

УДК 332.142.6

DOI: 10.17586/2310-1172-2023-16-2-150-163

Научная статья

## **Эколого-экономическое обоснование принятия решений при выборе технологий термической утилизации отходов с учетом ранжирования критериев устойчивости**

*Канд. техн. наук* **Сергиенко О.И.** oisergienko@itmo.ru

**Нечепуренко А.И.** ainechepurenko@itmo.ru

*Канд. техн. наук* **Рахманов Ю.А.** rahmanovua2010@gmail.com

*Д-р экон. наук* **Василенок В.Л.** fem1421@yandex.ru

*Университет ИТМО*

*191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*Вопросы выбора наилучших доступных технологий (НДТ) утилизации отходов сортировки и последующего их внедрения на российских мусороперерабатывающих заводах представляют интерес с точки зрения их эколого-экономического обоснования. В статье рассматривается методика определения технологии в качестве НДТ на основе аналитического иерархического процесса, базирующаяся на известном алгоритме выбора НДТ и дополненная эколого-экономическими и социальными критериями. Приводится перечень критериев и их ранжирование для принятия решений с учетом локальных условий, что позволяет более комплексно и объективно оценить возможные эффекты от внедрения технологий. Предлагаемая методика рассмотрена на примере выбора технологии термической утилизации хвостов сортировки твердых коммунальных отходов на проектируемой станции сортировки в Ленинградской области.*

*Ключевые слова:* переработка, твердые коммунальные отходы, многокритериальный метод принятия решений, метод аналитического иерархического процесса, ранжирование, критерии, наилучшая доступная технология, термическая утилизация.

Scientific article

## **Ecological and economic justification of decision-making when choosing technologies for thermal adaptation of waste, taking into account the ranking of sustainability criteria**

*Ph.D.* **Sergienko A.I.** oisergienko@itmo.ru

**Nechepurenko A.I.** ainechepurenko@itmo.ru

*Ph.D.* **Rakhmanov Yu.A.** rahmanovua2010@gmail.com

*D.Sc.* **Vasilenok V.L.** fem1421@yandex.ru

*ITMO University*

*191002, Russia, Saint Petersburg, Lomonosova str. 9*

*The issue of choosing the best available technologies (BATs) for recycling sorting waste and their subsequent implementation at Russian waste processing plants are of interest from the point of view of their ecological and economic justification. The article discusses the methodology for determining the technology as BAT based on an analytical hierarchical process, based on the well-known algorithm for selecting BAT and supplemented with ecological, economic and social criteria. The list of criteria and their ranking for decision-making taking into account local conditions is given, which allows for a more comprehensive and objective assessment of the possible effects of the introduction of technologies. The proposed method is considered by the example of the choice of technology for thermal disposal of solid municipal waste sorting remaining at the sorting site at one of the disposal sites of the Leningrad region.*

*Keywords:* recycling, municipal solid waste, multi-criteria decision-making method, analytical hierarchical process, ranking, criteria, best available technique, thermal utilization.

## Введение

Принятие решений при выборе наилучших доступных технологий (НДТ) должно базироваться на комплексном подходе, гарантирующем, что технология, во-первых, исключает перенос загрязнителей из одной среды в другую, и, во-вторых, обеспечивает экономию ресурсов, энергии и воды и имеет приемлемый период внедрения. Рассмотрение альтернативных вариантов намечаемой хозяйственной деятельности и выбор технологических решений в области обращения с твердыми коммунальными отходами должно обеспечивать высокий уровень защиты окружающей среды, исключение образования не утилизируемых вторичных отходов, ресурсо- и энергоэффективность. На проектируемых мусороперерабатывающих заводах возникает необходимость утилизации отходов сортировки с применением термических методов, что требует проведения ситуационных исследований с учетом достижения целей и принципов устойчивого развития. На территории Ленинградской области стратегический приоритет развития отрасли обращения с отходами направлен на увеличение доли отбора полезных фракций для их последующего вовлечения во вторичный хозяйственный оборот. Территориальная схема обращения с отходами Ленинградской области включает разработку комплекса мер для поэтапного отказа от практики размещения на полигонах отходов, не прошедших производственный цикл предварительной обработки и сортировки и извлечения вторичных материальных ресурсов. Приоритетами государственной политики Ленинградской области является создание устойчивой системы обращения с ТКО, обеспечивающей сортировку отходов в объеме 100%, увеличение доли отбора полезных фракций из общей массы отходов [1].

Согласно ФЗ №7 «Об охране окружающей среды» (в ред. от 14.07.2022) наилучшая доступная технология (НДТ) - технология производства продукции (товаров), выполнения работ, оказания услуг, определяемая на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды при условии наличия технической возможности ее применения [2]. Технологии, относимые к НДТ, перечислены в специализированных информационно-технических справочниках (ИТС), которые являются документами национальной системы стандартизации, утверждаются Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) и включают описание технологий, процессов, методов, оборудования и другие данные о технологиях.

Согласно порядку определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, НДТ должны соответствовать следующим критериям [3]:

- 1) наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду в расчете на единицу времени или объем производимой продукции (товара), выполняемой работы, оказываемой услуги;
- 2) экономическая эффективность внедрения и эксплуатации технологии;
- 3) применение методов ресурсо- и энергосбережения;
- 4) период внедрения не более 10 лет;
- 5) технология должна быть внедрена в промышленную эксплуатацию как минимум на двух объектах в Российской Федерации, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

Если имеется менее двух случаев применения технологии в Российской Федерации, рекомендуется рассмотреть зарубежные случаи, которые демонстрируют ее промышленное использование.

Методические рекомендации по определению технологии в качестве НДТ предусматривают следующие этапы [4]:

1. Выбор экологической задачи, которую необходимо решить путем внедрения НДТ, и маркерные показатели, отражающие экологическую и ресурсоэффективность технологии. Выбор технологий, направленных на решение выбранных экологических задач.

2. Проведение сравнительного анализа выбранных технологий в области воздействия на окружающую среду и потребления ресурсов. Оценивание затрат на внедрение, выгод после внедрения, периода внедрения, при наличии информации.

3. Выбор технологии на основе проведенного анализа, принимая во внимание, что технология предотвращает или уменьшает негативное воздействие на окружающую среду или потребление ресурсов, внедрение технологии не приведет к увеличению негативного воздействия на окружающую среду, внедрение технологии экономически целесообразно и период внедрения приемлем.

В России разработаны следующие ИТС НДТ в области обращения с отходами [5]:

1. ИТС НДТ 9-2022 Утилизация и обезвреживание отходов термическими методами;
2. ИТС НДТ 15-2022 Утилизация и обезвреживание отходов (за исключением термических методов);
3. ИТС НДТ 17-2021 Размещение отходов производства и потребления
4. ИТС НДТ 52-2022 Обращение с отходами I и II классов опасности.

Известные в настоящее время термические методы утилизации и обезвреживания отходов, содержащих органические вещества, включают сжигание отходов, пиролиз, газификацию, использование плазменных

источников энергии или их комбинацию. Внедрение перечисленных методов может быть обосновано возможностью получения вторичных ресурсов и рекуперации энергии при утилизации отходов.

Существующая процедура определения НДТ и методические рекомендации достаточно ясны и лаконичны, но не охватывают следующие существенные вопросы:

1. Вопросы импортозамещения и доступности технологий на рынке. Технологическая доступность подразумевает наличие необходимого промышленного оборудования на российском рынке, предпочтение отдается установкам российского производства. В нынешней политической ситуации импортозамещение становится все более актуальным с точки зрения технологического суверенитета.

2. Социальные аспекты. Общественное мнение в отношении технологии, ее социальная приемлемость значительно влияет на отношение общества, живущего в том же районе, на который могут влиять и внедряемые технологии. Вопрос социальной приемлемости имеет большое значение в сфере утилизации отходов, поскольку на этапе ОВОС при проведении общественных слушаний могут возникать протесты жителей в отношении строительства новых мусоросортировочных или мусоросжигательных заводов.

3. Создание рабочих мест. Создание рабочих мест способствует росту благосостояния общества.

4. Потребность в квалифицированном персонале также следует рассматривать как часть социальных и технологических критериев, поскольку нехватка квалифицированного персонала может привести к простоям и финансовым потерям.

Кроме того, в основном сравнение альтернатив проводится по экологическим и экономическим результатам. Однако, если технология А лучше по одному из критериев, но проигрывает технологии Б по другому критерию, то в данном случае не ясно, как следует выбирать между альтернативами. Методические рекомендации по определению технологии в качестве НДТ учитывают экологические, экономические и технологические показатели, но требования не являются однозначными, они должны выбираться и ранжироваться с учетом социальных факторов, местных условий и не должны становиться тяжелым бременем для предприятия. Выходом из данной ситуации может стать создание комплексной методики, охватывающей, дополнительно к Методическим рекомендациям по определению технологии в качестве НДТ [4], вопросы импортозамещения и доступности технологий, социальные критерии, а также обеспечивающей четкий алгоритм ранжирования альтернатив.

### **Краткий обзор аналитических подходов и методов, применяемых при выборе технологий переработки ТКО на основе зарубежного опыта**

В качестве аналитических подходов, используемых для принятия решений в области управления отходами используют методы оценки жизненного цикла, метод анализа охвата данных и методы многокритериального принятия решений.

**Оценка жизненного цикла (ОЖЦ)** является одним из наиболее распространенных методов оценки воздействия на окружающую среду. ОЖЦ оценивает воздействие на окружающую среду, связанное со всеми этапами жизненного цикла коммерческого продукта, процесса или услуги. Исследование ОЖЦ включает в себя инвентаризацию энергии и материалов, которые требуются по всей производственной цепочке создания стоимости продукта, процесса или услуги, и расчет соответствующих воздействий на окружающую среду. ОЖЦ оценивает совокупное потенциальное воздействие на окружающую среду и может быть использована для принятия решений о выборе метода обращения с отходами [6].

В большинстве публикаций, где ОЖЦ применяется в контексте обращения с отходами, оцениваются следующие вопросы: (1) анализ экологических показателей выбранных технологий обработки отходов; (2) сравнение различных альтернатив обработки отходов; (3) оценка местных различий для минимизации воздействия на окружающую среду. Из-за различных региональных условий, недостаточной информации об источниках данных метод ОЖЦ может давать разные результаты для конкретной технологии переработки отходов в разных регионах [7]. Для выполнения моделирования ОЖЦ используются различные программы и базы данных. Наиболее известными являются SimaPro, GaBi Software, openLCA, Umberto и база данных Ecoinvent. Программное обеспечение позволяет построить модель, учитывающую потоки ресурсов и энергии для оценки воздействия на окружающую среду. Недостатками программного обеспечения ОЖЦ являются высокая стоимость лицензий (около 5700 евро за одну пользовательскую лицензию SimaPro Expert сроком на 12 месяцев) и довольно сложный пользовательский интерфейс, что делает возможным использование этого программного обеспечения только экспертами. Использование различных методов расчета и баз данных также может давать разные результаты. Более того, ОЖЦ учитывает только экологические, ресурсные и энергетические критерии, оставляя без внимания экономические и социальные вопросы.

Расчет или оценка стоимости или затрат в жизненном цикле (ЗЖЦ) включает капитальные затраты, затраты на ремонт и техническое обслуживание, эксплуатационные расходы и остаточную стоимость актива в конце срока его службы [8]. ЗЖЦ может использоваться в экологическом контексте для учета внутренних и внешних затрат,

связанных с процессом или продуктом в течение его жизненного цикла. Внутренние затраты рассчитываются как затраты, понесенные непосредственно (капитальные, трудовые, энергетические затраты), а внешние затраты — это косвенными затраты (истощение ресурсов, загрязнение воды). Оценка социального жизненного цикла (СЖЦ) является наименее развитой. Она применяется для оценки потенциальных положительных и отрицательных социальных воздействий продуктов от добычи сырья до окончательной утилизации в соответствии с Руководящими принципами UNEP/SETAC (2009) по оценке социального жизненного цикла. Данный метод оценивает социально-экономические последствия производства и потребления продукта для работников, местных сообществ, потребителей, общества и всех участников цепочки создания стоимости [9].

Таким образом, ОЖЦ может использоваться для оценки воздействия на окружающую среду, ЗЖЦ — на оценку затрат, связанных с проектом, и СЖЦ — на социальные последствия проекта. Ни один из этих методов не позволяет одновременно оценивать экономические, технические, экологические и социальные факторы.

**Анализ охвата данных (Data Envelope Analysis, DEA)** — это метод сравнительного непараметрического линейного программирования, позволяющий сравнить эффективность и результативность нескольких вариантов принятых решений по соотношению между входными данными (доступными ресурсами) и выходными данными (полученными результатами). Эффективность определяется по шкале от 0 до 1 (от 0 до 100%). Метод DEA основан на классической модели Constant Returns to Scale (CCR Model), разработанной Чарнсом в 1978 году [10].

Метод DEA выполняется в три этапа с применением специального программного обеспечения:

- 1) определение и выбор вариантов (единиц) принятия решения (DMU);
- 2) сбор входных и выходных данных;
- 3) выполнение расчета.

**Многокритериальные методы принятия решений (Multi Criteria Decision Making Analysis, MCDA)** базируются на наборе различных методов, позволяющих оценивать и анализировать альтернативные варианты по множеству критериев для получения оптимальных результатов. В настоящее время MCDA обычно используются в случае сложных сценариев с различными показателями, противоречивыми целями и критериями, в том числе и для принятия решений в области устойчивого развития. Обзор литературы за период с 2008 по 2018 гг. показывает, что за это время в базе данных Web of Science Core Collection было опубликовано 4712 статей, основанных на MCDA. Из них 795 статей посвящены устойчивому обращению с отходами, вопросам охраны окружающей среды, применению возобновляемых источников энергии, повышению энергоэффективности и проведению урбанистических исследований [11]. Статьи по применению MCDA часто публикуются в высокорейтинговых журналах, таких как Journal «Sustainability» (Q2 Environmental Sciences) [12] и «The Journal of Cleaner Production» (Q1) [13].

В научных публикациях, посвященных применению MCDA-методов, наиболее часто используются расчетные методы The Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS), Analytic hierarchy process (AHP), The Best Worst Method (BWM). При этом каждая из методик постоянно обновляется авторами и существует в различных модификациях. Метод аналитического иерархического процесса AHP — это эффективный метод ранжирования множества альтернатив, когда в процессе принятия решения присутствует несколько критериев и подкритериев. Метод был разработан Томасом Л. Саати в 1970-х годах, постоянно совершенствовался и до настоящего времени широко используется для оценки альтернатив. Традиционная шкала от 1 до 9, используемая в современных статьях по AHP, была предложена Саати и Тран в 2007 году [14].

В методе AHP используется иерархическая структура, на каждом уровне которой проводят попарные сравнения для расчета веса критериев. Для преобразования ранжирования в веса может использоваться специальное программное обеспечение, или расчеты могут быть выполнены вручную.

Этапы применения метода AHP:

1. Выделение иерархической структуры, определение уровней и основных элементов;
2. Выбор критериев для оценивания в рамках каждого элемента;
3. Попарное сравнение каждого элемента уровня 1, для определения веса элементов уровня 1;
4. Попарное сравнение каждого элемента уровня 2 в рамках подуровня данного элемента, чтобы определить веса элементов уровня 2;
5. Вычисление глобальных весов критериев в иерархической структуре на основе весов, определенных на уровнях 1 и 2;
6. Определение списка альтернатив;
7. Попарное сравнение альтернатив для каждого критерия, для определения весовых коэффициентов каждого критерия для каждой альтернативы;
8. Суммирование определенных на шаге 7 весов для каждой альтернативы. Расчёт процентного соотношения для каждого варианта. Самый высокий процент свидетельствует о максимальном предпочтении.

Метод наилучшего-наихудшего сравнения (Best-Worse Method, BWM) представляет собой вариант MCDA, предложенный Джафар Резаи в 2015 году [15]. В отличие от попарного сравнения всех критериев в методе AHP, метод BWM использует попарное сравнение всех критериев с наилучшими и наихудшими критериями. BWM

обладает преимуществами перед АНР, т.к. требует меньшего количества сравнительных расчетов и обеспечивает высокую надежность результатов. Недостатками ВММ является необходимость в программном обеспечении, поскольку для определения наиболее точных подходящих весовых коэффициентов критериев необходимо рассмотреть более 10000 вариантов.

Методика предпочтения порядка по аналогии с идеальным решением TOPSIS, разработанная Янг-Чжоу Лай и Чинг-Лай Хван в 1994 году, является еще одним распространенным вариантом выполнения MCDA, который измеряет относительную предпочтительность каждой альтернативы [16]. Метод используется для уменьшения k-мерного пространства до двумерного пространства с помощью процедуры компромисса первого порядка.

TOPSIS в основном используется для ранжирования набора альтернатив после определения весовых коэффициентов критериев принятия решения с помощью АНР или ВММ. Метод TOPSIS обеспечивает точные результаты, но для выполнения вычислений требуется программное обеспечение.

В рамках MCDA могут быть использованы различные современные технологии для оценки альтернатив. Например, для взвешивания критериев АНР могут применяться нечеткие числа (fuzzy number) [17]. Географическая информационная система (ГИС) может использоваться для оценки критериев, связанных с территорией [18]. Машинное обучение и нейронные сети могут стать незаменимыми для прогнозирования недостающих показателей или недостающих данных [19]. Применение метода АНР анализируется в ряде международных кейсов по выбору технологий обращения с отходами (табл. 1). Важно подчеркнуть, что в каждой статье определяются критерии и альтернативы в соответствии с местной спецификой, с акцентом на те критерии, которые имеют особое значение для конкретной области в данный момент времени. Тем не менее, в большинстве статей критерии разделены на экономические, экологические, социальные и технологические группы.

Таблица 1

### Обзор статей, использующих метод АНР с целью выбора технологии обращения с ТКО

Статья	Страна	Использованные методы	Выбранная технология
Kharat M. G. et al. The application of Delphi and AHP method in environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection //Management of Environmental Quality: An International Journal. – 2016. [20]	Индия	Delphi АНР модель	Компостирование
Gaur A. et al. Evaluation of municipal solid waste management scenarios using multi-criteria decision making under fuzzy environment //Process Integration and Optimization for Sustainability. – 2022. – Т. 6. – №. 2. – С. 307-321.[21]	Индия	Fuzzy AHP Fuzzy TOPSIS Сценарный подход	40% получение биометанола + 60% захоронение на полигоне
Samah M. A. A., Manaf L. A., Zuki N. I. M. Application of AHP model for evaluation of solid waste treatment technology //International Journal of Engineering Techsci. – 2010. – Т. 1. – №. 1. – С. 35-40. [22]	Малайзия	АНР модель	Сортировка и компостирование
Bafail O. A., Abdulaal R. M. S. A Combined BWM-TOPSIS Approach Versus AHP-TOPSIS Approach: An Application to Solid Waste Management //2022 The 3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. – 2022. – С. 27-33. [23]	Саудовская Аравия	BWM-TOPSIS АНР-TOPSIS	Сортировка
Hoang N. H., Fogarassy C. Sustainability evaluation of municipal solid waste management system for Hanoi (Vietnam)—Why to choose the ‘Waste-to-Energy’ concept //Sustainability. – 2020. – Т. 12. – №. 3. – С. 1085. [24]	Вьетнам (Ханой)	АНР модель (программное обеспечение Super Decisions software)	Компостирование (органическая фракция), сжигание (остаточная фракция)
Le P. G. et al. Development of Sustainability Assessment Criteria in Selection of Municipal Solid Waste Treatment Technology in Developing Countries: A Case of Ho Chi Minh City, Vietnam //Sustainability. – 2023. – Т. 15. – №. 10. – С. 7917. [25]	Вьетнам (Хошимин)	АНР модель	Сжигание с рекуперацией энергии
Sun N., Chungpaibulpatana S., Limmeechokchai B. Implementation of analytic hierarchy process for sustainable municipal solid waste management: a case study of Bangkok //Int. Energy J. – 2020. – Т. 20. – С. 325-336. [26]	Таиланд (Бангкок)	АНР модель Сценарный подход	Сценарий 1: Компостирование и газификация Сценарий 2: Анаэробное сбраживание + газификация

В связи с оценкой местных потребностей и возможностей использования технологий, в разных регионах или городах страны происхождения выбираются различные технологии переработки отходов. В качестве тенденции можно отметить, что в большинстве публикаций рассматриваются ситуации в азиатских странах, где наблюдается быстрый рост населения и урбанизация, что и приводит к увеличению количества ТКО и проблемам их утилизации. В этих странах все еще отсутствуют внедренные устойчивые системы управления отходами.

В настоящей статье авторами предлагается использовать метод АНР с ранжированием критериев устойчивости.

### **Выбор и ранжирование критериев устойчивости на основе метода АНР**

Для оценки альтернативных технологий переработки отходов методами термической утилизации используется метод АНР с двухуровневой иерархией принятия решений. Первый уровень включает четыре группы критериев, влияющих на принятие решений: экономические, технологические, экологические и социальные. Второй уровень определяется разбиением каждой группы на критерии.

В табл. 2 приводится состав критериев каждой группы. Ранжирование технологий по каждому из критериев производится по шкале от 1 до 9. При отсутствии разницы между технологиями по конкретному показателю технология приравнивается к 1; если технология значительно превосходит альтернативу, то наилучшая технология оценивается как 9.

В группе экономических критериев определены три критерия: инвестиционные, эксплуатационные расходы и возможности рекуперации вторичных ресурсов. Чем ниже инвестиционные и эксплуатационные расходы для внедрения технологии, тем выше она оценивается. Чем больше процент извлекаемых вторичных ресурсов от общей массы отходов, тем выше оценивается технология. Вторичные ресурсы должны использоваться компанией в ее внутренних процессах, избегая покупки ресурсов на рынке, что подразумевает экономию для компании. Второй вариант заключается в продаже вторичных ресурсов по рыночной цене, что подразумевает получение прибыли для компании.

В группе технологических критериев оцениваются доступность технологий и энергоэффективность. Чем больше производителей и поставщиков представлено на рынке, тем более доступной считается технология. Энергоэффективность оценивается на основе объема рекуперации энергии в ходе технологических процессов, например, определяется количество вырабатываемой тепловой и электрической энергии или топлива (например, биогаза, мазута и т.д.) в расчете на 1 т отходов. Чем больше восстановлено энергии из отходов – тем более высокий балл получает технология.

С точки зрения экологической группы критериев оценивается сокращение отходов, сбросов и выбросов. Сокращение отходов подразумевает оценку количества остающихся отходов, подлежащих захоронению после процесса переработки, в расчете на одну тонну отходов. Чем меньше остается отходов – тем более высокую оценку получает технология. Критерии также учитывают выбросы в атмосферу и сбросы воду в результате использования технологии. Чем меньше количество и меньше вредных выбросов и сбросов, тем более высокую оценку получает технология. Класс опасности получаемых отходов должен быть меньше, чем изначальный класс опасности отходов.

Группа социальных критериев включает оценку общественного принятия предлагаемой технологии и потребности в квалифицированном персонале. С точки зрения общественного мнения, оценивается, насколько общество протестует против внедрения предлагаемой технологии. Более приемлемая технология получает более высокий балл. Что касается критерия потребности в квалифицированном персонале, оценивается потребность в найме новых сотрудников, обладающих необходимыми навыками для использования конкретных установок. Набор дополнительного персонала приводит к увеличению эксплуатационных расходов, но оказывает положительное влияние на создание рабочих мест. Тем не менее, чем меньше потребность в новых сотрудниках, тем лучше, поскольку нехватка квалифицированного персонала может привести к простоям и финансовым потерям.

Таблица 2

**Критерии устойчивого обращения с ТКО, используемые для оценки альтернативных технологий термической утилизации отходов**

Критерий	Описание критерия
<b>Экономические критерии</b>	
C1 Инвестиционные затраты	Общая стоимость оборудования, включая доставку, монтаж и пуско-наладку установки
C2 Эксплуатационные расходы	Расходы, связанные с эксплуатацией, техническим обслуживанием, потреблением энергии и воды, оплатой труда
C3 Получение вторичных ресурсов	Затраты на получение вторичных ресурсов в процессе термической утилизации, которые могут быть проданы на рынке или использованы компанией на собственные нужды
<b>Технологические критерии</b>	
C4 Технологическая доступность	Доступность установок для термической утилизации отходов на локальном рынке, с учетом существующих ограничений и санкций, а также наличие установок, производимых национальными компаниями
C5 Энергоэффективность	Коэффициент рекуперации энергии в технологиях утилизации отходов, которая может быть использована для выработки электроэнергии или тепла
<b>Экологические критерии</b>	
C6 Эффективность сокращения отходов	Уменьшение объема вторичных отходов, оставшихся после переработки по сравнению с объемом утилизируемых отходов
C7 Выбросы	Выбросы и сбросы, образующиеся в технологическом процессе утилизации отходов в результате применения технологии утилизации
<b>Социальные критерии</b>	
C8 Общественное мнение	Учитывает общественное мнение о технологиях утилизации отходов с учетом социальных обстоятельств
C9 Потребность в квалифицированном персонале	Необходимость и количество квалифицированного персонала для эксплуатации установки по переработке отходов

Набор критериев для оценки альтернативных технологий и их содержание определяется группой экспертов не менее 3 человек. Ранжирование групп критериев и отдельных критериев внутри каждой из групп проводится в зависимости от сценария или контекста:

**Сценарий 1** – «бизнес в обычном режиме» фокусируется на существующей ситуации в обращении с ТКО в России. Преобладающее значение, влияющее на выбор технологии, имеют экономические (до 50% веса) и технологические факторы (35% веса). Экологические факторы важны с точки зрения не нарушения действующего природоохранного законодательства, для исключения штрафных санкций (10% веса). Социальные факторы составляют оставшиеся 5% от общего веса.

**Сценарий 2** – «тренд на устойчивое развитие» предполагает постепенное развитие внешних условий для обращения с ТКО, принимая во внимание глобальную тенденцию к устойчивому развитию. В этом контексте компании получают финансовую поддержку от государства в виде субсидий и налоговых льгот при внедрении НДТ, поэтому важность экономических критериев снижается до 38%. Что касается технологических критериев, отрасль применяет установки отечественного производства, весомость критериев несколько снижается - до 33%. Экологические и социальные показатели становятся более важными в связи с растущей экологической ответственностью и осведомленностью, развитием гражданского общества. Компании должны заботиться не только о том, чтобы не нарушать природоохранное законодательство, но и о повышении показателей устойчивости, чтобы быть конкурентоспособными на рынке. Взвешивание экологических и социальных показателей увеличивается до 15% от каждого. Законодательство об обращении с отходами становится более строгим, например, вводятся в действие ограничения на захоронение определенных фракций ТКО, таких как пластик, стекло, металл, бумага. Несмотря на то, что роль экономических и технологических критериев остается высокой,

они больше не являются исключительно преобладающими. Важность экологических и социальных критериев растет и может стать еще более важной на долгосрочную перспективу.

Для каждой технологии критерии попарно сравниваются в рамках каждого аспекта. В каждом сравнении выбирается лучший вариант и интенсивность в диапазоне от 1 (равный) до 9 (сильно отличающийся). На основе Сценария 1 и Сценария 2 разработаны две модели взвешивания. Для расчета весовых коэффициентов для набора критериев на основе попарных сравнений используется онлайн-программное обеспечение АНР-OS [27].

### **Применение метода MCDA с ранжированием критериев устойчивости технологий**

Рассмотрим применение метода MCDA для объекта исследования в Ленинградской области – проектируемой станции сортировки твердых коммунальных отходов (ТКО) в 50-70 км от Санкт-Петербурга. Сортировочная станция располагает необходимым оборудованием для линии сортировки отходов, включая роторный сепаратор, механический сепаратор, магнитный сепаратор, перфоратор для ПЭТ, разрыватель упаковки и сортировочную платформу [28]. На станции ежегодно сортируется 94 000 т ТКО, извлекается 66 000 т вторичных ресурсов и образуется 28 000 т «хвостов», т.е. вторичных отходов, которые не подлежат переработке. Вместо захоронения на полигоне эти отходы можно перерабатывать с использованием технологии термохимической утилизации для рекуперации энергии и создания ценных ресурсов.

В качестве альтернативных технологий рассмотрим захоронение на полигоне (A1) и следующие существующие и доступные на рынке технологии термической утилизации отходов: инсинерация (сжигание) (A2), пиролиз (A3) и газификация (A4).

Под технологией захоронения отходов на полигоне предлагается рассмотреть санитарный полигон ТКО, соответствующий всем требованиям законодательства по проектированию, эксплуатации и рекультивации, в соответствии с Федеральным законом 89 [29], Сводом правил (СП) 320.1325800.2017 [30], Санитарными правилами 2.1.7.722-98 [31]. На полигоне установлена система сбора и очистки свалочного газа, который используется в качестве источника электрической энергии. После заполнения емкости полигона и истечения срока службы, планируется рекультивация в соответствии с ИТС 53-2022 «Ликвидация объектов накопленного экологического ущерба» [32]. Технология захоронения отходов рассматривается как альтернативная, поскольку это самая распространенная технология обращения с отходами в России.

Технология сжигания предполагает приобретение и обслуживание установки инсинератора в соответствии с ТРГ 9 – 2022 «Утилизация и обезвреживание отходов термическими методами» [33]. Зола, образующаяся в результате сжигания, захоранивается на санитарном полигоне.

Технология пиролиза предполагает приобретение и обслуживание установки также в соответствии с [25]. Вторичные ресурсы, полученные в результате этого процесса, используются компанией по утилизации отходов на собственные нужды (энергия, техническая вода) и продаются на рынке (печное топливо). Зола, образующаяся в результате пиролиза, захоранивается на санитарном полигоне.

Технология газификации предполагает приобретение и обслуживание установки по газификации твердых отходов также в соответствии с [25]. Вторичные ресурсы, полученные в результате этого процесса, используются компанией по утилизации отходов на собственные нужды (энергия) и продаются на рынке (синтез-газ). Зола, образующаяся в результате сжигания, захоранивается на санитарном полигоне.

### **Результаты применения метода MCDA с ранжированием критериев устойчивости**

Для Сценария 1 – «бизнес как обычно» попарное сравнение аспектов выявило следующие весовые коэффициенты: 48,5% экономических показателей (ранг 1), 34,3% технологических показателей (ранг 2), 10,8% экологических показателей (ранг 3) и 6,3% социальных показателей (ранг 4).

Далее было проведено попарное сравнение критериев в рамках каждого аспекта. Веса каждого аспекта (уровень 1), критерии внутри аспекта (уровень 2) и глобальный вес представлены в таблице 3.

Глобальный приоритет инвестиционных затрат (34,9%) и доступности технологий (28,6%) являются критериями 1-го ранга. Вторичное извлечение ресурсов (10,6%) и эффективность в сокращении отходов (9,6%) являются критериями 2-го ранга. Энергоэффективность (5,7%) и общественное мнение (5,0%) являются критериями 3-го ранга. Остальные критерии, такие как эксплуатационные расходы (3,2%), потребность в квалифицированном персонале (1,3%) и выбросы (1,2%), относятся к критерию 4-го ранга.

После определения весовых коэффициентов критериев было проведено попарное сравнение технологий по каждому критерию. Вес технологии по каждому критерию и глобальный вес критерия умножаются и суммируются после оценки всех критериев (табл. 3).

Таблица 3

**Иерархия критериев и альтернативные технологии для Сценария 1**

Уровень 1	Уровень 2	Глобальный вес критерия, %	A1 Захоронение на полигоне	A2 Сжигание	A3 Пиролиз	A4 Газификация
Экономические критерии 0,486	C1 Инвестиционные затраты 0,717	34,9	0,704	0,192	0,052	0,052
	C2 Эксплуатационные расходы 0,066	3,2	0,690	0,195	0,068	0,047
	C3 Получение вторичных ресурсов 0,217	10,6	0,036	0,078	0,516	0,369
Технологические критерии 0,343	C4 Технологическая доступность 0,833	28,6	0,678	0,196	0,077	0,049
	C5 Энерго-эффективность 0,167	5,7	0,033	0,162	0,488	0,317
Экологические критерии 0,108	C6 Эффективность сокращения отходов 0,889	9,6	0,033	0,515	0,264	0,188
	C7 Выбросы 0,111	1,2	0,035	0,117	0,495	0,353
Социальные критерии 0,063	C8 Общественное мнение 0,8	5,0	0,040	0,085	0,512	0,362
	C9 Потребность в квалифицированном персонале 0,2	1,3	0,606	0,234	0,080	0,080
			0,48	0,205	0,183	0,132

Ведущей технологией для Сценария 1 является захоронение отходов на полигоне (48%). Это означает, что в ситуации «бизнес как обычно» захоронение отходов считается наиболее подходящей технологией. Этот результат связан с высоким весом инвестиционных затрат, которые равны нулю в случае существующего полигона или очень малы в случае полигона, где не установлена система сбора свалочного газа. Результат соответствует действительности, поскольку преобладающей технологией обращения с отходами в России в настоящее время является захоронение на полигонах.

Аналогичные расчеты были выполнены для Сценария 2 «тренд на устойчивое развитие». Парное сравнение групп критериев определило следующие весовые коэффициенты: 38,8% экономических показателей (ранг 1), 33,0% технологических показателей (ранг 2), 14,1% экологических показателей (ранг 3) и 14,1%

социальных показателей (ранг 3). Как видно, экономические показатели по-прежнему занимают первое место, но их вес стал на 9,8% ниже. Технологические показатели (второе место) незначительно снизились, на 1,3%. Экологические показатели (третье место) увеличились на 3,3%. Социальные показатели в этом сценарии имеют такое же значение, как и экологические (ранг 3), со значительным превышением на 7,8%. Наиболее важными критериями остаются инвестиционные затраты (22,7%) и доступность технологий (26,4%), но вес экологических и социальных критериев возрос (табл. 4).

Таблица 4

**Иерархия критериев и альтернативные технологии для Сценария 2**

Уровень 1	Уровень 2	Глобальный вес критерия, %	A1 Захоронение на полигоне	A2 Сжигание	A3 Пиролиз	A4 Газификация
Экономические критерии 0,388	C1 Инвестиционные затраты 0,584	22,7	0,137	0,465	0,199	0,199
	C2 Эксплуатационные расходы 0,184	7,1	0,144	0,388	0,249	0,249
	C3 Получение вторичных ресурсов 0,232	9,0	0,041	0,088	0,569	0,302
Технологические критерии 0,330	C4 Технологическая доступность 0,800	26,4	0,083	0,402	0,301	0,214
	C5 Энергоэффективность 0,200	6,6	0,037	0,144	0,496	0,323
Экологические критерии 0,141	C6 Эффективность сокращения отходов 0,667	9,4	0,039	0,129	0,500	0,334
	C7 Выбросы 0,333	4,7	0,067	0,113	0,486	0,334
Социальные критерии 0,141	C8 Общественное мнение 0,875	12,3	0,049	0,081	0,435	0,435
	C9 Потребность в квалифицированном персонале 0,125	1,8	0,102	0,505	0,265	0,128
			0,082	0,293	0,355	0,271

Как и для Сценария 1, было проведено попарное сравнение технологий по каждому критерию в Сценарии 2 (рис. 1). Наилучшей технологией для Сценария 2 является пиролиз (35,5 %). Это можно объяснить тем, что в Сценарии 2 инвестиционные затраты на захоронение отходов включают создание санитарного полигона с системой сбора и утилизации свалочного газа, что делает этот вариант дорогостоящим. Технология пиролиза получила высокие оценки по критериям рекуперации вторичных ресурсов, энергоэффективности, эффективности сокращения отходов, меньшему количеству выбросов, и позитивному общественному мнению.

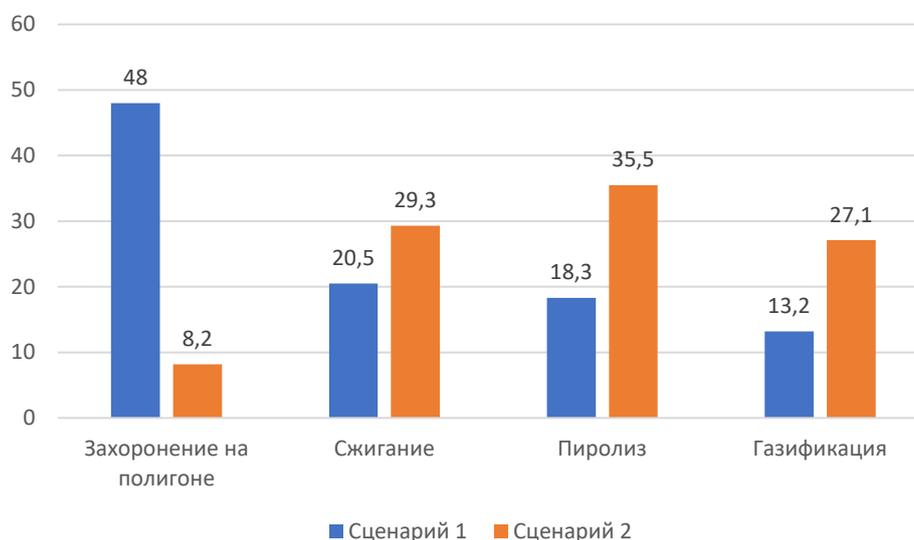


Рис. 1. Предпочтительность технологий утилизации отходов для Сценариев 1 и 2, %

Результаты сравнения предпочтительности технологий утилизации отходов для Сценариев 1 и 2 показывают значительное предпочтение полигонного захоронения в Сценарии 1.

В Сценарии 2 сжигание, пиролиз и газификация являются более предпочтительными технологиями, чем данные технологии в Сценарии 1. По итогу оценки наилучшей технологией в Сценарии 2 является пиролиз. Дальнейшее изменение сценариев в сторону устойчивости с увеличением значимости экологических и социальных критериев может привести к выбору другой технологии.

### Заключение

В настоящее время в Ленинградской области сформирована Единая концепция обращения с ТКО, в которой большое внимание уделяется созданию инфраструктуры по сортировке отходов. Выделение ценных фракций на мусоросортировочных комплексах позволяет вовлекать ресурсы во вторичное использование, за счет чего достигается устойчивость и циркулярность экономики. Однако, сортировка ресурсов влечет за собой появление «хвостов» сортировки, извлечение полезных фракций из которых невозможно. С целью достижения максимальной устойчивости, авторы данной статьи предлагают методику выбора наиболее эффективной НДТ для переработки «хвостов» из отходов.

Существующий порядок и методические рекомендации определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии не рассматривают вопрос ранжирования альтернатив, а также ряд важных критериев, таких как социальные критерии и технологический суверенитет.

В работе рассмотрены аналитические подходы и методы, применяемые при выборе технологий переработки ТКО на основе зарубежного опыта, такие как оценка жизненного цикла (ОЖЦ, LCA), Анализ охвата данных (DEA) и многокритериальные методы принятия решений (MCDA-методы).

В рассмотренном ситуационном исследовании с проектируемой станцией сортировки ТКО в Ленинградской области на основе метода аналитического иерархического процесса с попарным сравнением АНР проведена оценка альтернативных технологий для обращения с хвостами сортировки ТКО. По 9 критериям, разделенным на группы экономических, технологических, экологических и социальных критериев рассмотрены Сценарий 1 – «бизнес в обычном режиме» и Сценарий 2 – «тренд на устойчивое развитие». В случае Сценария 1 предпочтительной технологией обращения с хвостами сортировки ТКО является их захоронение, что соответствует текущей действительности. В случае Сценария 2 наилучшей технологией является пиролиз.

Изучение зарубежного опыта применения MCDA-методов показывает, что метод АНР достаточно часто применяется для обоснования выбора технологий обращения с отходами в азиатских странах, что объясняется быстрым ростом населения, урбанизацией и, как следствие, весьма острой проблемой утилизации ТКО. В настоящее время устойчивые системы управления отходами в данных странах не внедрены, но рассматриваются как потенциально эффективные. Таким образом, можно сделать вывод, что в условиях формирования единой концепции обращения с отходами на основе принципов устойчивого развития в Российской Федерации и, в частности, в Ленинградской области использование метода АНР с ранжированием критериев устойчивости для выбора технологий термической утилизации отходов представляется обоснованным.

Предлагаемый метод аналитического иерархического процесса с ранжированием критериев устойчивости может быть рекомендован для принятия решений о намечаемой хозяйственной деятельности, модернизации действующих и создании новых предприятий по переработке и утилизации твердых коммунальных отходов.

### Литература

1. Единая концепция обращения с ТКО на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://spb-neo.ru/dokumentatsiya/edinaya-kontseptsiya-obrashcheniya-s-tko/>
2. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 14.07.2022) "Об охране окружающей среды" [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/bb9e97fad9d14ac66df4b6e67c453d1be3b77b4c/#dst178](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/bb9e97fad9d14ac66df4b6e67c453d1be3b77b4c/#dst178)
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 23 декабря 2014 года N 1458 «О порядке определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям» [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://docs.cntd.ru/document/420242688>
4. Приказ Министерства Промышленности и Торговли Российской Федерации от 23 августа 2019 года N 3134 «Об утверждении методических рекомендаций по определению технологии в качестве наилучшей доступной технологии» [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://docs.cntd.ru/document/561106991>
5. Перечень информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://burondt.ru/itc>
6. UN Environment, the Life Cycle Initiative [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/life-cycle-initiative>
7. Zhang J. et al. Sustainable municipal waste management strategies through life cycle assessment method: A review // Journal of Environmental Management. 2021. Т. 287. С. 112238.
8. Kalbar P. P., Das D. Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making. – 2020.
9. UNEP/SETAC (2009) Guidelines for social life cycle assessment [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://www.unep.org/resources/report/guidelines-social-life-cycle-assessment-products>
10. Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision-making units // European journal of operational research. 1978. Т. 2. №. 6. С. 429-444.
11. Stojčić M. et al. Application of MCDM methods in sustainability engineering: A literature review 2008–2018 // Symmetry. 2019. Т. 11. №. 3. С. 350.
12. MDPI. Sustainability. [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>
13. ScienceDirect. Journal of Cleaner Production. [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-cleaner-production/about/insights>
14. Saaty T.L., Tran L.T. On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process // Mathematical and Computer Modelling. 2007. Т. 46. №. 7-8. С. 962-975.
15. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method // Omega. 2015. Т. 53. С. 49-57.
16. Lai Y., Liu T.Y., Hwang C.L. Topsis for MODM // European journal of operational research. 1994. Т. 76. №. 3. С. 486-500.
17. Coffey L., Claudio D. In defense of group fuzzy AHP: A comparison of group fuzzy AHP and group AHP with confidence intervals // Expert Systems with Applications. 2021. Т. 178. С. 114970.
18. Tashayo B. et al. Combined fuzzy AHP–GIS for agricultural land suitability modeling for a watershed in southern Iran // Environmental Management. 2020. Т. 66. С. 364-376.
19. Xi H. et al. Evaluating the capability of municipal solid waste separation in China based on AHP-EWM and BP neural network // Waste Management. 2022. Т. 139. С. 208-216.
20. Kharat M.G. et al. The application of Delphi and AHP method in environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection // Management of Environmental Quality: An International Journal. – 2016.

21. Gaur A. et al. Evaluation of municipal solid waste management scenarios using multi-criteria decision making under fuzzy environment // *Process Integration and Optimization for Sustainability*. – 2022. – Т. 6. – №. 2. – С. 307-321.
22. Samah M.A.A., Manaf L.A., Zuki N.I.M. Application of AHP model for evaluation of solid waste treatment technology // *International Journal of Engineering Techsci*. 2010. Т. 1. №. 1. С. 35-40.
23. Bafail O.A., Abdulaal R.M.S. A Combined BWM-TOPSIS Approach Versus AHP-TOPSIS Approach: An Application to Solid Waste Management // *2022 The 3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*. 2022. С. 27-33.
24. Hoang N.H., Fogarassy C. Sustainability evaluation of municipal solid waste management system for Hanoi (Vietnam)–Why to choose the ‘Waste-to-Energy’ concept // *Sustainability*. 2020. Т. 12. №. 3. С. 1085.
25. Le P.G. et al. Development of Sustainability Assessment Criteria in Selection of Municipal Solid Waste Treatment Technology in Developing Countries: A Case of Ho Chi Minh City, Vietnam // *Sustainability*. 2023. Т. 15. №. 10. С. 7917.
26. Sun N., Chungpaibulpatana S., Limmeechokchai B. Implementation of analytic hierarchy process for sustainable municipal solid waste management: a case study of Bangkok // *Int. Energy J*. 2020. Т. 20. С. 325-336.
27. Goepel K.D. (2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 10 Issue 3 2018, pp 469-487
28. Оборудование для мусоросортировочной линии [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://www.megalion69.ru/produksiya/oborudovanie-dlya-musorosortirovochnoy-linii/>
29. Федеральный закон "Об отходах производства и потребления" от 24.06.1998 N 89-ФЗ [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_19109/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/)
30. СП 320.1325800.2017 «Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация» [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/16294/>
31. СП 2.1.7.722-98 Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005641>
32. ИТС 53-2022 «Ликвидация объектов накопленного экологического ущерба» [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://burondt.ru/NDT/NDTDocsFileDownload.php?UrlId=2612>
33. ТРГ 9 – 2022 «Утилизация и обезвреживание отходов термическими методами» [Электронный ресурс]–Режим доступа: URL: <https://burondt.ru/trg/2022/1935/info>
34. Goepel, K.D. (2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 10 Issue 3 2018, pp 469-487

## References

1. Edinaya kontsepsiya obrashcheniya s TKO na territorii Sankt-Peterburga i Leningradskoi oblasti [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://spb-neo.ru/dokumentatsiya/edinaya-kontsepsiya-obrashcheniya-s-tko/>
2. Federal'nyi zakon ot 10.01.2002 N 7-FZ (red. ot 14.07.2022) "Ob okhrane okruzhayushchei sredy" [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/bb9e97fad9d14ac66df4b6e67c453d1be3b77b4c/#dst178](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/bb9e97fad9d14ac66df4b6e67c453d1be3b77b4c/#dst178)
3. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 23 dekabrya 2014 goda N 1458 «O poryadke opredeleniya tekhnologii v kachestve nailuchshei dostupnoi tekhnologii, a takzhe razrabotki, aktualizatsii i opublikovaniya informatsionno-tekhnicheskikh spravochnikov po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam» [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://docs.cntd.ru/document/420242688>
4. Prikaz Ministerstva Promyshlennosti i Torgovli Rossiiskoi Federatsii ot 23 avgusta 2019 goda N 3134 «Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendatsii po opredeleniyu tekhnologii v kachestve nailuchshei dostupnoi tekhnologii» [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://docs.cntd.ru/document/561106991>
5. Perechen' informatsionno-tekhnicheskikh spravochnikov po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://burondt.ru/itc>
6. UN Environment, the Life Cycle Initiative [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/life-cycle-initiative>
7. Zhang J. et al. Sustainable municipal waste management strategies through life cycle assessment method: A review // *Journal of Environmental Management*. 2021. Т. 287. S. 112238.
8. Kalbar P. P., Das D. Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making. – 2020.
9. UNEP/SETAC (2009) Guidelines for social life cycle assessment [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://www.unep.org/resources/report/guidelines-social-life-cycle-assessment-products>

10. Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision-making units // *European journal of operational research*. 1978. Т. 2. №. 6. S. 429-444.
11. Stojčić M. et al. Application of MCDM methods in sustainability engineering: A literature review 2008–2018 // *Symmetry*. 2019. Т. 11. №. 3. S. 350.
12. MDPI. Sustainability. [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>
13. ScienceDirect. Journal of Cleaner Production. [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-cleaner-production/about/insights>
14. Saaty T.L., Tran L.T. On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process // *Mathematical and Computer Modelling*. 2007. Т. 46. №. 7-8. S. 962-975.
15. Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method // *Omega*. 2015. Т. 53. S. 49-57.
16. Lai Y., Liu T.Y., Hwang C.L. Topsis for MODM // *European journal of operational research*. 1994. Т. 76. №. 3. S. 486-500.
17. Coffey L., Claudio D. In defense of group fuzzy AHP: A comparison of group fuzzy AHP and group AHP with confidence intervals // *Expert Systems with Applications*. 2021. Т. 178. S. 114970.
18. Tashayo B. et al. Combined fuzzy AHP–GIS for agricultural land suitability modeling for a watershed in southern Iran // *Environmental Management*. 2020. Т. 66. S. 364-376.
19. Xi H. et al. Evaluating the capability of municipal solid waste separation in China based on AHP-EWM and BP neural network // *Waste Management*. 2022. Т. 139. S. 208-216.
20. Kharat M.G. et al. The application of Delphi and AHP method in environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection // *Management of Environmental Quality: An International Journal*. – 2016.
21. Gaur A. et al. Evaluation of municipal solid waste management scenarios using multi-criteria decision making under fuzzy environment // *Process Integration and Optimization for Sustainability*. – 2022. – Т. 6. – №. 2. – S. 307-321.
22. Samah M.A.A., Manaf L.A., Zuki N.I.M. Application of AHP model for evaluation of solid waste treatment technology // *International Journal of Engineering Techsci*. 2010. Т. 1. №. 1. S. 35-40.
23. Bafail O.A., Abdulaal R.M.S. A Combined BWM-TOPSIS Approach Versus AHP-TOPSIS Approach: An Application to Solid Waste Management // 2022 The 3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. 2022. S. 27-33.
24. Hoang N.H., Fogarassy C. Sustainability evaluation of municipal solid waste management system for Hanoi (Vietnam)–Why to choose the ‘Waste-to-Energy’ concept // *Sustainability*. 2020. Т. 12. №. 3. S. 1085.
25. Le P.G. et al. Development of Sustainability Assessment Criteria in Selection of Municipal Solid Waste Treatment Technology in Developing Countries: A Case of Ho Chi Minh City, Vietnam // *Sustainability*. 2023. Т. 15. №. 10. S. 7917.
26. Sun N., Chungpaibulpatana S., Limmeechokchai B. Implementation of analytic hierarchy process for sustainable municipal solid waste management: a case study of Bangkok // *Int. Energy J*. 2020. Т. 20. S. 325-336.
27. Goepel K.D. (2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 10 Issue 3 2018, pp 469-487
28. Oborudovanie dlya musorosortirovochnoi linii [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://www.megalion69.ru/produksiya/oborudovanie-dlya-musorosortirovochnoy-linii/>
29. Federal'nyi zakon "Ob otkhodakh proizvodstva i potrebleniya" ot 24.06.1998 N 89-FZ [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_19109/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/)
30. SP 320.1325800.2017 «Poligony dlya tverdykh kommunal'nykh otkhodov. Proektirovanie, ekspluatatsiya i rekul'tivatsiya» [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/16294/>
31. SP 2.1.7.722-98 Gigienicheskie trebovaniya k ustroystvu i sodержaniyu poligonov dlya tverdykh bytovykh otkhodov [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005641>
32. ITS 53-2022 «Likvidatsiya ob"ektov nakoplenogo ekologicheskogo ushcherba» [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://burondt.ru/NDT/NDTDocsFileDownload.php?UrlId=2612>
33. TRG 9 – 2022 «Utilizatsiya i obezvrezhivanie otkhodov termicheskimi metodami» [Elektronnyi resurs]–Rezhim dostupa: URL: <https://burondt.ru/trg/2022/1935/info>
34. Goepel, K.D. (2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 10 Issue 3 2018, pp 469-487.