



УДК 658.5, 658.5.011, 658.5.012.1, 656.136,51-74 DOI: 10.31799/2077-5687-2023-4-115-124

ПОСТРОЕНИЕ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ НА МАКРОУРОВНЕ

В. В. Рубинов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Ввиду необходимости развития и повышения эффективности существующей в России системы обработки отходов, важной задачей является разработка моделей принятия эффективных решений для населенных пунктов учитывая их специфику. В сложившейся ситуации с отходами остро необходим универсальный алгоритм применимый для разных населенных пунктов, который позволит лицам, принимающим решения на предприятии или в руководстве региона оценивать состояние системы, планировать организацию транспорта и сокращать издержки, при этом соблюдая требования, предъявляемые законами и стандартами. Для достижения поставленной цели были всесторонне проанализированы процессы, связанные с твердыми коммунальными отходами и различные аспекты данных процессов. В результате исследования была составлена общая математическая модель и целевая функция процесса, учитывающая основные функции и зависимости параметров процесса на уровне транспорта и конечных узловых точек процесса. Наиболее важными параметрами, оказывающими непосредственное влияние на структуру и качество системы вывоза, является расчет потребного количества перерабатывающих мощностей и транспорта, при соблюдении экологических ограничений, с возможностью сравнения и оценки дефицита мощностей. Оценены возможности применения предлагаемой математической модели.

Ключевые слова: система, твердые коммунальные отходы, система обращения отходов, эффективность, математическая модель, связь, отходы, ТБО, ТКО, твердые коммунальные отходы, твердые бытовые отходы, система работы с отходами, технологический процесс, транспортная система, алгоритм, целевая функция, модель, оптимизация, математическое моделирование.

Для цитирования:

Рубинов, В. В. Построение целевой функции системы организации работы с твердыми коммунальными отходами на макроуровне / В. В. Рубинов // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 4(38). – с. 115 – 124. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-4-115-124.

BUILDING THE TARGET FUNCTION OF THE SYSTEM FOR ORGANIZING WORK WITH SOLID MUNICIPAL WASTE AT THE MACRO LEVEL

V. V. Rubinov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

In view of the need to develop and improve the efficiency of the existing waste treatment system in Russia, an important task is to develop models for making effective decisions for populated areas, taking into account their specifics. In the current situation with waste, there is an urgent need for a universal algorithm applicable to different settlements, which will allow decision makers at an enterprise or in regional management to assess the state of the system, plan the organization of transport and reduce costs, while complying with the requirements of laws and standards. To achieve this goal, the processes associated with municipal solid waste and various aspects of these processes were comprehensively analyzed. As a result of the study, a general mathematical model and objective function of the process was compiled, taking into account the main functions and dependencies of the process parameters at the level of transport and the final nodes of the process. The most important parameters that have a direct impact on the structure and quality of the export system are the calculation of the required amount of processing capacity and transport, subject to environmental restrictions, with the possibility of comparison and assessment of capacity shortages. The possibilities of application and use of the proposed mathematical model are assessed.

Keywords: system, municipal solid waste, waste management system, efficiency, mathematical model, communication, waste, solid waste, solid waste, municipal solid waste, solid rubble waste, waste management system, technological process, transport system, algorithm, objective function, model, optimization, math modeling.

For citation:

Rubinov, V. V. Building the target function of the system for organizing work with solid municipal waste at the macro level / V. V. Rubinov // System analysis and logistics. – 2023. – № 4(38). – p. 115 – 124. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-4-115-124.



Введение

Необходимость организации эффективной системы работы с отходами в современном мире не вызывает сомнений [1]. Сфера работы с отходами в сильнее всего зависит от системы транспорта, то есть, наиболее чувствительна к организации эффективной транспортной работы [6]. Организация движения потоков отходов от мест накопления через места перегрузки к местам захоронения регламентируется территориальной схемой обращения с отходами [2,3]. Схема также отражает на период ее действия финансово-экономические показатели деятельности по обращению с отходами, в том числе инвестиционные и организационные аспекты взаимодействия участников рынка обращения с отходами, и может предусматривать зонирование территории субъекта Российской Федерации с целью оптимизации деятельности по обращению с отходами. Схема определяет требования к деятельности регионального оператора и утверждается уполномоченным органом государственной власти. [1]

В данном исследовании было реализовано построение математической модели системы обращения отходов на уровне транспортного предприятия. Границами исследования является процесс утилизации твердых бытовых и коммунальных отходов (ТБО и ТКО далее). Кроме массовости последних, именно этот вид отходов, согласно мировому опыту, определяет систему обращения с отходами как эффективную или неэффективную. Бытовые и коммунальные отходы причиняют серьезный вред окружающей среде, но вместе с тем, методы полезной переработки изучены довольно серьезно, в то же время ТКО требуют серьезной организации системы вывоза и обработки. Строительные или производственные отходы зачастую основной проблемой имеют только их переработку.

Для определения и создания математического аппарата, описывающего систему обращения с отходами, необходимо структурировать множество факторов, влияющих на систему.

Иными словами, систему переработки ТКО можно в данной работе можно полагать как четыре подсистемы: подсистема сбора, перевозки, переработки и захоронения груза, то есть ТКО можно рассматривать как груз [5].

Факторы влияющие на системы работы с отходами

Основные группы функций, оказывающие влияние на сферу обращения ТКО, имеют четыре направления, которые для удобства можно условно назвать:

1. «Предметные» – группа функций представляющие из себя зависимости от возникающего в сфере влияния предприятия или региона объема ТКО. Это факторы напрямую связанные с предметом деятельности предприятий, то есть с твердыми бытовыми отходами.
2. «Качественные» – представляют характеристики предприятия оказывающего услуги по организации процесса утилизации отходов. Характеристики, касающиеся подвижного состава, персонала, маршрутов, перерабатывающих станций и т.д.
3. «Экономические первой группы» – группа функций, имеющих зависимость от стоимости утилизации ТКО, тарифов и оплаты труда. Как правило регулируются на государственном уровне или имеют от этого сильное влияние.
4. «Экономические второй группы» – представляют различные издержки образующиеся в процессе работы предприятия. Требуют наибольшего внимания в процессе решения оптимизационных задач.

Подобного рода структуру можно описать математически в виде модели транспортной системы [6]. Ниже представлены базовые функции и процессы влияющие на объект исследования (формула 1):



$$F_{TKO} = (\vec{Q}, \vec{F}, \vec{R}, \vec{C}) \quad (1)$$

где Q-вектор параметров связанный с объемом обрабатываемых ТБО (предметные факторы), F-вектор параметров, описывающий структуру предприятия (качественные факторы), R - вектор параметров, описывающий структуру тарифных составляющих (экономические первой группы), C – вектор параметров, характеризующий издержки в системе (экономические факторы второй группы).

Связи в системе можно представить в виде следующей системы (формула 2). Необходимо отметить также наличие временных связей:

$$F_{TKO} = \begin{cases} Q(F, t) \\ F(C, R) \\ R(Q, t) \\ C(F, R) \end{cases} \quad (2)$$

Такая система является базовым представлением системы вывоза твердых коммунальных отходов в общем виде. Однако рассмотрение на таком общем уровне не позволит сделать прогноз и анализ системы. Для анализа структуры и решения задачи прогнозирования необходимо представить процесс более детально, опираясь на влияющие факторы.

Характеристика предприятия наиболее явно связана с мощностями предприятия, то есть перерабатывающими мощностями, транспортом, организацией работы, характеристик полигона, маршрутами следования. В свою очередь эти факторы имеют внутри предприятия сильную зависимость от экономических параметров, таких как издержки предприятия.

Общие издержки предприятия связаны с тарифами, транспортными и другими различными издержками, влияющими на работу предприятия, то есть с финансовой характеристикой предприятия. К ней можно отнести расходы на заработные платы, капиталовложения, различные случайные расходы, общая доходность предприятия (экономическая характеристика, классифицирующая уровень прибыльности предприятия), расходы на топливо и горюче-смазочные материалы, документацию, организацию работы.

Важно учитывать функции государственного влияния на тарифы, поскольку накладываются серьезные ограничения по тарифу на вывоз, что влияет на работу предприятия.

В целом такое описание факторов, влияющих на систему и зависимостей между ними, позволяет получить представление о сложности системы и процессах, протекающих внутри системы. Поскольку факторы не имеют прямых линейных зависимостей между собой, пользуясь такой моделью нельзя получить напрямую точные численные результаты. Однако такая модель необходима при создании имитационных моделей, а также для обоснования зависимостей между факторами при создании численных математических моделей.

Структура процесса, может быть описана через более детальные параметры. Сложность и стохастичность системы при этом возрастет, однако можно будет говорить о наличии сложных зависимостей между функциями системы. В таблице 1 представлены характеристики представленных параметров.



Таблица 1– Параметры системы

Параметр	Расшифровка	Размерность
$Q_{\text{общ}}$	Объем ТБО образующийся на территории в t	м^3
$Q_{\text{выв}}$	Объем ТБО вывозимый предприятием в t	м^3
$Q_{\text{зах}}$	Объем захоронения ТБО	м^3
$Q_{\text{пер}}$	Количество перерабатываемых ТБО	м^3
$N_{\text{чел}}$	Население	человек
$F_{\text{тр}}$	Характеристика предприятия	безразм.
$W_{\text{обр}}$	Схема обращения (организация работы предприятия)	безразм.
$V_{\text{тех}}$	Количество техники	ед.
$V_{\text{инфр}}$	Количество станций перегруза и др. сопутствующих объектов	ед.
$C_{\text{сов}}$	Совокупные издержки	руб.
$C_{\text{тр,раб,кап,случ}}$	Транспортные, другие, капитальные, случайные издержки	руб.
$m_{\text{мр}}$	Количество маршрутов	ед.
P	Тарифы	руб./ м^3
$C_{\text{пр}}$	Финансовая характеристика предприятия	руб.
$P_{\text{зп,кап,гос,+,--}}$	Заработная плата, капиталовложения, государственное влияние, доходность предприятия, расходы	руб.

Каждая из представленных функций включает в себя следующие факторы, влияющие на систему:

1. «Предметная» группа функций Q – характеризуется следующими подсистемами:
 - Объем общий. Объем ТБО, образующийся в регионе.
 - Объем вывоза. Количество ТБО, обработанное предприятием за период.
 - Объем переработки. Количество ТБО, которое не попадает на захоронение, а перерабатывается, сжигается или обрабатывается альтернативными способами.
 - Объем захоронения. Количество ТБО захороняемое на соответствующих полигонах.
 - Население региона
2. «Качественная» группа функций F – содержит:
 - Количество техники: подвижной состав, контейнеры, вспомогательное оборудование.
 - Количество маршрутов движения.
 - Количество станций перегруза, мусоросжигательных заводов и т.п.
 - Схемы обращения. Характеристика организации вывоза.
3. «Экономические первой группы» группа функций P содержит:
 - Тарифы на вывоз.
 - Доходы предприятия.
 - Капиталовложения.
 - Финансирование из государственных и иных источников.
4. «Экономические второй группы» группа функций C содержит:
 - Различные издержки предприятия. Топливные, заработные платы, налоги и пр.
 - Случайные факторы



При построении целевой функции важнейшим фактором является отражение противоречия, связанного, с ограничениями системы переработки отходов и возрастающим объёмом ТБО, что приводит к невозможности переработки отходов существующей системой в полном объёме с заданным параметрами. Таким образом, задачей предприятия работающего в сфере обращения с отходами является переработка с наименьшими издержками, а экологические и иные требования отходят на второй план. Со стороны потребителей первостепенно важным является не только вывоз отходов, но и возможность глубокой переработки.

Задача предприятия – сократить свои издержки, задача потребителя и региона – обеспечить вывоз и переработку ТБО. Поэтому с точки зрения потребителя (под контролем региона) задача предельно проста – разница между возникшим объёмом отходов и количеством отходов, переданным на обработку минимальна. Это условие одно из главных в территориальных схемах обращения с отходами (формула 3):

$$Q_{\text{общ}} - Q_{\text{обр}} \rightarrow 0 \quad (3)$$

где, $Q_{\text{общ}}$ – общее количество образующихся отходов в регионе, $Q_{\text{обр}}$ – отходы которые проходят стадию обработки специализированными предприятиями.

В целом обработанные отходы представляют собой совокупность захороненных и переработанных отходов (формула 4):

$$Q_{\text{обр}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{зах}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{пер}} \quad (4)$$

где n – количество предприятий, работающих в регионе с отходами $Q_{\text{зах}}$ – захораниваемые отходы, $Q_{\text{пер}}$ – перерабатываемые отходы.

В свою очередь захораниваемые отходы делятся на три очень большие группы (формула 5):

$$\sum_{i=1}^n Q_{\text{зах}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{зах1}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{зах2}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{зах3}} \quad (5)$$

где, $Q_{\text{зах1}}$ – отходы захораниваемые из-за невозможности их переработки, $Q_{\text{зах2}}$ – захораниваемые, но имеют возможность переработки, $Q_{\text{зах3}}$ – отходы, которые захораниваются из-за высокой стоимости переработки или чрезвычайной трудоемкости последней.

Задачей государственного и экономического регулирования является, сведение двух последних групп к минимуму.

В свою очередь переработка отходов (формула 6) состоит из рециклинга ($Q_{\text{рец}}$), сжигания ($Q_{\text{сж}}$) и альтернативных способов утилизации ($Q_{\text{доп}}$):

$$\sum_{i=1}^n Q_{\text{пер}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{рец}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{сж}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{доп}} \quad (6)$$

Рециклинг отходов можно представить, как (формула 7):

$$Q_{\text{рец}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \quad (7)$$

где, Q_1 – бумажные отходы и древесина, Q_2 – металлолом и ценные металлы, Q_3 – перерабатываемый пластик, Q_4 – стекло, Q_5 – некоторые пищевые отходы, Q_n – другие виды перерабатываемых отходов.

Исходя из описанного выше можно выразить в формуле 8 целевую функцию



потребителя в общем виде:

$$Q_{общ} - \left[\sum_{i=1}^n (Q_{зах1} + Q_{зах2} + Q_{зах3}) + \sum_{i=1}^n (Q_{пер} + Q_{сж} + Q_{доп}) \right] \rightarrow 0 \quad (8)$$

где $Q_{общ}$ - общее количество образующихся отходов в регионе, $Q_{зах1}$ - отходы захораниваемые из-за невозможности их переработки, $Q_{зах2}$ - захораниваемые, но имеют возможность переработки, $Q_{зах3}$ - отходы, которые захораниваются из-за высокой стоимости переработки или чрезвычайной трудоемкости последней, n - количество предприятий, работающих в регионе с отходами, $Q_{пер}$ - количество отходов вторично переработанных, $Q_{сж}$ - количество сожженных отходов, $Q_{доп}$ - количество отходов переработанных альтернативными способами. Размерность каждой переменной - $м^3$.

Важным фактором, который принципиально учесть, является приоритет на переработку отходов нежели на ее захоронение. Возможно, допустимые соотношения регулируются на местах, но в общем виде (формула 9) это ограничение выражается:

$$\begin{cases} \frac{Q_{пер}}{Q_{общ}} \rightarrow 1 \\ \frac{Q_{зах}}{Q_{общ}} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (9)$$

Так выглядит целевой процесс с точки зрения потребителя и региона. Критерием оценки с точки зрения региона является своевременность выполнения работы (время).

С точки зрения предприятия целевым критерием являются денежные средства, то есть сокращение издержек.

Таким образом (формула 10) целевая функция предприятия имеет вид:

$$P - C_{сов} \rightarrow \max \quad (10)$$

где P - прибыль предприятия, $C_{сов}$ - совокупные издержки.

Прибыльность предприятия (формула 11) в первую очередь напрямую зависит от количества переработанных отходов и тесно связана с тарифом на вывоз. В общем виде:

$$P = R \cdot Q_{пер} + R_{1+} \quad (11)$$

где R - тариф на утилизацию $1 м^3$ отходов, $Q_{пер}$ - перерабатываемые отходы, R_{1+} - прибыль от продажи вторично переработанных отходов.

Поскольку тариф величина, определяемая в большей степени государством, и оперативно изменить его невозможно, основным параметром регулирования собственной прибыли для предприятия становится минимизация совокупных издержек.

Совокупные издержки (формула 12) можно представить, как:

$$C_{сов} = C_{тр} + C_{пр} + C_{зах} + C_{доп} + C_{случ} \rightarrow \min \quad (12)$$

где $C_{тр}$ - транспортные издержки, $C_{пр}$ - издержки на переработку, $C_{зах}$ - издержки на захоронение, $C_{доп}$ - дополнительные издержки, $C_{случ}$ - случайные издержки.

Транспортные издержки прежде всего связаны с расходами на совершение рейсов и расходом топлива. Однако поскольку количество рейсов меняется в зависимости от



количества станций перегруза, то в этой формуле необходимо учитывать капиталовложения на строительство новых станций перегруза как дополнительные издержки. Транспортные издержки (формула 13) будут в общем виде будут иметь вид:

$$C_{mp} = \sum_{i=1}^n F_{год} \cdot f + \sum_{i=1}^n S_{год} \cdot s + C_{доп} \quad (13)$$

где i - вид маршрута следования, m - количество видов анализируемых маршрутов, $F_{год}$ – годовой расход топлива на i -ом маршруте, f - оптовая стоимость литра топлива, $S_{год}$ - количество рейсов в рамках анализируемого маршрута за год, s – стоимость оплаты одного рейса, $C_{доп}$ - дополнительные издержки.

Если разделить виды маршрутов, то важно понимать, что структурно суммарные транспортные издержки складываются из издержек типов маршрутов (формула 14). В данном случае маршруты разбиваются и классифицируются таким образом, поскольку это наиболее явным образом отражает изменения в системе при ее анализе:

$$C_{mp} = C_{разм} + C_{1ст} + C_{2ст} + C_{прям} + C_{доп} \quad (14)$$

где $C_{разм}$ – издержки на маршруты размещения контейнеров ТБО, $C_{1ст}$ - издержки на маршруты вывоза первой ступени, $C_{2ст}$ - издержки на маршруты вывоза второй ступени, $C_{прям}$ - издержки на маршруты прямого вывоза, $C_{доп}$ - дополнительные издержки.

Издержки на переработку (формула 15):

$$C_{np} = S_{mp/n} + C_{раб/n} \quad (15)$$

где $S_{тр/п}$ – оплата труда работников, $C_{раб/п}$ - издержки на переработку (электричество, топливо, вспомогательное оборудование).

Издержки на захоронение (формула 16):

$$C_{зах} = S_{тр/з} + C_{раб/з} \quad (16)$$

где $S_{тр/з}$ – оплата труда работников, $C_{раб/з}$ - издержки на захоронение (электричество, топливо, вспомогательное оборудование).

Таким образом совокупные издержки предприятия (формула 17) можно описать следующим образом:

$$C_{сов} = \left[\sum_{i=1}^n F_{год} \cdot f + \sum_{i=1}^n S_{год} \cdot s + C_{кан} \right] + \left[S_{mp/n} + C_{раб/n} \right] + \left[S_{тр/з} + C_{раб/з} \right] + C_{случ} \rightarrow \min \quad (17)$$

Важно понимать, что при построении модели, может возникнуть необходимость в записи формулы в ином виде. Зависеть это будет от типа исходных данных, которые будут предоставлены для анализа системы.

Кроме того, эту формулу можно переписать для удобства в пересчете на единицу перерабатываемого предприятием ТБО. Пояснения представлены в таблице 2. Тогда система (формула 18) будет иметь вид:

$$\sum_{m=0}^{B_{пол}} Q_{зах} \cdot (C_{1зах} + C_{1мп} + C_{1раб}) + \left[\sum_{k=0}^{V_{инфр}} Q_{неп} \cdot (C_{1неп} + C_{1мп} + C_{1раб} - R_{1+}) \right] + C_{кан} + C_{случ} \rightarrow \min \quad (18)$$



Таблица 2 – Пояснение к функции 18

Параметр	Определение
$Q_{\text{зах}}$	Количество захороненных отходов
$Q_{\text{пер}}$	Количество переработанных отходов
$C_{1\text{зх,пер}}$	Стоимость захоронение, переработки единицы
$C_{1\text{тр}}$	Стоимость транспортировки единицы
$C_{1\text{раб}}$	Стоимость оплаты труда на перевозку единицы
P_{1+}	Прибыль от продажи вторично переработанного
$C_{\text{случ}}$	Случайные факторы влекущие издержки
$C_{\text{кап}}$	Издержки на капиталовложения
$B_{\text{пол}}$	Количество полигонов захоронения
$V_{\text{инфр}}$	Количество станций переработки отходов

Формулы 17 и 18 описывают совокупные издержки принципиально разным подходом. Связано это со спецификой исходных данных. При создании методики прогноза и анализа данных можно пользоваться любой из описанных формул в зависимости от того в виде каких параметров передаются данные с предприятия и в каком виде отражаются в статистике. Чаще всего предприятия имеют абсолютные цифры своих издержек, однако в некоторых случаях в отчетах отмечаются средние показатели (расходы на утилизацию 1 м³ ТБО за год и т.д.). В таком случае удобнее будет воспользоваться формулой 18.

Поскольку задачи целевая функция потребителя (региона) и транспортного предприятия различны, необходимо обосновать и установить связь между этими функциями.

Связь между объёмом вывоза и транспортным предприятием (формула 19) согласно формуле 14 выглядит следующим образом:

$$Q_{\text{выв}}(Q_{\text{общ}}, F_{\text{тр}}) \quad (19)$$

где, $Q_{\text{выв}}$ - объём ТКО, обрабатываемый предприятием, $Q_{\text{общ}}$ - общий объём ТКО в регионе, $F_{\text{тр}}$ - транспортная характеристика предприятия.

То есть объём ТКО, перерабатываемый предприятием, зависит от характеристики предприятия и объема ТКО, образующегося в регионе.

В общем виде характеристика предприятий, специализирующихся на обработке ТБО в целом может характеризоваться следующим видом (формула 20). Характеристика предприятия при создании имитационной модели отражается совокупностью функций: вывоза, подвижного состава, персонала, контейнеров, площадок обслуживания и т.д...

Пояснения даны ниже в таблице 3:

$$\sum_{i=1}^{Q_{\text{общ}}} Q_{\text{выв}} + \sum_{i=1}^{W_n} W + \sum_{i=1}^{B_n} B + \sum_{i=1}^{S_n} S + \sum_{i=1}^{P_n} P \pm \psi_i(t) - \psi_{\text{сн}}(Q_{\text{выв}}, t) \rightarrow \max \quad (20)$$

При следующих ограничениях:

$$\begin{cases} W_{\text{авт}} \in [W_{\text{мал}}, W_{\text{сред}}, W_{\text{бол}}] \\ B_{\text{конт}} \in [B_{\text{мал}}, B_{\text{сред}}, B_{\text{бол}}] \\ W_i \in [W_1, W_2, \dots, W_n] \\ B_i \in [B_1, B_2, \dots, B_n] \\ S_i \in [S_1, S_2, \dots, S_n] \\ P_i \in [P_1, P_2, \dots, P_n] \end{cases}$$



Таблица 3 – Пояснение к функции 20

Параметр	Определение
$Q_{\text{общ}}$	Общее количество ТБО
$Q_{\text{выб}}$	Количество перевезенных ТБО
W	Количество подвижного состава
B	Количество контейнеров
S	Количество станций перегруза
P	Количество обслуживающего персонала
$\psi_i(t)$	Функция государственного влияния
$\psi_{\text{сн}}(Q_{\text{выб}}, t)$	Случайные процессы

Подвижной состав классификационно разделен три группы. Эта классификация упрощенно дает представление о задачах, которые выполняет транспорт, а именно мелкий автомашины для доставки тары, сборщики и автомобили второй ступени. Контейнеры также имеют разную емкость.

Кроме транспорта и количественных характеристик ТКО в этой модели присутствуют функции производственных мощностей (станций перегруза, мусоросжигательных заводов), функции персонала (характеристика работников, количественные и качественные показатели), функции государственного влияния (могут выражаться как в сторону повышения доходности предприятий, так и в сторону уменьшения доходности) и случайные процессы (чрезвычайные ситуации, аварии, и прочее).

Таким образом с учетом противоречия в целях между предприятиями и регионом система целевых функций будет иметь следующий вид (формула 21):

$$\begin{cases} Q_{\text{общ}} - \left[\sum_{i=1}^n (Q_{\text{зах1}} + Q_{\text{зах2}} + Q_{\text{зах3}}) + \sum_{i=1}^n (Q_{\text{рец}} + Q_{\text{сж}} + Q_{\text{доп}}) \right] \rightarrow \min \\ \left[R \cdot Q_{\text{пер}} + R_{1+} \right] - \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^m F_{\text{зод}} \cdot f + \sum_{i=1}^m S_{\text{зод}} \cdot s + C_{\text{кан}} \right] + \left[S_{\text{тр/п}} + C_{\text{раб/п}} \right] + \left[S_{\text{тр/з}} + C_{\text{раб/з}} \right] + C_{\text{лнч}} \rightarrow \max \end{cases} \quad (21)$$

При следующих ограничениях:

$$\begin{cases} \frac{Q_{\text{пер}}}{Q_{\text{общ}}} \rightarrow 1 \\ \frac{Q_{\text{зах}}}{Q_{\text{общ}}} \rightarrow 0 \end{cases}$$

где $Q_{\text{общ}}$ - общее количество отходов в регионе, $Q_{\text{зах1}}$ - отходы захораниваемые из-за невозможности их переработки, $Q_{\text{зах2}}$ – захораниваемые, но имеют возможность переработки, $Q_{\text{зах3}}$ – отходы, которые захораниваются из-за высокой стоимости переработки или трудоемкости, n – количество предприятий, работающих в регионе с отходами, $Q_{\text{рец}}$ – количество отходов вторично переработанных, $Q_{\text{сж}}$ - количество сожженных отходов, $Q_{\text{доп}}$ – отходы переработанные альтернативными способами, $S_{\text{тр/з}}$ – оплата труда, $C_{\text{раб/з}}$ - издержки на захоронение (электричество, топливо, вспомогательное оборудование), $S_{\text{тр/п}}$ – оплата труда, $C_{\text{раб/п}}$ - издержки на переработку (электричество, топливо, вспомогательное оборудование), i - вид маршрута следования, m - количество видов анализируемых маршрутов, $F_{\text{год}}$ – годовой расход топлива на i -ом маршруте, f - оптовая стоимость литра топлива, $S_{\text{год}}$ - количество рейсов в рамках анализируемого маршрута за год, s – стоимость оплаты одного рейса, $C_{\text{доп}}$ - дополнительные издержки.

Заключение

Предлагаемая математическая модель позволяет описывать и численно исследовать



основное противоречие пользователей системы работы с отходами, вращающееся в стремлении сокращать дешевые способы утилизации (захоронение) реализуя принципы экономики замкнутого цикла и извлекать прибыль и сокращать свои издержки. В статье произведено построение математической модели на макроуровне (на уровне «условного» предприятия, вовлеченного в процесс транспортировки, обработки и захоронения). Результаты моделирования демонстрируют широкий потенциал и возможности применения методов математического моделирования, а также возможность прогнозирования и использования методов оптимизации. Новизна данного исследования заключается в объединении технологического, экономического и транспортного критериев оптимизации транспортной сети вывоза коммунальных отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубинов, В. В. Современные проблемы описания и анализа систем работы с отходами в мегаполисах / В. В. Рубинов // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 2(36). – С. 39-44. – DOI 10.31799/2077-5687-2023-2-39-44. – EDN XYANTS.
2. Рубинов, В. В. Разработка модели оптимизации потоков твердых коммунальных отходов на уровне маршрутов / В. В. Рубинов // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: третья Международная научная конференция: сборник докладов. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 103-107. – DOI 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-103. – EDN QFRUPZ.
3. Федеральный закон РФ № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», принят государственной думой 22.05.1998 г. Постановлением № 2491-П ГД, подписан президентом РФ 24.06.1998 г. с изменениями по состоянию на 18.12.2006. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (дата обращения 01.11.2023).
4. Территориальные схемы обращения с отходами, основные положения [Электронный ресурс]. – URL: <http://gkhrazvitie.ru/recycling/> (дата обращения 24.11.2023).
5. Рубинов, В. В. Информационно-измерительные системы в технологическом процессе работы с твердыми коммунальными отходами / В. В. Рубинов // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Четвертая Международная научная конференция. Том Часть 1. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 249-253. – DOI 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-249-253. – EDN GWUNLP.
6. Майоров Н. Н. Практические задачи моделирования транспортных систем / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов – СПб.: ГУАП, 2012 – 185 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Рубинов Владислав Валерьевич –

Аспирант, инженер, научный сотрудник кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: vvr1071995@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Rubinov Vladislav Valerievich –

Postgraduate student, engineer, researcher at the Department of System Analysis and Logistics
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: vvr1071995@mail.ru