

Поиск оптимального местоположения станций перегрузки твердых коммунальных отходов математическими методами

В. П. Миронюк, Т. Н. Роговенко, В. Ю. Цыплаков
РГСУ, г. Ростов-на-Дону

В мировой практике одним из звеньев процесса повышения эффективности ликвидации твердых муниципальных отходов (далее) 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, транспортно-мусоровозов большой грузоподъемности – на втором этапе и промежуточной перегрузки ТМО на мусороперегрузочных станциях (далее МПС).

В условиях крупных городов или больших зон функционирования системы обращения с отходами (далее СОО) поиск экономически выгодного места для создания мусороперегрузочной станции относится порой к весьма непростым задачам. Рассмотрим методику решения задачи, основанную на использовании математических и экономико-математических методов.

Вначале вводим 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 двухэтапную схему, производится путем *БЕР* (*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) [1]:

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

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 [2]. 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:

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

Такая задача сводится к совместному решению двух задач линейного программирования (транспортных задач): нахождения 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) грузоподъемность автомобиля, выполняющего перевозки от пунктов сбора ТМО до МПС, q_a , м³;
- 7) грузоподъемность 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.):

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

где

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

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.):

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

где

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

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 :

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

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

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

Ограничения:

– неотрицательность объемов перевозок ТМО от пунктов сбора к МПС:

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

– неотрицательность объемов перевозок ТМО от МПС к пункту ликвидации:

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

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

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

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

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

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

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

Требуется определить такие планы перевозки ТМО от пунктов сбора ТМО к МПС $\{Q_{ij}^a\}_{\substack{i=1, \dots, n \\ j=1, \dots, m}}$ и от МПС к пунктам ликвидации ТМО $\{Q_{jk}^b\}_{\substack{j=1, \dots, m \\ k=1, \dots, K}}$, а также координаты МПС $\{X_j^*, Y_j^*\}_{j=1, \dots, m}$, 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:

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

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 [3]. Критерием оптимальности такой задачи является достижение компромисса между снижением транспортных затрат и уменьшением издержек на строительство и эксплуатацию перегрузочных станций [4].

При увеличении количества перегрузочных станций в зоне СОО сокращаются транспортные затраты [5], 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):

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

ограничения:

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

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

В результате реализации алгоритма (рис. 3) определяются:

- координаты МПС $\{X_j^*, Y_j^*\}_{j=1,m}$;
- количество МПС m^* ;
- планы перевозки ТМО $\{Q_{ij}^{a*}\}_{\substack{i=1,n \\ j=1,m}}, \{Q_{jk}^{b*}\}_{\substack{j=1,m \\ k=1,K}}$ (м³/мес.);
- значение затрат C_m^* в системе ДЭТ ТМО (руб./мес.);
- величины пропускных способностей МПС $\{W_j\}_{j=1,m}$ (м³/мес.), которые равняются

суммарному объему перевозок в j -ю МПС:

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

Разработанная методика оптимизации размещения МПС позволяет определять как оптимальные местоположения, так и оптимальное количество, что несомненно позволит снизить как эксплуатационные так и капитальные затраты на организацию и функционирования системы обращения с отходами.

Литература

1. Сергеева В. Г. Формирование комплексной организационно – экономической системы управления санитарной очисткой в регионе: Автореф. дис. докт. экон. наук. – С.-Петербург: 2005. – 35 с.
2. Кочерга В. Г., Поздняков М. Н. Современные подходы к разработке комплексных схем организации дорожного движения // Транспорт Российской Федерации//СПб. - №1, 2011. – с. 28-33.
3. Гайдаев В. С., Семчугова Е.Ю. Логистическая оценка доступности объектов для маломобильных групп населения / Вестник Тихоокеанского государственного университета. – № 1 (24). – 2012. – С 83-90.
4. Семчугова Е. Ю., Солонская И.Г., Гайдаев В.С Логистическое обеспечение транспортной подвижности пассажиров с ограниченными возможностями здоровья // Известия Ростовского государственного строительного университета. – №14. – Ростов н/Д: Рост. гос. стоит. ун-т, 2010. – С 75-83.
5. Кочерга В. Г., Семчугова Е. Ю., Гайдаев В. С. Логистическая система управления транспортным обеспечением маломобильных групп населения / Безопасность движения в олимпийском Сочи: Материалы Российско-Германской научно-практической конференции в рамках программы «Российско-Германский Год Науки» // Сочинский филиал МАДИ. – Сочи, 2011. – С 54-56.