

УДК 658.7.01
ББК 39.38

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДВУХЭТАПНОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Миронюк В. П.¹, Цыплаков В. Ю.²

*(Ростовский государственный строительный
университет, Ростов-на-Дону)*

Представлена модель формирования системы двухэтапного транспортирования твердых муниципальных отходов, позволяющая получить информацию об оптимальном размещении и количестве мусороперегрузочных станций. Особенностью модели является возможность адаптации формируемой системы двухэтапного транспортирования твердых муниципальных отходов к местным условиям исследуемой территории.

Ключевые слова: твердые муниципальные отходы, технологический процесс перевозки, пункт сбора, пункт ликвидации, мусороперегрузочная станция.

1. Введение

Под твердыми муниципальными отходами (далее ТМО) понимаются остатки веществ, материалов, предметов, изделий, товаров, частично или полностью утративших свои первоначальные потребительские свойства для использования по прямому или косвенному назначению, образующиеся в бытовых условиях в результате жизнедеятельности населения, а также в офисах, торговых предприятиях, мелких промышленных объек-

¹ *Виталий Петрович Миронюк, доктор экономических наук, профессор тел.(863) 227-04-75.*

² *Владимир Юрьевич Цыплаков, аспирант, тел. (863) 227-04-68, (vu.tsyplakov@mail.ru).*

тах, школах, больницах, других муниципальных учреждениях [3].

В настоящее время в условиях высокой концентрации населения на небольших территориях скорость образования ТМО больше скорости их естественной переработки окружающей природной средой. Поэтому рациональное управление муниципальными отходами, их вовлечение в народное хозяйство в качестве вторичных ресурсов крайне необходимо для снижения загрязнения окружающей среды.

Кроме того, сейчас во всем мире проблема управления ТМО является одной из приоритетнейших, занимая второе место по затратам и инвестициям после сектора водоснабжения и канализации в системе муниципального хозяйства [1].

Согласно материалам проекта Европейского Сообщества *INTERREG IIIA (International Regeneration)* самую существенную долю в общей структуре затрат на удаление отходов составляют транспортные затраты и составляют от 20 до 35% от общих расходов на обращение [11].

В мировой практике одним из звеньев процесса повышения эффективности ликвидации ТМО является внедрение технологического процесса перевозки ТМО с двухэтапным транспортированием (далее ДЭТ). Суть этого процесса заключается в использовании мусоросборных машин малой грузоподъемности на первом этапе транспортирования, транспортировочных мусоровозов большой грузоподъемности – на втором этапе и промежуточной перегрузки ТМО на мусороперегрузочных станциях (далее МПС).

Основное предназначение МПС заключается в сокращении транспортных затрат в системе обращения с твердыми муниципальными отходами (далее СОО) за счет уменьшения плеча вывоза подвижным составом малой грузоподъемности на первом этапе транспортирования и обеспечения перевозок ТМО укрупненными партиями подвижным составом большой грузоподъемности на втором этапе транспортирования.

Основной функцией МПС является обеспечение смешанного автомобильного сообщения. МПС, как элемент транспортно-

логистической системы перемещения ТМО, является промежуточным пунктом в логистическом канале продвижения потоков ТМО от пунктов зарождения/сбора (мусоросборные площадки) до пунктов поглощения/ликвидации (мусороперерабатывающие предприятия, пункты приема вторсырья, полигоны захоронения ТБО, свалки) потоков (см. рис. 1). Поэтому вышеуказанные пункты, как элементы транспортно-логистической системы перемещения ТМО, должны быть включены в общую процедуру формирования этой системы исходя из принципов «интеграции отдельных звеньев логистической цепи в единую систему, обеспечения эффективного взаимодействия и согласованности построения и функционирования всех элементов логистической системы» [9]. Методика формирования подсистемы сбора и подсистемы ликвидации ТМО разрабатывается отдельными блоками, но на основе требований к транспортно-логистической системе, исходящих из целей функционирования общей СОО.



Рис. 1. Схема логистического канала при реализации технологического процесса перевозки ТМО с двухэтапным транспортированием

Основными вопросами при формировании системы ДЭТ ТМО являются определение местоположения и количества МПС при условии обеспечения минимальных затрат в СОО.

Анализ существующих методов и математических моделей по оптимизации систем ДЭТ ТМО [4, 5, 6, 7, 10] показал, что каждый из них имеет те или иные недостатки для применения в задаче формирования системы (см. таблицу 1). Принципиально все эти методы и модели можно подразделить на два отличающихся друг от друга подхода:

1. Без ограничения при выборе места – позволяет найти координаты оптимальной точки размещения МПС на исследуемой территории муниципального образования (муниципальный район, городской округ и т.д., далее МО), при этом вводится допущение, что ограничений при выборе места размещения МПС не существует.

2. Из множества пригодных для размещения мест на территории МО определяется множество возможных для размещения мест и из них выбираются наилучшие.

Таблица 1. Основные недостатки существующих методов по оптимизации системы ДЭТ ТМО

Подход	Метод	Недостаток
Без ограничения при выборе места	Модель Шульца [4]	1. Не решен вопрос об определении оптимального количества МПС. 2. При определении местоположения МПС не учитываются местные условия территории МО, влияющие на выбор места. 3. Не учитываются различия в капитальных и эксплуатационных расходах на разных объектах.
	Алгоритм Бейкера. Модели: – Вебера; – Д. Маркса; – Валкера; – Ярового В.Ф. [4] – Северовой Е.С. [6]	1. Не решен вопрос об определении оптимального количества МПС. 2. При определении местоположения МПС не учитываются местные условия территории МО, влияющие на выбор места.
Из множества пригодных для размещения мест	Модель Сергеевой В.Г. [7]	1. Не решен вопрос об определении оптимального количества МПС. 2. Местоположение МПС определяется на основе экспертной оценки территории.
	Модель Академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова [5]	1. Количество МПС определяется только на основе экспертной оценки территории. 2. Местоположение МПС определяется на основе экспертной оценки территории.

Подход	Метод	Недостаток
	Модель [10]	<i>Местоположение МПС</i> определяется на основе экспертной оценки территории.

Из таблицы 1 видно, что недостатками при определении оптимального местоположения МПС всех методов первого подхода является неучет местных условий территории МО. К местным условиям территории МО, которые влияют на выбор местоположения объектов сети, относятся: рельеф земельного участка, расположение жилых зданий и организаций различных отраслей экономики, положение и качество инженерных сетей, категория земель и др.

Все вышеперечисленные местные условия, влияющие на выбор местоположения объектов сети, потенциально учитываются в методах второго подхода. Однако подбор таких мест производится экспертами – лицами принимающими решения (далее ЛПР) без должного использования математических средств. Это приводит порой к тому, что ЛПР, а главным ЛПР относительно таких вопросов в нашей стране является муниципалитет, пригодными местами для расположения МПС объявляются земельные участки, которые выгодно отдать под размещение исходя из интересов самого ЛПР (муниципалитета). Поэтому не всегда такой подход к решению задачи близок к оптимальному результату выбора местоположения МПС.

Кроме этого почти ни одним из методов вышеперечисленных подходов нельзя определить оптимальное количество МПС для обеспечения наиболее благоприятных условий в системе при достижении компромисса между снижением транспортных затрат и уменьшением издержек на строительство и эксплуатацию перегрузочных станций.

Очевидно, что задачу формирования сети МПС необходимо решать совместно с оптимизацией использования земель на территории МО. При решении задачи в такой постановке помимо вопросов оптимального размещения объектов сети важно учитывать возможность их размещения с учетом воздействия на окружающую среду, существующей застройки и категории земель.

Такого рода задачи возникают при разработке схем оптимального размещения МПС в рамках отдельно взятого МО.

Однако тенденция к созданию укрупненных объектов ликвидации ТМО, которые должны обслуживать несколько МО одновременно [2], требует включать порой в рамки исследования территории не только одного МО, а двух, трех и т.д. МО, которые тяготеют к объекту ликвидации ТМО. Таким образом, объектом исследования при формировании системы ДЭТ ТМО должна быть зона функционирования СОО, включающая территории исследуемых МО.

На основе всего вышеуказанного предлагается разработать модель формирования системы ДЭТ ТМО на базе двух вышеперечисленных подходов: «без ограничения при выборе места» и «из множества пригодных для размещения мест». Первый подход должен позволить найти оптимальную точку размещения МПС, а второй – подходящее место для размещения МПС у найденной точки. Таким образом, второй подход будет являться логическим продолжением первого. Такая модель должна позволить решить задачу не только нахождения оптимального местоположения, но и оптимального количества МПС с учетом местных условий территории МО, влияющих на СОО.

2. Определение оптимального местоположения и количества МПС

Модель (см. рис. 2) состоит из трех блоков (поиск оптимальных точек размещения МПС в зоне СОО, корректировка местоположения МПС в зоне СОО, повышение эффективности ДЭТ в зоне СОО).

Первый блок модели реализован на базе подхода «без ограничения при выборе места». Здесь при помощи математических методов производится нахождение множества оптимальных точек размещения МПС в исследуемой зоне СОО. Критерием оптимальности является минимум суммарных затрат на продвижение потоков ТМО от пунктов зарождения к пунктам поглощения в СОО.

Второй блок реализован на базе подхода «из множества пригодных для размещения мест». Здесь, исходя из местных условий исследуемой территории МО (рельеф земельного участка, расположение существующей застройки и др.), путем многоатрибутного оценивания места, лицом принимающим решение производится корректировка местоположения МПС в исследуемой зоне СОО относительно оптимальных точек, которые найдены в предыдущем блоке.



Рис. 2. Блок-схема модели формирования системы двухэтапного транспортирования ТМО

Необходимость реализации **третьего блока** модели связана с возможным увеличением суммарных расходов на транспортировку, а также капитальных и эксплуатационных затрат МПС при корректировке позиций перегрузочных станций относительно оптимальных точек из-за невозможности размещения МПС в этих точках в силу местных условий территории МО. Рост затрат в системе связан, с одной стороны, с возможным изменением величины пробега при сборе и вывозе ТМО, с другой – с местными условиями, влияющим на размеры тарифов перевалки (стоимость земельного участка, затраты на подключение к инженерным сетям, стоимость пользования инженерными коммуникациями и т.п.). Поэтому данный блок необходим для проверки решения, принятого при реализации предыдущих двух блоков, и возможного повышения экономической эффективности системы ДЭТ ТМО. Этот блок реализован на базе совместного использования подходов: «без ограничения при выборе места» и «из множества пригодных для размещения мест».

2.1. ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ТОЧЕК РАЗМЕЩЕНИЯ МПС В ЗОНЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ МУНИЦИПАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ (БЛОК №1)

В данном блоке вводятся первичные исходные данные, характеризующие размеры транспортных затрат, параметры МПС, потоки отходов и касающиеся позиций пунктов сбора и ликвидации ТМО, в том числе в перспективе.

Причем выбор пунктов сбора производится при условии экономической целесообразности вывоза из них по двухэтапной схеме. Если сбор и вывоз ТМО из пункта по такой схеме невыгоден, то его параметры исключаются из набора информации, и вывоз ТМО из него должен выполняться по прямой схеме: пункт сбора – пункт ликвидации. При этом планирование перевозок ТМО осуществляется при помощи решения транспортной задачи линейного программирования с учетом стоимости ликвидации ТМО.

Отбор пунктов сбора, подходящих для включения в двух-этапную схему, производится путем *ВЕР (break-even point)* – анализа нахождения критического расстояния ($L_{кр}$) и сравнения с ним расстояний от пунктов сбора до пунктов ликвидации ТМО. Если расстояние от пункта сбора до пункта ликвидации строго больше чем $L_{кр}$, то параметры пункта сбора включаются в набор данных, если не более чем $L_{кр}$, то параметры пункта не включаются в набор и перевозка осуществляется по прямой схеме.

Расчет $L_{кр}$ осуществляется по формуле (1) [7]:

$$(1) \quad L_{кр} = \frac{T_b - T_a + B_b - B_a}{A_a - A_b};$$

где T_b, T_a – затраты на загрузку мусоровозов большой и малой вместимости соответственно, руб.; A_b, A_a – эксплуатационные затраты, зависящие от расстояния перевозки отходов, которые возникают при работе мусоровозов большой и малой вместимости соответственно, руб./км; B_b, B_a – эксплуатационные затраты, не зависящие от расстояния перевозки отходов, которые возникают при работе мусоровозов большой и малой вместимости соответственно, руб.

Основной целью формирования сети МПС является минимизация суммарных затрат на продвижение потоков ТМО от пунктов зарождения к пунктам поглощения в зоне СОО. Данные суммарные затраты C_m (m – количество МПС) состоят из:

- 1) транспортных затрат на перемещение ТМО от пунктов сбора до МПС $C^{(1)}$;
- 2) транспортных затрат на перемещение ТМО от МПС до пунктов ликвидации $C^{(2)}$;
- 3) затрат на перевалку ТМО через МПС $C^{(3)}$;
- 4) затрат на ликвидацию ТМО $C^{(4)}$.

Целевой функцией формирования сети МПС в общем виде является:

$$(2) \quad C_m = C^{(1)} + C^{(2)} + C^{(3)} + C^{(4)} \rightarrow \min$$

Такая задача сводится к совместному решению двух задач линейного программирования (транспортных задач): находже-

ния оптимального плана перевозки ТМО и одной задачи нелинейного программирования – определения координат МПС по критерию минимума суммарных затрат на продвижение потоков ТМО на выпуклой области определения переменных.

Постановка задачи. В зоне СОО имеется n пунктов сбора ТМО, объем образования ТМО в i -м пункте сбора составляет Q_i м³/мес, $i = 1, \dots, n$. Имеется K пунктов ликвидации ТМО, которые могут принять не более чем W_k^{\max} единиц ТМО, $k = 1, \dots, K$. Ограничение на пропускную способность МПС W_j^{\max} , $j = 1, \dots, m$, отсутствует. Количество пунктов перевалки ТМО (МПС) m задается. Далее везде индекс « i » используется для пунктов сбора ТМО, индекс « j » – для МПС, индекс « k » – для пунктов ликвидации ТМО. Известны:

1) тариф на транспортирование ТМО от пункта сбора к МПС, равный T_a , руб./км;

2) тариф на транспортирование ТМО от МПС к пункту ликвидации, равный T_b , руб./км;

3) средний тариф на перевалку ТМО через МПС, равный P , руб./м³;

4) тариф на утилизацию ТМО в пункте ликвидации, равный U_k , $k = 1, \dots, K$, руб./м³;

5) средние постоянные затраты на МПС, не зависящие от объемов перевалки, равные S , руб.;

6) грузопместимость автомобиля, выполняющего перевозки от пунктов сбора ТМО до МПС, q_a , м³;

7) грузопместимость автомобиля, выполняющего перевозки от МПС до пунктов ликвидации, q_b , м³;

8) коэффициент уплотнения ТМО на МПС γ .

Транспортные затраты на перемещение ТМО от пунктов сбора к МПС $C^{(1)}$ зависят от расстояния транспортировки L_{ij}^a (км) и от объема перевозок Q_{ij}^a (м³/мес.):

$$(3) \quad C^{(1)} \left(\left\{ L_{ij}^a \right\}_{\substack{i=1, \dots, n \\ j=1, \dots, m}}, \left\{ Q_{ij}^a \right\}_{\substack{i=1, \dots, n \\ j=1, \dots, m}} \right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{T_a Q_{ij}^a L_{ij}^a}{q_a};$$

где

$$(4) \quad L_{ij}^a = \sqrt{|X_i^a - X_j|^2 + |Y_i^a - Y_j|^2};$$

X_i^a, Y_i^a, X_j, Y_j – координаты соответствующих пунктов, $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$.

Аналогично транспортные затраты на перемещение ТМО от МПС до пунктов ликвидации $C^{(2)}$ зависят от расстояния транспортировки L_{jk}^b (км) и от объема перевозок Q_{jk}^b (м³/мес.):

$$(5) \quad C^{(2)} \left(\left\{ L_{jk}^b \right\}_{\substack{j=1, \dots, m \\ k=1, \dots, K}}, \left\{ Q_{jk}^b \right\}_{\substack{j=1, \dots, m \\ k=1, \dots, K}} \right) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K \frac{T_b Q_{jk}^b L_{jk}^b}{q_b};$$

где

$$(6) \quad L_{jk}^b = \sqrt{|X_j - X_k^b|^2 + |Y_j - Y_k^b|^2};$$

X_j, Y_j, X_k^b, Y_k^b – координаты соответствующих пунктов, $j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, K$.

Затраты на перевалку ТМО через МПС $C^{(3)}$ зависят от объема перевозок Q_{ij}^a (м³/мес.) и постоянных затрат S :

$$(7) \quad C^{(3)} \left(\left\{ Q_{ij}^a \right\}_{\substack{j=1, \dots, m \\ i=1, \dots, n}} \right) = P \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{ij}^a + m \cdot S.$$

Затраты на ликвидацию ТМО $C^{(4)}$ зависят от объема перевозок Q_{jk}^b (м³/мес.):

$$(8) \quad C^{(4)} \left(\left\{ Q_{jk}^b \right\}_{\substack{j=1, \dots, m \\ k=1, \dots, K}} \right) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K U_k Q_{jk}^b.$$

Ограничения:

– неотрицательность объемов перевозок ТМО от пунктов сбора к МПС:

$$(9) \quad Q_{ij}^a \geq 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m;$$

– неотрицательность объемов перевозок ТМО от МПС к пункту ликвидации:

$$(10) \quad Q_{jk}^b \geq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad k = 1, \dots, K;$$

– полное удовлетворение потребности в сборе и вывозе ТМО из пунктов сбора:

$$(11) \quad \sum_{j=1}^m Q_{ij}^a = Q_i, \quad i = 1, \dots, n;$$

– суммарное количество ТМО, перемещаемое в пункт ликвидации, не должно превышать его максимальной мощности:

$$(12) \sum_{j=1}^m Q_{jk}^b \leq W_k^{\max}, \quad k = 1, \dots, K;$$

– необходимость соответствия между суммарным количеством ТМО, завезенных в пункты ликвидации, и суммарным количеством отходов, вывезенных из пунктов сбора, через достигаемое на каждой МПС уплотнение:

$$(13) \sum_{k=1}^K Q_{jk}^b = \gamma \cdot \sum_{i=1}^n Q_{ij}^a, \quad j = 1, \dots, m.$$

Требуется определить такие планы перевозки ТМО от пунктов сбора ТМО к МПС $\left\{ Q_{ij}^{a*} \right\}_{\substack{i=1, \dots, n \\ j=1, \dots, m}}$ и от МПС к пунктам ликвидации ТМО $\left\{ Q_{jk}^{b*} \right\}_{\substack{j=1, \dots, m \\ k=1, \dots, K}}$, а также координаты МПС $\left\{ X_j^*, Y_j^* \right\}_{j=1, \dots, m}$, которые бы полностью удовлетворяли потребности в перевозке ТМО, а суммарные расходы на продвижение потоков ТМО от пунктов сбора к пунктам ликвидации в зоне СОО были минимальными.

Целевая функция задачи (2) записывается в виде:

$$(14) \quad C_m \left(\left\{ X_j, Y_j \right\}_{j=1, \dots, m}, \left\{ Q_{ij}^a \right\}_{\substack{i=1, \dots, n \\ j=1, \dots, m}}, \left\{ Q_{jk}^b \right\}_{\substack{j=1, \dots, m \\ k=1, \dots, K}} \right) = \\ = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{T_a \sqrt{|X_i^a - X_j|^2 + |Y_i^a - Y_j|^2}}{q_a} + P \right) Q_{ij}^a + \\ + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K \left(\frac{T_b \sqrt{|X_j - X_k^b|^2 + |Y_j - Y_k^b|^2}}{q_b} + U_k \right) Q_{jk}^b + m \cdot S \rightarrow \min_{\{X_j, Y_j\}}.$$

Отметим, что задача (9)–(14) может быть решена численно для каждого значения m .

Задача поиска множества оптимальных точек размещения МПС решается при совместном определении оптимального количества и оптимального местоположения точек. Критерием

оптимальности такой задачи является достижение компромисса между снижением транспортных затрат и уменьшением издержек на строительство и эксплуатацию перегрузочных станций.

При увеличении количества перегрузочных станций в зоне СОО сокращаются транспортные затраты, т.е. функция транспортных затрат является монотонно убывающей, однако растут затраты на строительство и эксплуатацию МПС, т.е. функция затрат на МПС является монотонно возрастающей. При уменьшении количества МПС, наоборот транспортные затраты растут, а затраты на перегрузку МПС сокращаются. Поэтому поиск оптимальных точек размещения МПС в зоне СОО предлагается производить методом простого перебора поиска точки экстремума целевой функции (14) с ограничениями (9)–(13) при пошаговом увеличении количества МПС $m = 0, 1, 2, \dots$, до тех пор, пока целевая функция не начнет возрастать после точки минимума. Количество МПС (m), при котором целевая функция C_m достигнет минимума (C_m^*), будет оптимальным (m^*).

Описание алгоритма решения задачи графическим способом представлено схемой алгоритма на рис. 3.

Замечание: при $m = 0$ математическая модель (9)–(14) преобразуется в классическую транспортную задачу (15)–(16):

$$(15) \quad C_0 \left(\left\{ Q_{ik} \right\}_{\substack{i=1, \dots, n \\ k=1, \dots, K}} \right) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K \left(\frac{T \cdot L_{ik}}{q} + U_k \right) Q_{ik} \rightarrow \min;$$

ограничения:

$$(16) \quad \begin{cases} Q_{ik} \geq 0, & i=1, \dots, n, \quad k=1, \dots, K; \\ \sum_{i=1}^n Q_{ik} \leq W_k^{\max}, & k=1, \dots, K; \\ \sum_{k=1}^K Q_{ik} = Q_i, & i=1, \dots, n \end{cases}$$

где T – тариф на транспортирование ТМО, руб./км; q – грузопместимость автомобиля, м³.

В результате реализации алгоритма (рис. 3) определяются:

- координаты МПС $\{X_j^*, Y_j^*\}_{j=1, \overline{m}}$;
- количество МПС m^* ;
- планы перевозки ТМО $\{Q_{ij}^{a*}\}_{j=1, \overline{m}}, \{Q_{jk}^{b*}\}_{j=1, \overline{m}, k=1, \overline{K}}$ ($M^3/\text{мес.}$);
- значение затрат C_m^* в системе ДЭТ ТМО (руб./мес.);
- величины пропускных способностей МПС $\{W_j\}_{j=1, \overline{m}}$ ($M^3/\text{мес.}$), которые равняются суммарному объему перевозок в j -ю МПС:

$$(17) W_j = \sum_{i=1}^n Q_{ij}, j = 1, \dots, m.$$

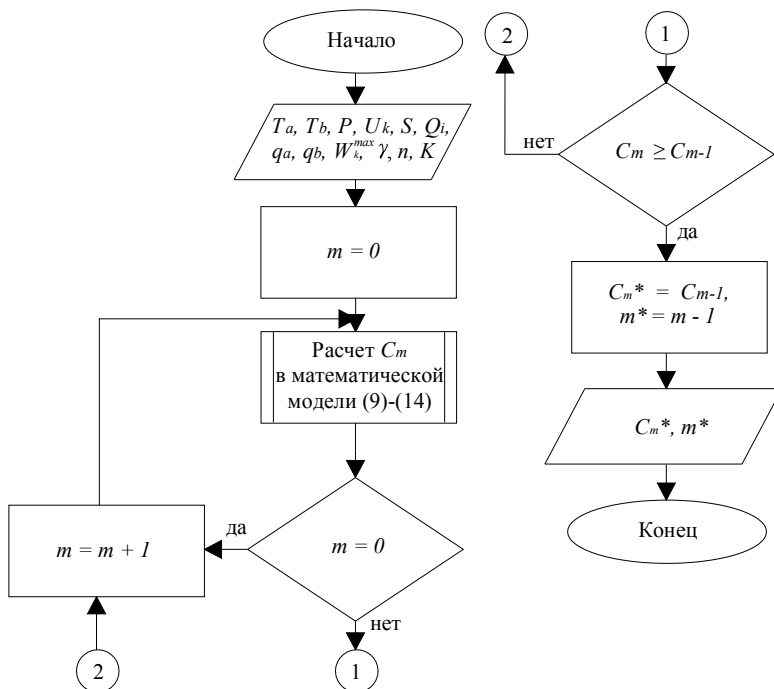


Рис. 3. Блок-схема поиска оптимальных точек размещения МПС в зоне СОО

2.2. КОРРЕКТИРОВКА МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МПС В ЗОНЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ МУНИЦИПАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ (БЛОК №2)

Решение задачи на этом уровне связано с представлениями о том, что при формировании сети МПС в зоне СОО фактическое местоположение объекта не всегда совпадает с оптимальной точкой его размещения. Это связано с местными условиями территорий тех МО, где производится формирование сети.

Действительно, при размещении объектов строительства на местности должны учитываться градостроительные требования к использованию земельных участков, а также ряд стоимостных и других факторов, которые оказывают влияние на принятие окончательного решения. Иногда, а порой и в большинстве случаев, оптимальное с точки зрения транспортных (или других) показателей место для размещения объекта не может использоваться. Так как попадает, например, на сложный рельеф, в жилую застройку, в зону с особыми условиями использования территорий или на особо охраняемую природную территорию, т.е. на территорию где нельзя, либо нежелательно возводить МПС.

Таким образом, на выбор оптимального местоположения МПС влияют не только стоимостные показатели, но и показатели, которые порой трудно выразить в количественном виде.

Анализ территории МО удобно проводить, в том числе с использованием компьютерно-информационных средств для исследования пространственных данных – географических информационных систем (ГИС), которые используются для хранения, запроса и визуализации данных, относящихся к территории МО. В качестве такой ГИС при анализе территории МО предлагается СУБД *FreeReeson*, особенностью которой является наличие трехмерной топологической структуры с предварительной пространственной подсортировкой графических данных и чертежно-графовой схемы базы данных, которая позволяет отобразить объекты, их характеристики и связи между ними [8].

Процедура выбора окончательного местоположения МПС носит многокритериальный характер. Корректировка местоположения МПС производится при помощи аналитического иерархического метода (*Analytic Hierarchy Process*), который относится к методам решения задач многокритериальной оптимизации и позволяет определять наилучший вариант исходя из многоцелевой оценки как количественных, так и качественных критериев выбора места.

2.3. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХЭТАПНОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ В ЗОНЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ МУНИЦИПАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ (БЛОК №3)

Повышение экономической эффективности системы ДЭТ ТМО предлагается осуществлять путем пошагового добавления или вычитания перегрузочных станций до нахождения варианта с минимальным значением целевой функции. Добавление МПС осуществляется методом простого перебора поиска экстремума целевой функции, вычитание – методом полного перебора всех возможных сочетаний при поиске экстремума целевой функции.

В связи со сложностью задачи алгоритм повышения эффективности системы ДЭТ ТМО предлагается описать словесно-формульным способом.

Описание алгоритма:

А) Добавление МПС

При добавлении МПС систему с одной новой МПС будем называть «после добавления МПС», а систему, сформированную на предыдущем шаге – «до добавления МПС».

1. Выполняется расчет затрат в системе «до добавления МПС».

Замечание: так как система «до добавления МПС» является предварительно сформированной путем реализации блоков №№ 1, 2, то известны координатные привязки МПС к местности $\{X_j, Y_j\}_{j=1, \overline{m}}$. Поэтому расстояния между МПС и пунктами

сбора/ликвидации ТМО $\{L_{ij}^a\}_{\substack{i=1, \overline{n} \\ j=1, \overline{m}}}$, $\{L_{jk}^b\}_{\substack{j=1, \overline{m} \\ k=1, \overline{K}}}$ считаем тоже известными, определяемыми по дорожной сети. При расчете за-

трат в системе «до добавления МПС» модель (9)–(14) преобразуется в двухуровневую транспортную задачу (18)–(19), которую можно решить методами решения задач линейного программирования (например, методом потенциалов).

$$(18) \quad C'_m \left(\left\{ Q_{ij}^a \right\}_{\substack{j=1, \dots, n \\ i=1, \dots, m}}, \left\{ Q_{jk}^b \right\}_{\substack{j=1, \dots, m \\ k=1, \dots, K}} \right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{T_a L_{ij}^a}{q_a} + P_j \right) Q_{ij}^a + \\ + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K \left(\frac{T_b L_{jk}^b}{q_b} + U_k \right) Q_{jk}^b + m \cdot S \rightarrow \min$$

ограничения:

$$(19) \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_{ij}^a \geq 0, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m; \\ Q_{jk}^b \geq 0, j = 1, \dots, m, k = 1, \dots, K; \\ \sum_{j=1}^m Q_{ij}^a = Q_i, i = 1, \dots, n; \\ \sum_{j=1}^m Q_{jk}^b \leq W_k^{\max}, k = 1, \dots, K; \\ \sum_{k=1}^K Q_{jk}^b = \gamma_j \cdot \sum_{i=1}^n Q_{ij}^a, j = 1, \dots, m; \\ \sum_{i=1}^n Q_{ij} \leq W_j^{\max}. \end{array} \right.$$

2. Добавляется одна МПС. Эта МПС будет иметь номер d . Параметры объемов перевозок ТМО между соответствующими пунктами – Q_{id}^a, Q_{dk}^b (м³/мес.). Аналогично:

$$(20) \quad L_{id}^a = \sqrt{|X_i^a - X_d|^2 + |Y_i^a - Y_d|^2};$$

$$(21) \quad L_{dk}^b = \sqrt{|X_d - X_k^b|^2 + |Y_d - Y_k^b|^2};$$

где X_d, Y_d – координаты МПС;

Необходимо определить координаты d -й МПС при условии минимума суммарных затрат на продвижение потоков ТМО.

Целевая функция такой задачи записывается в виде:

$$\begin{aligned}
 C_{m+1} \left(X_d, Y_d, \{Q_{ij}^a\}_{i=1, \dots, n, j=1, \dots, m}, \{Q_{jk}^b\}_{j=1, \dots, m, k=1, \dots, K} \right) = \\
 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{T_a L_{ij}^a}{q_a} + P \right) Q_{ij}^a + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K \left(\frac{T_b L_{jk}^b}{q_b} + U_k \right) Q_{jk}^b + \\
 (22) \quad + \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_a \sqrt{|X_i^a - X_d|^2 + |Y_i^a - Y_d|^2}}{q_a} + P \right) Q_{id}^a + \\
 + \sum_{k=1}^K \left(\frac{T_b \sqrt{|X_d - X_k^b|^2 + |Y_d - Y_k^b|^2}}{q_b} + U_k \right) Q_{dk}^b + (m+1)S \rightarrow \min_{X_d, Y_d}
 \end{aligned}$$

при ограничениях

$$(23) \quad \left\{ \begin{array}{l}
 Q_{ij} \geq 0, \quad i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m; \\
 Q_{jk} \geq 0, \quad j=1, \dots, m, \quad k=1, \dots, K; \\
 Q_{id} \geq 0, \quad i=1, \dots, n; \\
 Q_{dk} \geq 0, \quad k=1, \dots, K; \\
 \sum_{j=1}^m Q_{ij} + Q_{id} = Q_i, \quad i=1, \dots, n; \\
 \sum_{j=1}^m Q_{jk} + Q_{dk} = W_k, \quad k=1, \dots, K; \\
 \sum_{i=1}^n Q_{ij} = W_j, \quad j=1, \dots, m; \\
 W_k \leq W_k^{\max}, \quad k=1, \dots, K; \\
 W_j \leq W_j^{\max}, \quad j=1, \dots, m; \\
 \sum_{k=1}^K Q_{jk} = \gamma_j \sum_{i=1}^n Q_{ij}, \quad j=1, \dots, m; \\
 \sum_{k=1}^K Q_{jd} = \gamma \sum_{i=1}^n Q_{id}
 \end{array} \right.$$

Задача (22)–(23) может быть решена численно для каждого значения m .

3. Сравняются затраты в системах «до добавления МПС» (C'_m) и «после добавления МПС» (C_{m+1}). Если C'_m не больше чем C_{m+1} , то осуществляется переход к вычитанию МПС из системы (шаги 8–12).

4. Иначе производится корректировка местоположения d -й МПС по методике блока № 2.

5. В (18), (19) вычисляются затраты C'_{m+1} в системе «после добавления МПС».

6. Сравняются затраты в системах «до добавления МПС» (C'_m) и «после добавления МПС» (C'_{m+1}). Если затраты C'_m больше затрат C'_{m+1} , то значению затрат C'_m присваивается значение затрат C'_{m+1} . В систему вновь добавляется одна станция и процедура проходит новый цикл (1)–(6).

7. Иначе вариант системы «до добавления МПС» объявляется оптимальным, $C^* = C'_m$, $m^* = m$

Примечание: если принято решение о добавлении станции, то пропускная способность станций в уже сформированной системе (после реализации второго блока) должна быть уменьшена на величину разности пропускных способностей «до добавления МПС» и «после добавления МПС» ΔW_j^d :

$$(24) \Delta W_j^d = W_j - W_j^{(1)},$$

где W_j – пропускная способность j -й МПС «до добавления МПС», $j = 1, \dots, m$; $W_j^{(1)}$ – пропускная способность j -й МПС «после добавления МПС», $j = 1, \dots, m$.

Вычитание МПС.

При вычитании МПС систему без одной МПС будем называть «после вычитания МПС», а систему на предыдущем шаге – «до вычитания МПС».

8. Из системы вычитается одна МПС и вычисляются затраты C_m^e (e – номер МПС, которая вычитается из системы, $e = 1, \dots, m$) всех возможных сочетаний МПС в наборе из $m - 1$, выбранного из m МПС.

Целевая функция задачи записывается в виде:

$$(25) \quad C_m^e \left(\left\{ Q_{ij}^a \right\}_{\substack{i=1,n \\ j=1,m \\ j \neq e}}, \left\{ Q_{jk}^b \right\}_{\substack{j=1,m \\ k=1,K \\ j \neq e}} \right) = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq e}}^m \left(\frac{T_a L_{ij}^a}{q_a} + P_j \right) Q_{ij}^a + \\ + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq e}}^{m-1} \sum_{k=1}^K \left(\frac{T_b L_{jk}^b}{q_b} + U_k \right) Q_{jk}^b + m \cdot S \rightarrow \min$$

при ограничениях

$$(26) \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_{ij} \geq 0, \quad i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, m, \quad j \neq e; \\ Q_{jk} \geq 0, \quad j=1, \dots, m, \quad j \neq e, \quad k=1, \dots, K; \\ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq e}}^m Q_{ij} = Q_i, \quad i=1, \dots, n; \\ \sum_{i=1}^n Q_{ij} = W_j; \quad j=1, \dots, m, \quad j \neq e; \\ W_j \leq W_j^{\max}, \quad j=1, \dots, m, \quad j \neq e; \\ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq e}}^m Q_{jk} \leq W_k^{\max}, \quad k=1, \dots, K; \\ \sum_{k=1}^K Q_{jk} = \sum_{i=1}^n \gamma_j \cdot Q_{ij}, \quad j=1, \dots, m, \quad j \neq e \end{array} \right.$$

Примечания:

а) задача (25), (26) может быть решена численно для каждого значения m ;

б) значения расстояний $\left\{ L_{ij}^a \right\}_{\substack{i=1,n \\ j=1,m \\ j \neq e}}, \left\{ L_{jk}^b \right\}_{\substack{j=1,m \\ k=1,K \\ j \neq e}}$ определяются по

фактической дорожной сети;

в) из всех значений модели (25), (26), рассчитанной по всем возможным сочетаниям «после вычитания МПС», выбирается самое минимальное. Это значение будет опорным для последующих шагов вычисления алгоритма

9. Сравниваются затраты в системах «до вычитания МПС» (C'_m) и «после вычитания МПС» (C_m^e). Если C'_m не больше C_m^e , то система «до вычитания МПС» объявляется оптимальной. $C^* = C'_m$, $m^* = m$.

10. Иначе вычисляются разности пропускных способностей каждой перегрузочной станции сети ΔW_j^0 , $j = 1, \dots, m$, $j \neq e$. От пропускной способности j -й станции «после вычитания МПС» вычитается пропускная способность j -й станции «до вычитания МПС»:

$$(27) \Delta W_j^0 = W_j^{(2)} - W_j;$$

где $W_j^{(2)}$ – пропускная способность j -й МПС «после вычитания МПС», $j = 1, \dots, m$, $j \neq e$; W_j – пропускная способность j -й МПС «до вычитания МПС», $j = 1, \dots, m$.

11. Если есть возможность увеличить производительность каждой перегрузочной станции на величину ΔW_j^0 соответственно, то значению затрат в системе «до вычитания МПС» (C'_m) присваивается значение затрат «после вычитания МПС» (C_m^e), из сети отнимается одна МПС и процедура проходит новый цикл (8)–(11).

12. Иначе сеть «до вычитания МПС» объявляется оптимальной. $C^* = C'_m$, $m^* = m$.

3. Заключение

Система двухэтапного транспортирования является одним из звеньев процесса повышения эффективности ликвидации твердых муниципальных отходов, управление которыми остается злободневной проблемой муниципальных хозяйств. Элементами данной системы являются: пункты сбора, пункты ликвидации, специализированные транспортные средства и потоки отходов, а самыми основными элементами, без которых невозможного организовать двухэтапный процесс транспортирования отходов – пункты перегрузки твердых муниципальных отходов с одного подвижного состава на другой (МПС).

Проведено исследование процедур формирования систем двухэтапного транспортирования. Основная проблема здесь

заключается в отсутствии математических моделей и методов, способных адаптировать построение сети мусороперегрузочных станций к местным условиям рассматриваемой территории муниципальных образований.

Разработана модель формирования систем двухэтапного транспортирования твердых муниципальных отходов, ее особенностями являются:

1. Определение как оптимального местоположения, так и оптимального количества МПС.

2. Адаптация формируемой системы двухэтапного транспортирования ТМО к местным условиям территории за счет корректировки местоположения МПС при помощи аналитического иерархического метода (*Analytic Hierarchy Process*), который относится к методам решения задач многокритериальной оптимизации и позволяет определять наилучший вариант исходя из многоцелевой оценки как количественных, так и качественных критериев выбора места.

3. Повышение эффективности сформированной системы, необходимость в котором связано с возможным увеличением суммарных расходов при смещении позиций перегрузочных станций относительно оптимальных точек в силу местных условий территории муниципального образования.

Разработанная модель применялась при формировании системы двухэтапного транспортирования твердых муниципальных отходов городского округа Горячий Ключ Краснодарского края в 2012 г. Модель реализовывалась в программной среде и ГИС. В результате реализации модели были оптимизированы потоки ТМО из 156 пунктов сбора в 2 пункта ликвидации, определены места и принято решение строительства 3 мусороперегрузочных станций. Данные мероприятия позволят сэкономить около 25% денежных средств на продвижение потоков ТМО в городском округе Горячий Ключ.

Литература

1. АНИСИМОВ А.В. *Прикладная экология и экономика природопользования*. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. – 317 с.
2. ГАГАРИНА М.В., ШАТРОВ Д.Н. *Оптимизация технологической схемы обращения с отходами потребления. На примере Пермского края // Экология и промышленность России*. – 2008. – авг. – С. 46–50.
3. ГОСТ 30772-2001 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения».
4. ЖУРКОВИЧ В.В., ПОТАПОВ А.И. *Отходы: Научное и учебно-методическое справочное пособие*. – СПб.: Гуманистика, 2001. – 356 с.
5. *Рекомендации по выбору методов и организации удаления бытовых отходов*. – М.: ОНТИ АКХ им. К.Д. Памфилова, 1985. – 18 с.
6. СЕВЕРОВА Е.С. *Разработка методики планирования перевозок твердых коммунальных отходов автомобильным транспортом*: Дис. канд. техн. наук. – СПб, 2006. – 129 с.
7. СЕРГЕЕВА В.Г. *Формирование комплексной организационно – экономической системы управления санитарной очисткой в регионе*: Автореф. дис. докт. экон. наук. – СПб, 2005. – 35 с.
8. *Система управления базами данных. Руководство пользователя. Руководство программиста. Руководство администратора*. – Free Reason Group, 2004. – 235 с.
9. *Транспортная логистика* / Под общей редакцией Л.Б. Миротина. – М.: Издательство «Экзамен», 2002. – 512 с.
10. ТРОФИМЕНКО Ю.В., ПРОСОВ С.Н., КОМКОВ В.И. *Типовая модель управления процессом транспортирования ТБО в муниципальных образованиях // Экология и промышленность России*. – 2008. – окт. – С. 57–61.
11. *Управление твердыми бытовыми отходами*. Проект Европейского Сообщества INTERREG IIIA «Кооперация в совместном создании системы управления отходами в Псковской области», 2008.

DESIGN OF TWO-STAGE SYSTEM FOR SOLID MUNICIPAL WASTE TRANSPORTATION

Vitaly Mironyuk, Rostov State Civil of Engineering University, Rostov-on-Don, Ph. D. (Econ.), professor, phone (863) 227-04-75.

Vladimir Tsyplakov, Rostov State Civil of Engineering University, Rostov-on-Don, post-graduate student (vu.tsyplakov@mail.ru).

Abstract: We solve the problem of design of a two-stage system for solid municipal waste transportation to derive the optimum number and location of waste transfer stations. The specific feature of the model is that the constructed system is adapted to local conditions of the considered territory.

Keywords: solid municipal waste, transportation technology, collecting point, elimination point, waste transfer station.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии А. С. Манделем