

УДК 62.932.2

**Ольга Борисовна Колибаба**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: koli-baba@mail.ru

**Мария Владимировна Козлова**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

**Андрей Борисович Гаряев**

ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ», доктор технических наук, профессор кафедры тепломассообменных процессов и установок, Россия, Москва, e-mail: gab874@yandex.ru

## Разработка критериев оценки эффективности методов обращения с твердыми коммунальными отходами

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Одной из наиболее социально значимых экологических проблем является проблема обращения с твердыми коммунальными отходами. В России наиболее распространенным методом обращения с отходами является их захоронение, то есть размещение на полигонах. Однако утилизация отходов таким способом не только не позволяет использовать их ресурсный потенциал, но и наносит вред окружающей среде. Наряду с данным методом используются и другие: рециклинг, сжигание, анаэробное сбраживание, термическая деструкция. Выбор того или иного метода обращения с отходами зависит от множества факторов: морфологического состава отходов, стоимости его реализации, суммарного воздействия на окружающую среду и т.д. В этой связи актуальным становится разработка комплексного критерия, позволяющего оценить эффективность применения конкретного метода обращения с отходами при заданных условиях.

**Материалы и методы.** Обоснование наиболее эффективного метода обращения с отходами, а также разработка комплексного критерия оценки эффективности выполнены с использованием метода анализа иерархий Т. Саати.

**Результаты.** Разработано шесть критериев, позволяющих оценить снижение объемов отходов, влияние процесса утилизации твердых коммунальных отходов на окружающую среду, объемы выбросов парниковых газов, энергетическую и экономическую привлекательность различных методов обращения с отходами. Предложен комплексный критерий, использование которого с привлечением экспертных оценок позволяет осуществить выбор метода утилизации твердых коммунальных отходов.

**Выводы.** В результате анализа полученных результатов установлено, что наиболее эффективным методом обращения с отходами является термическая деструкция, а захоронение отходов является менее предпочтительным, а также разработана методика для сопоставления и выбора способа утилизации твердых коммунальных отходов заданного состава на основе комплексного учета энергетических, экологических и экономических факторов.

**Ключевые слова:** метод анализа иерархий, твердые коммунальные отходы, захоронение коммунальных отходов, термическая деструкция, анаэробное сбраживание, рециклинг

**Olga Borisovna Kolibaba**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Head of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: koli-baba@mail.ru

**Maria Vladimirovna Kozlova**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

**Andrey Borisovich Garyaev**

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Heat and Mass Transfer Processes and Installations Department, Russia, Moscow, e-mail: gab874@yandex.ru

## Development of criteria to evaluate effectiveness of solid municipal waste management methods

### Abstract

**Background.** One of the most socially significant environmental problems is the problem of solid municipal waste (SMW) management. In Russia, the most common method of waste management is waste disposal, i.e., landfilling depositing. However, waste disposal in such a way prevents the use of their resource potential, and also, harms the environment. Along with this method, such methods as recycling, incineration, anaerobic digestion, and thermal destruction are used. The choice of a particular waste management method depends on many factors, for example the morphological composition of the waste, the cost of its implementation, the total impact on the environment, etc. Thus, development of a comprehensive criterion that allows evaluating the effectiveness of a specific waste management method under specified conditions is relevant.

**Materials and methods.** The substantiation of the most effective method of waste management, as well as the development of a comprehensive criterion for evaluating efficiency, is carried out using the method of analyzing hierarchies by T. Saati.

**Results.** Six criteria have been developed to assess the reduction of waste volume, the impact of the SMW recycling process on the environment, volume of greenhouse gas emissions, and the energy and economic attractiveness of various waste management methods. A comprehensive criterion has been proposed. The use of this criterion with the expert assessments makes it possible to choose a method for the disposal of SMW.

**Conclusions.** As a result of the analysis of the results obtained, it is found that the most effective method of waste management is thermal destruction, and waste disposal is less preferable. A method has been developed to compare and select a method for the disposal of SMW of a given composition based on a comprehensive account of energy, environmental and economic factors.

**Key words:** hierarchy analysis method, solid municipal waste, municipal waste disposal, thermal destruction, anaerobic digestion, recycling

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2024.3.020-028

**Введение.** Одной из актуальных проблем современности является утилизация и обезвреживание твердых коммунальных отходов (ТКО) [1–3].

С каждым годом объемы вывозимых ТКО интенсивно возрастают: за десятилетний период, с 2012 по 2021 годы, их количество увеличилось в 1,37 раза (с 255,8 до 349,5 млн м<sup>3</sup>)<sup>1</sup>.

В соответствии с общепринятой концепцией обращения с ТКО, наилучшим вариантом является предотвращение их образования, затем следует повторное их использование, далее – переработка и другие формы утилизации, включая энергетическую утилизацию отходов, не подлежащих вторичной переработке. Замыкает список размещение на полигонах как последнее средство, от которого в перспективе планируется отказаться полностью [4].

В России основная масса ТКО размещается на полигонах, санкционированных и несанкционированных свалках. Исследованиями доказана экологическая опасность таких объектов, обусловленная эмиссиями загрязняющих веществ в окружающую

среду в период эксплуатации объектов и более интенсивными, залповыми выбросами токсичных веществ при пожарах [5, 6]. Кроме этого, данный способ обращения с ТКО не позволяет эффективно реализовать ресурсный потенциал отходов.

Главный вектор в решении проблемы утилизации отходов направлен на их вовлечение в повторное использование, т. е. рециклинг.

Существующие методы обращения с отходами и взаимосвязь между ними отражены на рис. 1.



Рис. 1. Методы обращения с отходами

На сегодняшний день на практике применяются более 30 технологий энергетической утилизации ТКО, которые реализуются

<sup>1</sup> Вывезено за год твердых коммунальных отходов // Единая межведомственная информационно-статистическая система: официальный сайт. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/36702> (дата обращения 10.03.2024 г.).

на предприятиях Германии, Японии, Дании, США и других стран [7–10].

Анаэробное сбраживание является более предпочтительным по сравнению с полигонным захоронением. Однако данный метод может применяться только для органической составляющей ТКО, которая составляет менее 50 % от состава отходов<sup>2</sup>.

Термическое обезвреживание ТКО является одним из наиболее распространенных способов обращения с отходами и включает в себя ряд технологий. Данные методы утилизации направлены на уменьшение объема отходов, их преобразование в безвредные материалы.

Наиболее распространенным методом термического обезвреживания является сжигание [13], основные преимущества которого заключаются в получении тепловой энергии, существенном сокращении объемов ТКО. Однако в ходе данного процесса в атмосферу выбрасываются токсичные вещества, что неблагоприятно сказывается на экологической обстановке в районах расположения мусоросжигательных заводов [14].

В качестве альтернативы прямому сжиганию можно рассматривать технологии термической деструкции, в частности пиролиз. Пиролитические методы позволяют уменьшить количество вредных выбросов, а также не требуют дорогостоящей подготовки топлива и приспособлены для переработки отходов различного состава.

В настоящее время не существует идеального решения, которое позволило бы наиболее эффективно и в максимальном объеме утилизировать ТКО без образования производственных отходов, выбросов вредных веществ в атмосферу и сбросов сточных вод. Все имеющиеся в настоящее время технологии обладают своими преимуществами и недостатками, так что при выборе способа утилизации ТКО следует максимально учитывать все существенные параметры.

Выбор метода утилизации ТКО определяется рядом факторов: стоимостью реализации технологии, воздействием на окружающую среду, возможностью полного или частичного использования ТКО для получения «полезных» продуктов и др. При этом

стоит отметить, что каждый из этих факторов в разной степени влияет на выбор метода утилизации.

Поскольку на текущий момент отсутствует система критериев, позволяющих осуществить комплексную оценку эффективности применения той или иной технологии утилизации ТКО, то задача их разработки является актуальной.

**Методы исследования.** Нами предлагается подход к решению проблемы выбора технологии утилизации ТКО, базирующийся на использовании некоего комплексного критерия, являющегося результатом экспертной оценки. Комплексный критерий оценки эффективности способов обращения с отходами может быть получен с использованием метода анализа иерархий (МАИ) Т. Саати [15]. Методология использования МАИ требует разработки иерархической структуры, включающей цели, основные критерии, ограничения, альтернативы. Схема модели МАИ приведена на рис. 2. На первом иерархическом уровне находится цель (в нашем случае – утилизация ТКО), которая ограничена рядом критериев, расположенных уровнем ниже. Нами предложено 6 критериев, которым далее будет присвоена количественная оценка, а сочетание данных критериев в итоге моделирования образует несколько альтернатив, способствующих принятию решения (третий иерархический уровень).

В качестве одного из основных показателей эффективности методов обращения с ТКО следует рассматривать сокращение их масс или объемов. В математическом выражении критерий снижения массы ТКО имеет вид

$$K_m = 1 - \frac{m_{\text{ост}}}{m_{\text{ТКО}}}, \quad (1)$$

где  $m_{\text{ост}}$  – масса твердого (жидкого) остатка, полученного в результате переработки ТКО, кг;  $m_{\text{ТКО}}$  – масса ТКО, кг.

Стоит отметить, что в случае, когда ТКО утилизируются путем их захоронения, численное значение данного критерия равно нулю, поскольку исходная масса ТКО не претерпевает никаких изменений.

<sup>2</sup> ИТС 15-2021 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов)» // Бюро наилучших доступных технологий: официальный сайт. – URL: [https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?Urllid=799&etkstructure\\_id=1872](https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?Urllid=799&etkstructure_id=1872) (дата обращения 18.02.2024).

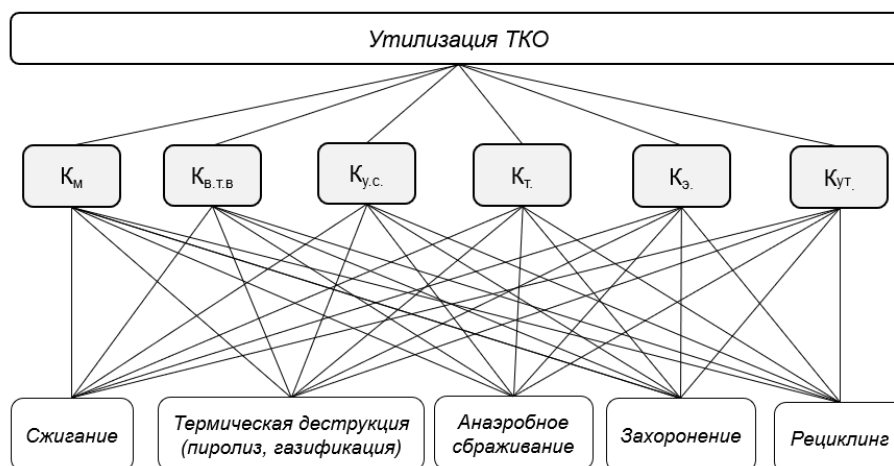


Рис. 2. Схема модели МАИ

Процесс рециклинга включает в себя повторное использование отходов по тому же назначению, а также возврат отходов после соответствующей обработки в производственный цикл [16]. При определении данного критерия для этого метода необходимо принимать во внимание, что не весь состав ТКО подвержен рециклингу. Анализируя морфологический состав ТКО (табл. 1)<sup>3</sup>, можно сделать вывод, что в рециклинге участвует не более 50 % от исходной массы ТКО.

Таблица 1. Усредненный морфологический состав ТКО

Компонент	Содержание компонентов ТКО по климатическим зонам, %		
	средняя зона	южная зона	северная зона
Пищевые отходы	30–37	37–45	29–36
Бумага, картон	37–41	23–32	26–36
Дерево	1–2	1–2	2–6
Черный металл	3–4	2–3	3–4
Цветной металл	1–2	1–2	1–2
Текстиль	3–5	3–5	4–6
Кости	1–2	1–2	1–2
Стекло	2–3	2–3	4–6
Кожа, резина	0,5–1	1	2–3
Камни	0,5–1	1	1–3
Пластмасса	5–6	5–6	5–6
Прочее	1–2	3–4	1–2
Отсев (менее 15 мм)	5–7	6–8	4–6

В результате термической деструкции, анаэробного сбраживания и сжигания образуется твердый (жидкий) остаток, поэтому полной утилизации исходной массы ТКО данными методами достичь не удастся, соответственно, значение этого критерия для них менее 1. Кроме этого, анаэробному сбраживанию подвергается не вся исходная масса ТКО, а только органическая ее часть, что также влияет на значение данного критерия.

При полном сжигании ТКО масса твердого остатка является его зольностью.

Не менее важным аспектом, которому стоит уделять внимание при обращении с ТКО, является воздействие на окружающую среду. В частности, это касается вредных опасных выбросов, которые образуются в результате обращения с ТКО. В этой связи возникает необходимость введения критерия, отражающего данные обстоятельства.

К токсичным веществам, содержащимся в ТКО, а также получаемым в результате их утилизации, следует относить токсичные органические соединения, в том числе диоксины, а также тяжелые металлы. Кроме того, при неполном сгорании могут попадать в атмосферу и канцерогенные вещества, такие как бенз(а)пирен.

Критерий количества опасных выбросов, образующихся в результате обращения с ТКО и загрязняющих атмосферный воздух, можно записать как

<sup>3</sup> ИТС 15-2021 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов)» // Бюро наилучших доступных технологий: официальный сайт. – URL: [https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?Urllid=799&etkstructure\\_id=1872](https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?Urllid=799&etkstructure_id=1872) (дата обращения 18.02.2024).

$$K_{\text{в.т.в}} = 1 - \frac{b_i \sum_{i=1}^n m_{\text{в.т.в},i}}{m_{\text{т.в}}}, \quad (2)$$

где  $m_{\text{в.т.в},i}$  – масса выбросов  $i$ -го токсичного вещества, получаемого в результате обращения с ТКО и поступающего в атмосферу, кг;  $m_{\text{т.в}}$  – масса токсичных веществ, содержащихся в ТКО, кг;  $b_i$  – коэффициент, отражающий степень опасности  $i$ -го вещества, который должен быть специальным образом определен (например, как величина, обратная классу опасности вещества).

При полном сжигании ТКО все присутствующие в исходной массе токсичные органические соединения переходят в окисленное состояние, что резко уменьшает их опасность, но часть опасных веществ в виде твердых частиц попадает в атмосферу.

Реализация различных методов обращения с ТКО сопровождается выбросами в атмосферу веществ, оказывающих влияние на климат. В качестве индикатора этого воздействия принято использовать «углеродный след», который определяется величиной выбросов парниковых газов.

При утилизации отходов часть углерода, содержащегося в исходной массе, окисляется в результате воздействия на ТКО и переходит в газообразное состояние. Данное соединение может оказывать негативное влияние на окружающую среду. Для количественной оценки этого показателя предложен критерий выбросов углерода в атмосферу:

$$K_{\text{у.с}} = 1 - \frac{m_{\text{т.к.о}} - m_{\text{угл.ост}}}{m_{\text{т.к.о}}}, \quad (3)$$

где  $m_{\text{угл.ост}}$  – масса углерода в твердом или жидком углеродном остатке, полученном в результате обращения с ТКО, кг.

Данный критерий характеризует степень влияния термической переработки (сжигания и термической деструкции) на парниковый эффект. При сжигании происходит непосредственное выделение углеродсодержащих газов с образованием зольного остатка. А в результате термической деструкции образуется углеродный остаток и горючий газ, который в ходе последующего сжигания также приведет к образованию парниковых газов, негативно влияющих на климат.

В случае захоронения, термического воздействия на ТКО не происходит, поэтому величина этого критерия равна 1.

В сфере обращения с ТКО актуальными являются энергетические методы утилизации, позволяющие использовать отходы в качестве альтернативного топлива для производства тепловой и электрической энергии.

Для количественной оценки степени использования энергии, заключенной в ТКО, при применении того или иного метода утилизации можно применить следующий критерий:

$$K_{\text{т}} = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{с.н}}}{\mathcal{E}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{пол}}}{\mathcal{E}}, \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}$  – энергия, полученная в результате переработки 1 тонны ТКО (топливо, тепловая и электрическая энергия), т у.т.;  $\mathcal{E}_{\text{с.н}}$  – энергия, получаемая при переработке 1 тонны ТКО и используемая для поддержания процесса его переработки (собственные нужды установки), т у.т.;  $\mathcal{E}_{\text{пол}}$  – полезная товарная энергия (топливо, тепловая и электрическая энергия), получаемая при переработке 1 тонны ТКО, т у.т.

При захоронении отходов заключенная в них энергия полезно не используется и  $K_{\text{т}} = 0$ . При сжигании ТКО вся исходная масса используется в качестве топлива. Если эта энергия не используется для получения пара или горячей воды, то  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{с.н}}$  и  $K_{\text{т}} = 0$ . Для других технологий значение  $K_{\text{т}}$  может быть более нуля, но всегда менее 1.

Экономический аспект при выборе метода обращения с ТКО включает в себя затраты на его осуществление и потенциальную прибыль от реализации полезных продуктов переработки (тепловая и электрическая энергия, горючий газ, углеродный остаток).

Для корректного сравнения методов обращения с ТКО следует ввести критерий экономической привлекательности:

$$K_{\text{э}} = \frac{\Pi}{3}, \quad (5)$$

где  $\Pi$  – прибыль от продажи полезных продуктов переработки ТКО, тыс. руб.; 3 – затраты на осуществление процесса переработки ТКО, тыс. руб.

Основные финансовые затраты на реализацию различных методов обращения с ТКО приходятся на организацию раздельного сбора, предварительной подготовки и транспортировки ТКО, на приобретение не-

обходимого оборудования, а также включают затраты энергии (топлива) для осуществления процессов.

Для рециклинга получение прибыли осуществляется от реализации вторичного сырья – полимеров (пластика), макулатуры (бумаги и картона), стеклобоя (стекла). Доход от реализации вторичного сырья при достижении глубины переработки 60–75 % может составлять от 2,5 до 4,5 тыс. руб. на тонну отходов [18].

При анаэробном сбраживании ТКО потенциальный доход определяется возможностью сбыта получаемого биогаза, при термической деструкции – топливного газа, при сжигании – получаемой тепловой или электрической энергии.

Как было сказано выше, ряд существующих методов обращения с ТКО требует предварительной сортировки отходов, соответственно, обработке подвергается не вся масса ТКО, а лишь ее часть. Например, для осуществления пиролиза предварительно необходимо извлечь пластик.

Учет данный фактор позволяет применение критерия доли массы, удаляемой при переработке:

$$K_{\text{ут}} = \frac{m_{\text{ут}}}{m_{\text{исх.т.ко}}}, \quad (6)$$

где  $m_{\text{ут}}$  – масса ТКО, пригодных для переработки, кг;  $m_{\text{исх.т.ко}}$  – исходная масса ТКО, кг.

**Результаты исследования.** После разработки схемы модели МАИ (рис. 2) устанавливаются приоритеты критериев и оценивается каждая из альтернатив по критериям. В МАИ элементы задачи сравниваются попарно по отношению к их воздействию на общую для них характеристику. Система парных сравнений может быть представлена в виде обратносимметричной матрицы. Элементом матрицы  $a(i,j)$  является интенсивность проявления элемента иерархии  $i$  относительно элемента иерархии  $j$ , оцениваемая по шкале интенсивности от 1 до 5, где:

- 1 – равная важность;
- 3 – умеренное превосходство;
- 5 – значительное превосходство.

На первом этапе были сформированы матрицы парных сравнений критериев на основе экспертных оценок. В табл. 2 приведены результаты парных сравнений критериев эффективности методов обращения с ТКО в соответствии с принятой шкалой.

На основе полученной матрицы был вычислен вектор весов критериев (ВВК) в следующей последовательности [15]:

1. Перемножали элементы каждой строки. Получили столбец.
2. Извлекали из полученных элементов корень, степень которого равна числу строк. Получили новый столбец.
3. Находили сумму элементов столбца.
4. Разделив на эту сумму каждый элемент, получили вектор приоритетов.

Таблица 2. Матрица парных сравнений критериев

	$K_m$	$K_{\text{в.т.в}}$	$K_{\text{у.с}}$	$K_T$	$K_э$	$K_{\text{ут}}$	ВВК
$K_m$	1	1	3	5	3	3	0,277
$K_{\text{в.т.в}}$	1	1	3	5	3	3	0,277
$K_{\text{у.с}}$	1/3	1/3	1	3	1	1	0,131
$K_T$	1/5	1/5	1/3	1	1	1	0,087
$K_э$	1/3	1/3	1	1	1	1	0,114
$K_{\text{ут}}$	1/3	1/3	1	1	1	1	0,114

Сравнивая оценки вектора приоритета, можно сделать вывод, что наибольшее значение при разработке критерия эффективности переработки ТКО придается в первую очередь критерию снижения объема ТКО  $K_m$ , а также критерию  $K_{\text{в.т.в}}$ , связанному с количеством токсичных вредных выбросов в окружающую среду, полученных в результате обращения с отходами.

С учетом полученных весовых коэффициентов выражение для определения комплексного критерия принимает вид

$$K = 0,277 \cdot K_m + 0,277 \cdot K_{\text{в.т.в.}} + 0,131 \cdot K_{\text{у.с.}} + 0,087 \cdot K_T + 0,114 \cdot K_э + 0,114 \cdot K_{\text{ут}}. \quad (7)$$

Далее, на втором этапе, аналогично были сформированы матрицы парных сравнений альтернатив для каждого критерия. Число матриц, соответственно, равно числу критериев (табл. 3).

На третьем этапе, используя рассчитанные весовые коэффициенты критериев для каждого метода в отдельности и весовые коэффициенты критериев, была составлена матрица «критерий – альтернатива». Перемножением полученной матрицы и вектора весов были вычислены коэффициенты предпочтения того или иного метода обращения с ТКО:

$$\begin{bmatrix}
 & K_M & K_{B.T.B} & K_{y.c} & K_T & K_3 & K_{yT} \\
 C & 0,344 & 0,054 & 0,077 & 0,463 & 0,077 & 0,328 \\
 TД & 0,344 & 0,344 & 0,231 & 0,195 & 0,385 & 0,215 \\
 AC & 0,129 & 0,344 & 0,231 & 0,195 & 0,385 & 0,065 \\
 З & 0,054 & 0,129 & 0,231 & 0,073 & 0,077 & 0,325 \\
 P & 0,129 & 0,129 & 0,231 & 0,073 & 0,077 & 0,065
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 0,277 \\
 0,277 \\
 0,131 \\
 0,087 \\
 0,114 \\
 0,114
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0,192 \\
 0,305 \\
 0,229 \\
 0,131 \\
 0,143
 \end{bmatrix}$$

Таблица 3. Матрица парных сравнений альтернатив

	С	ТД	АС	З	Р		С	ТД	АС	З	Р	С	ТД	АС	З	Р		
	$K_M$						$K_{B.T.B}$						$K_{y.c}$					
С	1	1	3	5	3	С	1	1/5	1/5	1/3	1/3	С	1	1/3	1/3	1/3	1/3	
ТД	1	1	3	5	3	ТД	5	1	1	3	3	ТД	3	1	1	1	1	
АС	1/3	1/3	1	3	1	АС	5	1	1	3	3	АС	3	1	1	1	1	
З	1/5	1/5	1/3	1	1/3	З	3	1/3	1/3	1	1	З	3	1	1	1	1	
Р	1/3	1/3	1	3	1	Р	3	1/3	1/3	1	1	Р	3	1	1	1	1	
	$K_T$						$K_3$						$K_{yT}$					
С	1	3	3	5	5	С	1	1/5	1/5	1	1	С	1	3	5	1	5	
ТД	1/3	1	1	3	3	ТД	5	1	1	5	5	ТД	1/3	1	3	3	3	
АС	1/3	1	1	3	3	АС	5	1	1	5	5	АС	1/3	1/3	1	1/5	1	
З	1/5	1/3	1/3	1	1	З	1	1/5	1/5	1	1	З	1	3	5	1	5	
Р	1/5	1/3	1/3	1	1	Р	1	1/5	1/5	1	1	Р	1/3	1/3	1	1/5	1	

**Примечание.** С – сжигание; ТД – термическая деструкция; АС – анаэробное сбраживание; З – захоронение; Р – рециклинг.

Анализируя полученные данные, стоит отметить, что методы термической деструкции ТКО являются предпочтительными, так как обладают наибольшим значением весового коэффициента, равного 0,305. Наименее привлекательным является захоронение.

Предлагаемый комплексный критерий является результатом нашей экспертной оценки для ТКО среднего состава. Соответственно, величины весовых коэффициентов могут быть другими в зависимости от обстоятельств и уровня принятия решений, например от состава отходов, существующей экологической обстановки, имеющихся в распоряжении финансовых средств и т.п. Нами предлагается форма и способ применения этого комплексного критерия.

Следует отметить, что предложенная группа основных критериев может быть расширена и дополнена при необходимости другими критериями, характеризующими, например, время утилизации ТКО, удельные энергозатраты на утилизацию 1 т ТКО и др.

Разработанный нами комплексный критерий может служить для поддержки принятия решений лицам, отвечающим за утилизацию твердых отходов на различных уровнях: корпоративном, отраслевом, муниципальном, региональном или федеральном. Он может применяться не только к коммунальным, но и к промышленным отходам.

**Выводы.** Предложенные 6 критериев, которые мы считаем основными, позволяют оценить снижение объемов отходов, влияние процесса утилизации ТКО на окружающую среду, объемы выбросов парниковых газов, энергетическую и экономическую привлекательность различных методов обращения с отходами.

Разработанный метод выбора способа утилизации ТКО заданного состава основан на комплексном учете энергетических, экологических и экономических факторов.

#### Список литературы

1. Шилкина С.В. Выбор стратегии управления твердыми коммунальными отходами для

решения проблем их утилизации // Отходы и ресурсы. – 2020. – Т. 7, № 4. – С. 1–17.

2. **Михайлова Н.В., Ясинская А.В.** Современные технологии энергетической утилизации ТКО // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 8. – С. 4–11.

3. **Современные полигоны ТКО** – отложенное на завтра решение проблемы переработки и утилизации отходов / Ю.А. Медовар, И.О. Юшманов, Е.Г. Хмельченко, М.А. Черкасова // Муниципальная академия. – 2022. – № 4. – С. 156–165.

4. **Голышева А.В., Семенцов С.П., Тиньков Н.Г.** Система обращения с ТКО: национальный проект «Экология» (Аналитический бюллетень «Актуальное в ESG-повестке»). – М., 2023. – 17 с.

5. **Ашихмина Т.В., Каверина Н.В., Куприенко П.С.** Анализ негативных экологических последствий эксплуатации полигона твердых коммунальных отходов г. Воронежа на разных этапах его жизненного цикла // Региональные геосистемы. – 2020. – Т. 44, № 3. – С. 343–358.

6. **Ашихмина Т.В., Жидова М.В.** Мониторинг пожарной опасности полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) с учетом геоэкологических и медико-экологических аспектов // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 9. – С. 21–27.

7. **Трушникова К.А.** Мировые тренды в организации услуг по утилизации твердых коммунальных отходов // Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2019. – С. 138–141.

8. **Poniatowska A., Kisiel M., Panasiuk D.** Municipal Waste Management in Poland Compared to Other European Union Countries // *Studia Ecologiae et Bioethicae*. – 2022. – Vol. 19, No. 4. – P. 85–95.

9. **Тугов А.Н.** Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор) // Теплоэнергетика. – 2021. – № 1. – С. 3–20.

10. **Овсянникова Д.К.** Зарубежный опыт обращения с отходами и возможность его применения в Российской Федерации // Муниципальная академия. – 2017. – № 3. – С. 78–82.

11. **Пиролитические** методы термической переработки твердых коммунальных отходов / В.В. Хасхачих, О.М. Ларина, Г.А. Сычев и др. // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 3. – С. 467–480.

12. **Гравдина П.Г.** Влияние развития строительства мусоросжигательных заводов в России на экологию // *E-Scio*. – 2020. – № 12(51). – С. 477–484.

13. **Саати Т.** Принятие решений: метод анализа иерархий / пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.

14. **Наполов О.Б., Гришаева Ю.М.** Рециклинг ТКО: опыт разных стран // Вестник МНЭПУ. – 2021. – № S1. – С. 271–278.

15. **Тугов А.Н.** Энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов на ТЭС. – М.: Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт», 2017. – 178 с.

16. **Мельникова Л.А.** Экономические аспекты переработки и использования твердых коммунальных отходов // Вопросы экономики и права. – 2023. – № 176. – С. 105–108.

## References

1. Shilkina, S.V. Vybor strategii upravleniya tverdymi kommunal'nymi otkhodami dlya resheniya problem ikh utilizatsii [Choosing a solid municipal waste management strategy to solve the problems of their disposal]. *Otkhody i resursy*, 2020, vol. 7, no. 4, pp. 1–17.

2. Mikhaylova, N.V., Yasinskaya, A.V. Sovremennye tekhnologii energeticheskoy utilizatsii TKO [Modern technologies of energy utilization of MSW]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2020, vol. 24, no. 8, pp. 4–11.

3. Medovar, Yu.A., Yushmanov, I.O., Khmel'chenko, E.G., Cherkasova, M.A. Sovremennye poligony TKO – otlozhennoe na zavtra reshenie problema pererabotki i utilizatsii otkhodov [Modern landfills of MSW – a solution to the problem of waste processing and disposal postponed for tomorrow]. *Munitsipal'naya akademiya*, 2022, no. 4, pp. 156–165.

4. Golysheva, A.V., Sementsov, S.P., Tin'kov, N.G. *Sistema obrashcheniya s TKO: natsional'nyy proekt «Ekologiya» (Analiticheskiy byulleten' «Aktual'noe v ESG-povestke»)* [The system of handling MSW: national project “Ecology” (Analytical bulletin “Relevant in the ESG agenda”)]. Moscow, 2023. 17 p.

5. Ashikhmina, T.V., Kaverina, N.V., Kuprienko, P.S. Analiz negativnykh ekologicheskikh posledstviy ekspluatatsii poligona tverdykh kommunal'nykh otkhodov g. Voronezh na raznykh etapakh ego zhiznennogo tsikla [Analysis of the negative environmental consequences of the operation of the Voronezh municipal solid waste landfill at different stages of its life cycle]. *Regional'nye geosistemy*, 2020, vol. 44, no. 3, pp. 343–358.

6. Ashikhmina, T.V., Zhidova, M.V. Monitoring pozharnoy opasnosti polygonov tverdykh kommunal'nykh otkhodov (TKO) s uchetom geoekologicheskikh i mediko-ekologicheskikh aspektov [Monitoring of fire danger of landfills of solid municipal waste (MSW) taking into account geoeological and medico-ecological aspects]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2022, no. 9, pp. 21–27.

7. Trushnikova, K.A. Mirovye trendy v organizatsii uslug po utilizatsii tverdykh kommunal'nykh otkhodov [World trends in the organization of solid municipal waste disposal services]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy kon-*



ferentsii «Razvitie teorii i praktiki upravleniya sotsial'nymi i ekonomicheskimi sistemami» [Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference "Development of theory and practice of management of social and economic systems"]. Novokuznetsk, 2019, pp.138–141.

8. Poniatowska, A., Kisiel, M., Panasiuk, D. Municipal Waste Management in Poland Compared to Other European Union Countries. *Studia Ecologiae et Bioethicae*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 85–95.

9. Tugov, A.N. Sovremennye tekhnologii termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov i perspektivy ikh realizatsii v Rossii (obzor) [Modern technologies of thermal processing of municipal solid waste and prospects for their implementation in Russia (review)]. *Teploenergetika*, 2021, no. 1, pp. 3–20.

10. Ovsyannikova, D.K. Zarubezhnyy opyt obrashcheniya s otkhodami i vozmozhnost' ego primeneniya v Rossiyskoy Federatsii [Foreign experience in waste management and the possibility of its application in the Russian Federation]. *Munitsipal'naya akademiya*, 2017, no. 3, pp. 78–82.

11. Khaskhachikh, V.V., Larina, O.M., Sychev, G.A., Gerasimov, G.Ya., Zaychenko, V.M. Pirolyticheskie metody termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Pyrolytic methods of thermal processing of solid municipal waste].

*Teplofizika vysokikh temperature*, 2021, vol. 59, no. 3, pp. 467–480.

12. Gravdina, P.G. Vliyanie razvitiya stroitel'stva musoroszhigatel'nykh zavodov v Rossii na ekologiyu [The impact of the development of the construction of incinerators in Russia on the environment]. *E-Scio*, 2020, no. 12(51), pp. 477–484.

13. Saati, T. *Prinyatie resheniy: Metod analiza ierararkhiy* [Decision-making: A method for analyzing hierarchies]. Moscow: Radio i svyaz', 1993. 314 p.

14. Napolov, O.B., Grishaeva, Yu.M. Retsikling TKO: opyt raznykh stran [Recycling of MSW: the experience of different countries]. *Vestnik MNEPU*, 2021, no. S1, pp. 271–278.

15. Tugov, A.N. *Energeticheskaya utilizatsiya tverdykh kommunal'nykh otkhodov na TES* [Energy utilization of solid municipal waste at thermal power plants]. Moscow: Otkrytoe aktsionerное obshchestvo «Vserossiyskiy dvazhdy ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Teplotekhnicheskiiy nauchno-issledovatel'skiy institut», 2017. 178 p.

16. Mel'nikova, L.A. Ekonomicheskie aspekty pererabotki i ispol'zovaniya tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Economic aspects of processing and use of municipal solid waste]. *Voprosy ekonomiki i prava*, 2023, no. 176, pp. 105–108.