = \sum_{pp=1}^{PP} \sum_{iw=1}^{IW} \sum_{m=1}^{M(iw)} s(pp, iw, m).$$

Цикл сбора и транспортировки ТКО завершается при $WT = WP$. После окончания очередного цикла сбора и транспортировки ТКО, который продолжается в течение промежутка времени Δt , производится запись значения WT в элемент $cw(u)$ множества $CW = \{cw(u); u = 1, 2, \dots, U\}$. После этого при необходимости происходит переход к следующему циклу сбора и транспортировки ТКО.

Каждое сортировочное предприятие характеризуется местоположением $SP(pp)$, где $pp = 1, 2, \dots, PP$. Также сортировочное предприятие имеет ограничение на максимальное количество ТКО iw -го вида, которое может принять в текущий момент времени: $WW(pp, iw) \leq WW_{max}(pp, iw)$. Выгрузка ТКО на сортировочное предприятие может производиться из одного или нескольких мусоровозов с учетом указанных ограничений. Параметры, характеризующие работу сортировочных предприятий, входят в состав множества $SR = \{SP(pp), WW_{max}(pp, iw); pp = 1, 2, \dots, PP; iw = 1, 2, \dots, IW\}$.

Для управления сбором ТКО и их транспортировкой могут быть использованы положения, лежащие в основе математических моделей, приведенных в [10–14].

Каждый мусоровоз движется по назначенному маршруту для сбора ТКО из контейнеров и их транспортировки отходов на сортировочные предприятия. Маршрут каждого мусоровоза зависит от следующих параметров:

- вид ТКО, для транспортировки которого предназначен мусоровоз;
- местоположения мусоровоза, контейнеров и сортировочных предприятий;
- уровень заполнения контейнеров;
- запас горючего в мусоровозе;
- максимальное количество ТКО, которое может быть загружено в мусоровоз;
- ограничения на количество ТКО различных видов, которые может принять сортировочное предприятие в текущий момент времени.

Для каждого m -го мусоровоза, предназначенного для перевозки iw -го вид ТКО, с учетом приведенных выше параметров строится $Z(iw, m)$ вариантов маршрутов $RR(iw, m, z)$ с учетом различной последовательности объезда контейнеров и предприятий, сортирующих ТКО. При этом количество $Z(iw, m)$ маршрутов для каждого мусоровоза может отличаться.

$$RR(iw, m, z) = FR(KP(iw, k, j), KL(iw, kt, j),$$

$$MP(iw, m), MF(iw, m),$$

$$MM(iw, m), SP(pp), WW_{max}(pp, iw), z),$$

где $k = 1, 2, \dots, KT$; $m = 1, 2, \dots, M(iw)$; $pp = 1, 2, \dots, PP$; $z = 1, 2, \dots, Z(iw, m)$;

FR – функция для построения маршрутов движения мусоровозов, собирающих и транспортирующих ТКО на сортирующие предприятия;

z – номер маршрута мусоровоза;

$Z(iw, m)$ – количество маршрутов, построенных для m -го мусоровоза собирающего и транспортирующих iw -й вид ТКО.

В качестве функции FR в программных модулях могут быть использованы подходы, которые приведены в [16, 17]. Маршруты мусоровозов являются элементами множества RT :

$$RT = \{RR(iw, m, z); iw = 1, 2, \dots, IW;$$

$$m = 1, 2, \dots, M(iw);$$

$$z = 1, 2, \dots, Z(iw, m)\}.$$

Каждому маршруту мусоровоза соответствует стоимость сбора и транспортировки ТКО на сортировочные предприятия. $P(iw): \{RR(iw, m, z)\} \rightarrow \{PS(iw, m, z)\}$, где $PAY(iw)$ – функция, преобразующая маршруты мусоровозов, перевозящих отходы iw -го вида, в затраты на сбор и транспортировку ТКО.

Постановка задачи

Дано:

1. Массив ORG . Матрица W .
2. Множества KF, ST, DR, RT, SR .
3. Функции $PAY(iw), iw = 1, 2, \dots, IW$.

Требуется определить:

Набор программных модулей $PM = \{pm(1), pm(2), \dots, pm(P)\}$, позволяющий определить комбинацию маршрутов мусоровозов R^* , которой соответствуют минимальные затраты MNP на сбор и транспортировку для сбора и транспортировки ТКО:

$$PM: (ORG, W, KF, ST, DR, RT, SR, PAY(iw)) \rightarrow MNP,$$

$$R^* = \{RTR(iw, m, z^*(iw, m));$$

$$iw = 1, 2, \dots, IW; m = 1, 2, \dots, M(iw)\},$$

$$MNP = P(1)(R^*) +$$

$$+ P(2)(R^*) + \dots + P(IW)(R^*),$$

$z^*(iw, m)$ – номер маршрута для множества R^* , выбранный из числа $Z(iw, M(iw))$

маршрутов m -го мусоровоза для сбора и транспортировки ТКО iw -го вида.

Программные модули, входящие в состав информационной системы для сбора и транспортировки твердых коммунальных отходов, и их взаимодействие

Для управления сбором и транспортировкой ТКО необходимы следующие программные модули:

1. Программный модуль GEN , предназначенный для ввода массива ORG и матрицы W , а также для определения количества сгенерированных отходов WG .

2. Программный модуль $WCONT$ для учета загрузки количества сгенерированных отходов в мусорные контейнеры различного типа с учетом их уровня заполнения, а также для определения количества ТКО, закруженных в мусорные контейнеры WS .

3. Программный модуль $GTRCONT$ для определения количества ТКО, загруженных в мусоровозы WP .

4. Программный модуль GTR для учета и уточнения ограничений на загрузку и движение мусоровозов.

5. Программный модуль $RESSORT$ для учета и уточнения ограничений на выгрузку ТКО из мусоровозов на сортировочные предприятия.

6. Программный модуль $ROUTGTR$ для определения набора маршрутов для каждого мусоровоза.

7. Программный модуль $ROUTOPT$ для определения набора маршрутов мусоровозов R^* , которому соответствует MNP .

8. Программный модуль $DRIVERGTR$ для доведения маршрутов до водителей мусоровозов.

9. Программный модуль $GTRSORT$ для определения WT – количества ТКО, выгруженных из мусоровозов на предприятия, занимающиеся сортировкой отходов.

10. Программный модуль $CYCLE$ для подготовки информационной системы к новому циклу сбора и транспортировки отходов.

Взаимодействие программных модулей, входящих в набор PM , происходит в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 2.

Таким образом, использование набора программных модулей PM позволяет достичь баланса количества сгенерированных отходов, отходов, загруженных в мусорные контейнеры, отходов, перевозимых мусоровозами, и отходами, размещенными на сортировку. При этом достигаются минимальные затраты MNP для сбора и транспортировки отходов. В случае окончания процесса сбора и транспортировки отходов остается архив количества отходов в виде множества CW .

Использование набора программных средств для достижения минимальных затрат MNP на сбор и транспортировку

ТКО позволяет снизить общие расходы организаций в сфере ЖКХ на величину $\Delta X_{ТКО}$. При этом $\Delta X_{ТКО} = X_{PM} - X$, где X – затраты на сбор и транспортировку ТКО без использования набора программных модулей, а X_{PM} – затраты на сбор и транспортировку ТКО с использованием набора программных модулей. В состав расходов организаций в сфере ЖКХ на сбор и транспортировку ТКО входят затраты: на работу с мусоровозами (техническое обслуживание, организацию аренды мусоровозов, а также оплата труда водителей мусоровозов) и на топливо, затрачиваемое мусоровозами в процессе сбора и транспортировки ТКО;

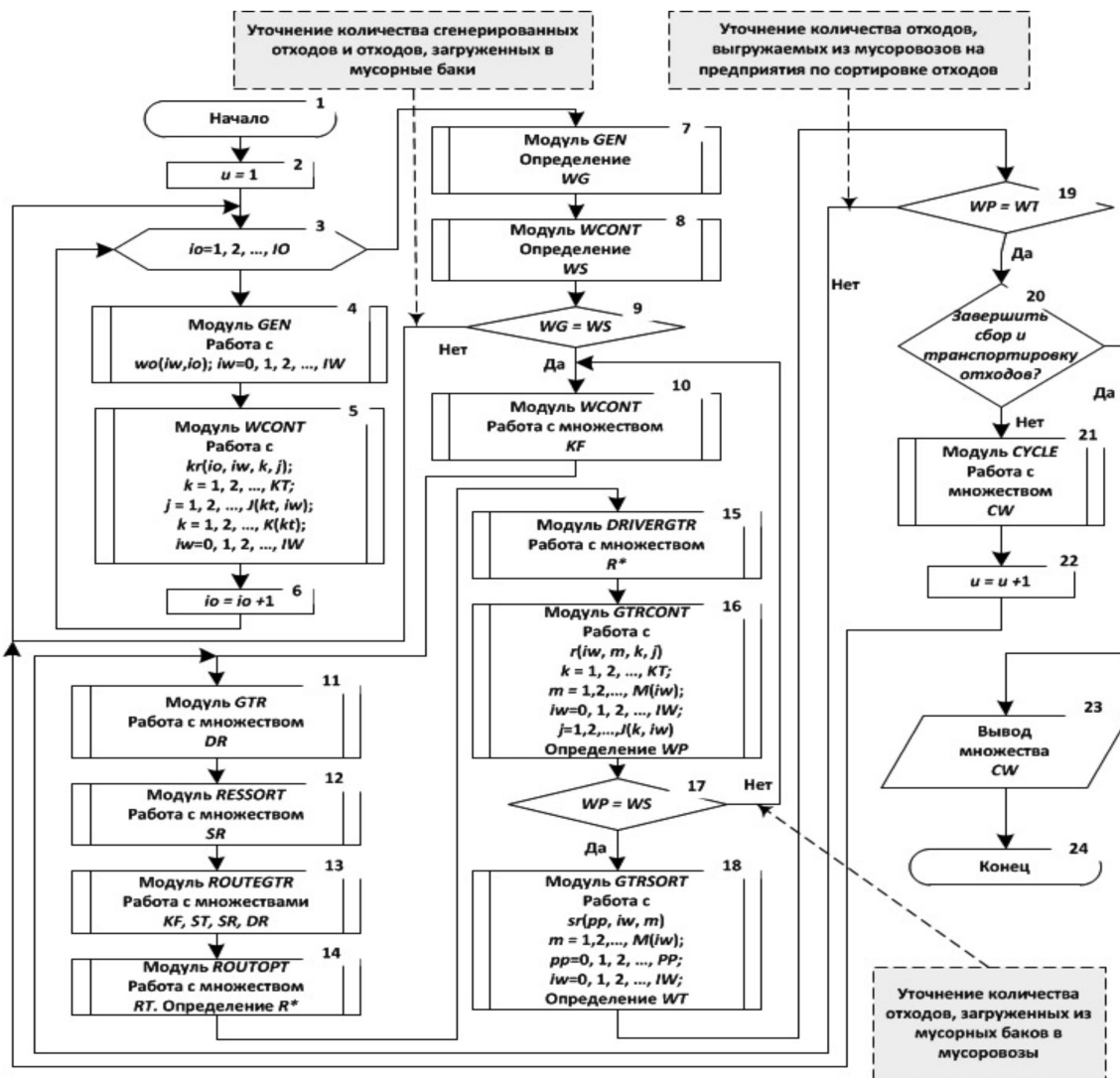


Рис. 2. Порядок взаимодействия программных модулей информационной системы сбора и транспортировки ТКО

на содержание мусорных контейнеров и оплату труда сотрудников, обслуживающих мусорные контейнеры;

на зарплаты сотрудников организаций в сфере ЖКХ, задействованных в организации сбора и транспортировки ТКО (подготовка документов, осуществление доведения информации до водителей и до сотрудников, обслуживающих мусорные контейнеры);

на обслуживание набора программных модулей (в случае его использования).

Экономический эффект (положительное значение $\Delta X_{\text{ТКО}}$) достигается в результате того, что в результате определения оптимальных маршрутов движения мусоровозов R^* и соответствующего MNP достигается экономия расходов на топливо для мусоровозов (значение $\Delta X_{\text{топл}}$) и работу с ними (значение $\Delta X_{\text{РабМус}}$). Кроме этого уменьшаются затраты на зарплаты сотрудников, задействованных в организации сбора и транспортировки ТКО (значение $\Delta X_{\text{сотр}}$). При этом при внедрении набора программных модулей появляются дополнительные затраты на его обслуживание (значение ΔX_{PM}). Также в случае использования «умных» мусорных контейнеров могут возрасти затраты на содержание мусорных контейнеров и оплату труда сотрудников, обслуживающих мусорные контейнеры (значение $\Delta X_{\text{конт}}$). В работе предполагается, что количество мусоровозов и количество мусорных контейнеров при внедрении набора программных модулей не меняется. Таким образом

$$\Delta X_{\text{ТКО}} > 0,$$

если

$$|\Delta X_{\text{топл}} + \Delta X_{\text{сотр}} + \Delta X_{\text{РабМус}}| - \Delta X_{\text{PM}} - \Delta X_{\text{конт}} > 0.$$

Использование рассматриваемого в статье набора программных модулей

может снизить на 15-20% расходы организаций по управлению МКД на сбор и транспортировку ТКО. При этом экономический эффект достижим лишь для тех организаций по управлению МКД, уровень готовности которых к автоматизации [28] соответствует внедрению набора программных модулей. В противном случае внедрение набора программных модулей будет экономически невыгодным.

Заключение

В результате исследований, проведенных в данной работе, получены следующие результаты:

1. Рассмотрены математические модели для прогнозирования вида и количества ТКО.

2. Проведен анализ использования облачных информационных технологий и технологии Интернета вещей в составе информационных систем в управлении ТКО.

3. Проанализированы параметры, характеризующие сбор и транспортировку ТКО.

4. Обоснован состав набора программных модулей, входящих в состав информационной системы для сбора и транспортировки ТКО. Разработан алгоритм взаимодействия программных модулей.

5. Сформулированы условия, при которых внедрение набора программных модулей будет экономически эффективным для организаций по управлению МКД. В случае внедрения набора программных модулей в организациях по управлению МКД, уровень готовности которых к автоматизации не менее требуемого, снижение затрат на сбор и транспортировку ТКО может достигать 15-20%.

Библиографический список

1. Vergara S.E., Tchobanoglous G. Municipal solid waste and the environment: A global perspective. Annual Review of Environment and Resources. 2012. vol. 37. P. 277–309.
2. Kumar Sunil, Dhar Hiya Nair, Vijay V., Bhattacharyya J.K., Vaidya A.N., Akolkar A.B. Characterization of municipal solid waste in high-altitude sub-tropical regions. Environmental Technology. 2016. vol. 37(20). P. 2627–2637.
3. Zhou H., Meng A., Long Y., Li Q., Zhang Y. An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: Physical, chemical composition and heating value. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. vol. 36. P. 107–122.

4. Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures // EPA. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/advancing-sustainable-materials-management-0> (дата обращения: 13.04.2020).
5. Guidelines for national waste management strategies: moving from challenges to opportunities // [Электронный ресурс]. URL: http://cwm.unitar.org/publications/publications/cw/wm/UNEP_UNITAR_NWMS_English.pdf (дата обращения: 13.04.2020).
6. Zero Waste Lifestyle Will Make You Say No To Waste // [Электронный ресурс]. URL: <https://earthbuddies.net/zero-waste-lifestyle/> (дата обращения: 13.04.2020).
7. Azadi S., Karimi Jashni A. Verifying the performance of artificial neural network and multiple linear regression in predicting the mean seasonal municipal solid waste generation rate: A case study of Fars province, Iran. *Waste Management*. vol. 48. P. 14–23.
8. Intharathirat R., Abdul Salam P., Kumar S., Untong A. Forecasting of municipal solid waste quantity in a developing country using multivariate Grey models. 2015. *Waste Management*. vol. 39. P. 3–14.
9. Ghinea C., Drăgoi E.N., Comăniță E.-D., Gavrilescu M., Câmpean T., Curteanu S., Gavrilescu, M. Forecasting municipal solid waste generation using prognostic tools and regression analysis. *Journal of Environmental Management*. 2016. vol. 182. P. 80–93.
10. Guo P., Huang G.H. Inexact fuzzy-stochastic mixed-integer programming approach for long-term planning of waste management – Part A: Methodology. *Journal of Environmental Management*. 2009. vol. 91(2). P. 461–470.
11. Lee C.K.M., Yeung C.L., Xiong Z.R., Chung S.H. A mathematical model for municipal solid waste management – A case study in Hong Kong. *Waste Management*. 2016. vol. 58. P. 430–441.
12. Li P., Chen B. FSILP: Fuzzy-stochastic-interval linear programming for supporting municipal solid waste management. *Journal of Environmental Management*. 2011. vol. 92(4). P. 1198–1209.
13. Srivastava A.K., Nema A.K. Fuzzy parametric programming model for integrated solid waste management under uncertainty. *Journal of Environmental Engineering*. 2011. vol. 137(1). P. 69–83.
14. Ruiz-Chavez Z., Salvador-Meneses J., Díaz-Quilachamín S., Mejía-Astudillo C. Solid Waste Management using Georeferenced Multi-agent Systems // 2018 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (Gudalajara, Mexico, 7-9 Nov. 2018). IEEE. 2018. P. 1–6.
15. Idwan S., Mahmood I., Zubairi, J.A., Matar, I. Optimal Management of Solid Waste in Smart Cities using Internet of Things. *Wireless Personal Communications*. 2020. vol. 110 (1). P. 485–501.
16. Jammeli H., Argoubi M., Masri H. Genetic algorithm for a stochastic programming model of the green household waste transportation problem // 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (Manama, Bahrain, 15-17 April 2019). IEEE. 2019. P. 1–6.
17. Anagnostopoulos T.V., Zaslavsky A. Effective waste collection with shortest path semi-static and dynamic routing. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2014. vol. 8638 LNCS. P. 95–105.
18. Jatinkumar Shah P., Anagnostopoulos T., Zaslavsky A., Behdad S. A stochastic optimization framework for planning of waste collection and value recovery operations in smart and sustainable cities. *Waste Management*. 2018. vol. 78. P. 104–114.
19. Furqan Durrani, A.M., Rehman A.U., Farooq A., Meo J.A., Sadiq M.T. An automated waste control management system (AWCMS) by using Arduino // 2019 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (Lahore, Pakistan, 21-22 February 2019). IEEE. 2019. P. 1–6.
20. Aswin Raaju V., Mappillai Meeran J., Sasidharan M., Premkumar K. IOT based smart garbage monitoring system using ZigBee // 2019 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (Pondicherry, India, 29-30 March 2019) : IEEE. 2019. P. 1–7.
21. Ballaran P.M., Corpuz C.B.A., Paras L.A.R., Fabito B.S., Rivera E.R. Perazuhan: A Mobile Application for Solid Waste Micro-Management Framework // 2019 IEEE Student Conference on Research and Development (Seri Iskandar, Perak; Malaysia; 15-17 October 2019). IEEE. 2019. P. 17–20.
22. Bakhshi T., Ahmed M. IoT-Enabled Smart City Waste Management using Machine Learning Analytics // 2018 2nd International Conference on Energy Conservation and Efficiency (Lahore, Pakistan, 16-17 Oct. 2018). IEEE. 2018. P. 66-71.
23. Giacobbe M., Puliafito C., Scarpa M. The big bucket: An IoT cloud solution for smart waste management in smart cities. *Communications in Computer and Information Science*. 2018. vol. 707. P. 43–58.
24. Lamichhane M. A smart waste management system using IOT and blockchain technology // [Электронный ресурс]. URL: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/143751/PERCCOM_MASTERS_THESIS_ManishLamichhane_20170720_final.pdf?sequence=2 (дата обращения: 13.04.2020).

25. Karthikeyan S., Rani G.S., Sridevi M., Bhuvanewari P.T.V. IoT enabled waste management system using ZigBee network // 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology (Bangalore, India, 19-20 May 2017). IEEE. 2018. P. 2182–2187.

26. Atayero A.A., Williams R., Badejo J.A., Popoola S.I. Cloud based IoT-enabled solid waste monitoring system for smart and connected communities. International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. vol. 10(2). P. 2308–2315.

27. The 4th Industrial Revolution in Practice – WasteIQ, the Open Waste Management Platform // ISWA. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iswa.org/home/news/news-detail/article/guest-blog-the-4th-industrial-revolution-in-practice-wasteiq-the-open-waste-management-platf/109/> (дата обращения: 13.04.2020).

28. Попов А.А. Разработка системы поддержки принятия решений для формирования рациональной структуры единого информационного пространства жилищно-коммунального хозяйства региона. М.: Русайнс, 2017. 170 с.