

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ/MACHINES, UNITS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.10>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОРТИРОВОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Научная статья

Карелин А.Е.^{1,*}, Кожемяченко А.В.², Лемешко М.А.³

^{1,2,3} Институт сферы обслуживания и предпринимательства, филиал Донского государственного технического университета, Шахты, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (artem_karelin95[at]mail.ru)

Аннотация

Приведены сведения о проблеме сортировки твердых коммунальных отходов. В статье проведены теоретические исследования возможности применения метода подобия для расчёта и обоснования рациональных параметров системы сортировки твердых коммунальных отходов. Предложена функциональная зависимость производительности линии сортировки отходов, получены частные выражения и численные значения критериев подобия функционирования процесса сортировки. Также получен обобщенный критерий подобия состояния процесса сортировки твердых коммунальных отходов, исследован характер влияния параметров функциональной зависимости на величину выходной характеристики. Результаты исследования могут быть полезны для разработчиков и производителей оборудования для сортировки отходов, а также для специалистов в области управления отходами и экологической безопасности.

Ключевые слова: сортировка, отходы, методика расчета, математическая модель, теория подобия.

MATHEMATICAL MODELLING OF SOLID MUNICIPAL WASTE SORTING PROCESSES

Research article

Karelin A.Y.^{1,*}, Kozhemyachenko A.V.², Lemeshko M.A.³

^{1,2,3} Institute of Service Sector and Entrepreneurship, branch of Don State Technical University, Shakhty, Russian Federation

* Corresponding author (artem_karelin95[at]mail.ru)

Abstract

Information about the problem of sorting solid municipal waste is given. In the article, theoretical studies of the possibility of using the method of similarity for calculation and substantiation of rational parameters of the system of sorting solid municipal waste are carried out. The functional dependence of productivity of the waste sorting line is offered, private expressions and numerical values of criteria of similarity of functioning of the sorting process are received. Also, the generalised criterion of similarity of the state of the process of sorting of solid municipal wastes is obtained, the character of influence of the parameters of the functional dependence on the value of the output characteristic is examined. The results of the study can be useful for developers and manufacturers of equipment for waste sorting, as well as for specialists in the field of waste management and environmental safety.

Keywords: sorting, waste, calculation methodology, mathematical model, similarity theory.

Введение

Актуальность работы обусловлена быстрым ростом образования отходов, что ставит перед городами и странами ряд проблем, в том числе необходимость создания надлежащих систем обращения с отходами для обеспечения экологической безопасности и защиты здоровья населения. Это включает в себя надлежащую утилизацию отходов и реализацию программ утилизации для сохранения природных ресурсов. Отсутствие решения этих вопросов может привести к ухудшению состояния окружающей среды, проблемам со здоровьем и снижению качества жизни населения.

Правильное обращение с твердыми коммунальными отходами (ТКО) имеет решающее значение для поддержания чистоты окружающей среды. Должны быть внедрены эффективные системы управления отходами, чтобы обеспечить их сбор, сортировку и правильную утилизацию. Переработка и компостирование также могут использоваться для уменьшения количества отходов, попадающих на свалки. Кроме того, программы общественного образования и повышения осведомленности могут помочь людям понять важность надлежащей утилизации отходов и побудить их применять экологически безопасные методы.

Одним из основных методов обращения с отходами является их предварительная сортировка. Сортировка ТКО включает разделение отходов на разные категории, такие как бумага, пластик, стекло, металл и т.д. Этот процесс помогает увеличить количество перерабатываемых материалов, которые можно извлечь из потока отходов, уменьшая количество отходов, попадающих на свалки. Кроме того, это может помочь уменьшить воздействие отходов на окружающую среду за счет сокращения количества ресурсов, необходимых для производства новых продуктов из первичных материалов, а также за счет уменьшения количества выбросов парниковых газов, которые образуются в процессе управления отходами. Применение уже существующих решений позволяет сократить затраты на исследования и разработки новых технологий. Это может быть особенно полезно в условиях ограниченных ресурсов и бюджета проекта.

Проектирование мусоросортировочных комплексов – это сложный процесс, который требует учета множества факторов, таких как объем и состав отходов, экологические стандарты, экономическая целесообразность и местные условия. Существует несколько основных подходов к проектированию таких комплексов, каждый из которых имеет свои особенности:

1. Традиционный подход. Основан на использовании проверенных технологий и методов, таких как ручная сортировка, механическое разделение отходов и захоронение остатков.

Преимущества: низкие капитальные затраты и простота внедрения.

Недостатки: низкая эффективность извлечения вторичных ресурсов, а также высокая зависимость от человеческого фактора.

Пример применения: используется в развивающихся странах, где преобладает ручной труд.

2. Автоматизированный подход. Включает использование современных технологий, таких как оптические сканеры, роботизированные системы сортировки, магнитные и баллистические сепараторы.

Преимущества: высокая производительность и точность сортировки, снижение зависимости от человеческого труда, возможность обработки больших объемов отходов.

Недостатки: высокие капитальные затраты, требует квалифицированного персонала для обслуживания.

Энергоемкость.

Пример применения: широко используется в Европе (Германия, Швеция) и Северной Америке.

3. Модульный подход. Проектирование на основе модулей, которые можно комбинировать в зависимости от потребностей и объемов отходов.

Преимущества: гибкость и возможность масштабирования, подходит для регионов с изменяющимися объемами отходов.

Недостатки: требует тщательного планирования, может быть дороже, чем традиционные решения.

Пример применения: используется в странах с неравномерным распределением отходов или в удаленных регионах.

4. Инновационный подход. Включает применение передовых технологий, таких как искусственный интеллект (ИИ), биотехнологии и пиролиз.

Преимущества: высокая эффективность переработки, минимизация отходов, направляемых на захоронение.

Недостатки: высокие затраты на разработку и внедрение, требует значительных исследований и тестирования.

Пример применения: Пилотные проекты в Японии, США и некоторых европейских странах.

В данной работе предлагается применение метода подобия технических систем при проектировании мусоросортировочных комплексов.

Метод подобия позволяет:

1. Выявить наиболее эффективные процессы и технологии, которые могут быть применены в проектировании мусороперерабатывающего комплекса.

2. Сократить время и ресурсы, необходимые для разработки нового проекта, так как можно изучить и адаптировать проверенные решения, которые уже доказали свою эффективность.

3. Адаптировать успешные решения к местным условиям и требованиям (учёт климатических особенностей, экологических требований и других факторов, которые могут повлиять на эффективность и безопасность проекта).

4. Обосновать достаточность и отсутствие избыточности мощностных характеристик и производительности отдельных элементов системы сортировки.

Целью работы является определение, рациональной конфигурации сортировочной линии при помощи использования элементов теории подобия технических систем, в зависимости от условий локальной сортировки ТКО.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить функциональные зависимости по выходным характеристикам;

- получить частные выражения и численные значения критериев подобия функционирования процесса сортировки ТКО;

- получить обобщенный критерий подобия состояния процесса сортировки ТКО;

- получить обобщенное критериальное выражение по выходной характеристике.

Методы и принципы исследования

Методология проектирования систем сортировки отходов предполагает прогнозирование и предварительный расчет параметров на основе аналогичных систем, с целью снижения затрат на проектирование за счёт использования опыта предыдущих разработок. В этой методологии планируется применить теорию подобия технических систем, которая позволяет прогнозировать неизвестные факторы в системах, имеющих общие и отличительные признаки. Это значительно упростит процесс проектирования систем сортировки отходов с возможностью дальнейшего уточнения и корректировки.

Также важно учитывать, что некоторые объекты сортировки являются вероятностными, например, на количество ТКО могут влиять различные факторы, в том числе:

1. Климатическая зона (количество отходов может увеличиваться во время туристического сезона).

2. Жилищные условия (количество отходов может зависеть от количества людей, проживающих в доме).

3. Высота здания (чем выше здание, тем больше в нем живет людей и, следовательно, тем больше образуется отходов).

4. Тип топлива (при сжигании некоторых видов топлива может образовываться больше отходов, чем при сжигании других).

5. Доступность общественного питания (большое количество, например, ресторанов может привести к увеличению количества упаковки в виде пластиковых контейнеров).

6. Культура торговли и образ жизни (если люди предпочитают покупать продукты в упаковке, это может привести к увеличению отходов)

7. Благополучие местного населения [1].

Существуют диапазоны, в пределах которых можно, основываясь на анализе известных систем и начальных значениях во время проектирования, предположить рациональный диапазон, в котором будут изменяться эти переменные величины. Если эта величина не является детерминированной, рекомендуется применить нечёткую логику [2].

Использование нечёткой логики позволяет производить прогнозы в технических системах, в которых не все параметры имеют точные значения и изменяются в зависимости от различных условий. Таким образом, целевая функция достигается с использованием метода теории подобия технических систем и нечёткой логики. Конечной целью работы является предоставление расчетных рекомендаций, количественных и экономических, для проектирования нового объекта по сортировке и переработке отходов с учетом известных проектных решений, с целью минимизации затрат на проектирование и получения более точных и надёжных значений для реализации новых проектов.

Результаты и обсуждение

В работе [3] разработана математическая модель, основанная на теории нечёткой логики, позволяющая определить показатель ресурсного потенциала для отходов бумаги и картона. Результатом математической модели является поверхность, изображенная на рисунке 1.

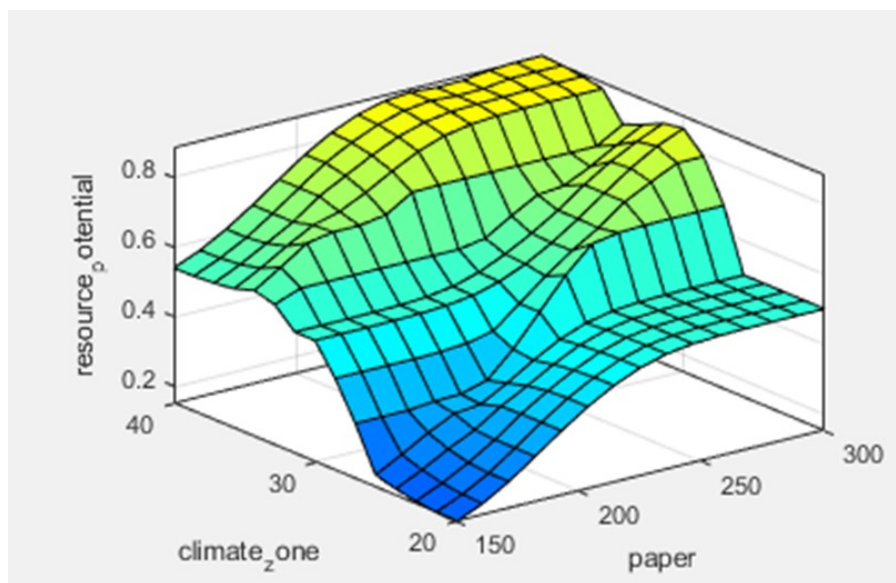


Рисунок 1 - Поверхность «Ресурсный потенциал», зависящая от входных переменных: «Масса бумажных отходов» и «Климатическая зона»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.10.1>

Данная модель рассчитывает показатель ресурсного потенциала в соответствии со схемой Мамдани в зависимости от двух входных переменных (масса бумажных отходов и климатическая зона) и выходной переменной (ресурсный потенциал).

Математические модели описывают отношения между параметрами или функциональные зависимости между ними и используются для расчета желаемых параметров или функций [4], [5], [6]. Однако, ни одна модель не может полностью представить описываемый объект, поэтому необходимо найти компромисс между точностью модели и простотой расчетов [7].

Для установления общих закономерностей и применения результатов в том случае, когда эксперимент не проводился, необходимо:

- 1) вникнуть в суть вопроса;
- 2) провести общий качественный анализ предметной области;
- 3) представить величины в безразмерном виде, при этом выбрав безразмерные параметры, количество которых должно быть минимальным [8].

Возможность такого выбора системы определения безразмерных параметров и предварительного качественно-теоретического анализа обеспечивается теорией подобия.

Обозначать критерии подобия и безразмерные числа принято прописной или строчной греческой буквой ρ . Существует два способа получения критериев подобия:

- 1) из дифференциальных уравнений, описывающих процесс или явление;
- 2) из анализа размерностей параметров задачи [9], [10], [11].

Для исследования подобия обеспечения технического состояния системы линии сортировки твердых коммунальных отходов воспользуемся методом анализа размерностей, учитывая его универсальность. Решение задач данным методом основано на второй, или Пи-теореме [12].

Исследование подобия обеспечения технического состояния системы линии сортировки твердых коммунальных отходов проводим в следующей последовательности:

1) Функциональная зависимость по выходной характеристике $P_{с.л.}$ (производительность сортировочной линии ТКО) имеет вид:

$$P_{с.л.} = f(t_{см}, m_{отх}, v_{кон}, l_{кон}, b_{кон}, P_{р.о.}, m_b, m_n, m_c, m_a, m_{ст}, \rho_b, \rho_n, \rho_c, \rho_a, \rho_c) \quad (1)$$

где $t_{см}$ – время рабочей смены;

$m_{отх}$ – максимальная масса отходов на конвейерной ленте;

$v_{кон}$ – скорость конвейерной ленты;

$l_{кон}$ – длина конвейерной ленты;

$b_{кон}$ – ширина конвейерной ленты;

$P_{р.о.}$ – производительность одного рабочего органа;

m_b – масса бумаги;

m_n – масса пластмассы;

m_c – масса стекла;

m_a – масса алюминия;

$m_{ст}$ – масса стали;

ρ_b – плотность бумаги;

ρ_n – плотность пластмассы;

ρ_c – плотность стекла;

ρ_a – плотность алюминия;

$\rho_{ст}$ – плотность стали.

2) Получение частных выражений и численных значений критериев подобия функционирования процесса сортировки ТКО. В качестве независимых параметров принимаем: $m_{отх}$, $l_{кон}$, $t_{см}$.

Полученные выражения для критериев подобия имеют вид:

$$\begin{aligned} \pi_{m_c} &= \frac{m_c}{m_{отх}}; & \pi_{m_n} &= \frac{m_n}{m_{отх}}; & \pi_{m_a} &= \frac{m_a}{m_{отх}}; \\ \pi_{m_{ст}} &= \frac{m_{ст}}{m_{отх}}; & \pi_{\rho_b} &= \frac{\rho_b}{m_{отх} \cdot l_{кон}^{-3}}; & \pi_{\rho_c} &= \frac{\rho_c}{m_{отх} \cdot l_{кон}^{-3}}; \\ \pi_{\rho_n} &= \frac{\rho_n}{m_{отх} \cdot l_{кон}^{-3}}; & \pi_{\rho_a} &= \frac{\rho_a}{m_{отх} \cdot l_{кон}^{-3}}; & \pi_{\rho_{ст}} &= \frac{\rho_{ст}}{m_{отх} \cdot l_{кон}^{-3}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Основываясь на данных приведенных в [13], преобладающий состав, образующихся ТКО в среднем по России, представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Морфологический состав твердых коммунальных отходов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.10.2>

Компонент	% по массе
Бумага	41
Пластмасса	6,2
Стекло	4,4
Алюминий	1,7
Сталь	2,8
Прочее	43,9

Используя выражения для частных критериев подобия и табличных условий однозначности процесса сортировки ТКО в системе аналоге «Мусоросортировочный комплекс в Новоронеже», рассчитываем численные значения этих критериев.

Таблица 2 - Условия однозначности процесса сортировки ТКО системы аналога

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.10.3>

Параметр	Условное обозначение	Размерность	Значение по аналогу
Производительность сортировочной линии ТКО	$P_{с.л.}$	т/ч	15

Параметр	Условное обозначение	Размерность	Значение по аналогу
Время рабочей смены	$t_{см}$	ч	8
Максимальная масса отходов на конвейерной ленте	$m_{отх}$	т	20
Скорость конвейерной ленты	$v_{кон}$	км/ч	2,16
Длина конвейерной ленты	$l_{кон}$	м	25
Ширина конвейерной ленты	$b_{кон}$	м	1
Производительность одного рабочего органа	$P_{р.о}$	т/ч	0,35
Масса бумаги	m_b	т	8,2
Масса пластмассы	m_n	т	1,24
Масса стекла	m_c	т	0,88
Масса алюминия	m_a	т	0,34
Масса стали	$m_{ст}$	т	0,56
Плотность бумаги	ρ_b	кг/м ³	0,0009
Плотность пластмассы	ρ_n	кг/м ³	1050
Плотность стекла	ρ_c	кг/м ³	2200
Плотность алюминия	ρ_a	кг/м ³	2712
Плотность стали	$\rho_{ст}$	кг/м ³	7874

Эти значения следующие:

$$\begin{aligned} \pi_{P_{р.о}} = 0,14; \pi_{v_{кон}} = 691,2; \pi_{P_{с.л.}} = 6; \pi_{b_{кон}} = 0,04; \pi_{m_b} = 0,41; \pi_{m_c} = 0,044; \\ \pi_{m_n} = 0,062; \pi_{m_a} = 0,17; \pi_{m_{ст}} = 0,028; \pi_{\rho_b} = 0,0007; \pi_{\rho_c} = 1718,75; \pi_{\rho_n} = 820,31; \\ \pi_{\rho_a} = 2118,75; \pi_{\rho_{ст}} = 6151,56. \end{aligned} \quad (3)$$

Принимаем значения π -критериев постоянными для исследуемого процесса и процесса аналога.

3) Проанализируем, как изменения параметров функциональной зависимости влияют на выходную характеристику $P_{с.л.}$, для того чтобы получить обобщенный критерий подобия состояния процесса сортировки ТКО. В таблице 3 представлены результаты характера влияния параметров.

Таблица 3 - Характер влияния параметров функциональной зависимости на величину выходной характеристики $P_{с.л.}$.

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.10.4>

Параметр	$P_{р.о}$	$v_{кон}$	$b_{кон}$	m_b	m_n	m_c	m_a	$m_{ст}$	ρ_b	ρ_n	ρ_c	ρ_a	$\rho_{ст}$
+1	+1	+1	+1										
-1				-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Обобщенный критерий подобия технического состояния процесса сортировки ТКО с учетом выше представленного влияния параметров функциональной зависимости имеет вид:

$$\pi_{\prod_{i=1}^k P_{с.л.}} = \frac{\pi_{P_{с.л.}} \cdot \pi_{P_{р.о}} \cdot \pi_{v_{кон}} \cdot \pi_{b_{кон}}}{\pi_{m_b} \cdot \pi_{m_c} \cdot \pi_{m_n} \cdot \pi_{m_a} \cdot \pi_{m_{ст}} \cdot \pi_{\rho_b} \cdot \pi_{\rho_c} \cdot \pi_{\rho_n} \cdot \pi_{\rho_a} \cdot \pi_{\rho_{ст}}}; \quad (4)$$

4) Обобщенное критериальное выражение для выходной характеристики $P_{с.л.}$ получается с использованием выражения (4) обобщенного критерия подобия, где правая часть выражения выявляется через выражения соответствующих частных критериев подобия:

$$\pi_{\prod_{i=1}^k P_{cл}} = \frac{P_{c.л.} \cdot t_{cm}}{m_{отх.}} \cdot \frac{P_{p.} \cdot t_{cm}}{m_{отх.}} \cdot \frac{v_{отх.} \cdot t_{cm}}{l_{отх.}} \cdot \frac{b_{кон.}}{l_{кон.}} \cdot \frac{m_{омх.}}{m_{б.}} \cdot \frac{m_{отх.}}{m_n} \cdot \frac{m_{омх.}}{m_c} \cdot \frac{m_{омх.}}{m_a} \cdot \frac{m_{омх.}}{m_{cm}} \cdot \frac{m_{отх.}}{\rho_{\sigma} \cdot l_{кон.}^3} \cdot \frac{m_{отх.}}{\rho_n \cdot l_{кон.}^3} \cdot \frac{m_{отх.}}{\rho_c \cdot l_{кон.}^3} \cdot \frac{m_{отх.}}{\rho_a \cdot l_{кон.}^3} \cdot \frac{m_{отх.}}{\rho_{ст} \cdot l_{кон.}^3} =$$

$$= \frac{P_{c.л.} \cdot t_{cm}^3 \cdot P_{p.о.} \cdot v_{кон.} \cdot b_{кон.} \cdot m_{отх.}^8}{l_{кон.}^{17} \cdot m_{б.} \cdot m_n \cdot m_c \cdot m_a \cdot m_{cm} \cdot \rho_{б.} \cdot \rho_n \cdot \rho_c \cdot \rho_a \cdot \rho_{ст}};$$
(5)

Принимаем значения л-критериев постоянными для исследуемого процесса и процесса аналога.

3) Проанализируем, как изменения параметров функциональной зависимости влияют на выходную характеристику $P_{c.л.}$, для того чтобы получить обобщенный критерий подобия состояния процесса сортировки ТКО. В таблице 3 представлены результаты характера влияния параметров.

Подставляя в численные значения для частных критериев подобия, получим:

$$\pi_{\prod_{i=1}^k P_{cл}} = 3,4 \cdot 10^{-3};$$
(6)

Из выражения (5) получим обобщенное критериальное выражение для выходной характеристики:

$$P_{c.л.} = 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{l_{кон.}^{17} \cdot m_{б.} \cdot m_n \cdot m_c \cdot m_a \cdot m_{cm} \cdot \rho_{б.} \cdot \rho_n \cdot \rho_c \cdot \rho_a \cdot \rho_{ст}}{t_{cm}^3 \cdot P_{p.о.} \cdot v_{кон.} \cdot b_{кон.} \cdot m_{отх.}^8};$$
(7)

Заключение

Таким образом, в данной работе определены функциональные зависимости по выходным характеристикам, получены частные выражения и численные значения критериев подобия, а также получен обобщенный критерий подобия и обобщенное критериальное выражение по выходной характеристике. Оригинальность заключается в том, что создана математическая модель процесса сортировки ТКО, включающая частные модели с (1)–(7). Новизна данной модели состоит в том, что она позволяет обосновать достаточность и отсутствие избыточности мощностных характеристик и производительности отдельных элементов сортировочной линии твердых коммунальных отходов, а также разработать рекомендации для проектирования систем переработки отходов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Григорьев В.Н. Оптимизация технологической схемы сортировки твердых бытовых отходов. / В.Н. Григорьев, С.В. Паршакова // Экология и научно-технический прогресс. — 2013. — 1. — С. 39–45.
2. Lukka T. Zenrobotics recycler robotic sorting using machine learning. / T. Lukka, T. Tossavainen, J. Kujala et al. // Proceedings of the International Conference on Sensor-Based Sorting; — 1. — Aachen: SBS, 2014. — P. 1–8.
3. Карелин А.Е. Совершенствование методологии проектирования систем сортировки твердых коммунальных отходов / А.Е. Карелин, А.В. Кожемяченко. — Шахты: ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2024.
4. Карелин А.Е. Обзор систем сортировки твердых коммунальных отходов. / А.Е. Карелин, А.В. Кожемяченко, М.А. Лемешко // Инженерный вестник Дона. — 2021. — 7(79). — URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n7y2021/7064> (дата обращения: 16.12.24).
5. Карелин А.Е. Система распознавания объектов для сортировки твердых бытовых отходов. / А.Е. Карелин, А.В. Кожемяченко, М.А. Лемешко // Инженерный вестник Дона. — 2022. — 6(90). — URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n6y2022/7757> (дата обращения: 16.12.24).
6. Иванов И.Е. Методы подобия физических процессов / И.Е. Иванов, В.Е. Ерещенко. — Москва: МАДИ, 2015. — 144 с.
7. Архипов В.А. Основы теории инженерно-физического эксперимента / В.А. Архипов, А.П. Березиков. — Томск: Томск политехнич. ун-т, 2008. — 206 с.
8. Крамаренко Н.В. Обзор способов вывода критериев подобия в механике. / Н.В. Крамаренко // Вестник Самарского государственного технического университета. — 2021. — 1. — С. 163–192.
9. Крамаренко Н.В. Использование теории подобия для проведения инженерного эксперимента. / Н.В. Крамаренко, А.А. Капустина, В.М. Лаврина и др. // Наука. Промышленность. Оборона; — Новосибирск: НГТУ, 2019. — С. 96–101.
10. Санников Р.Х. Теория подобия и моделирования. Планирование инженерного эксперимента / Р.Х. Санников. — Уфа: УГНТУ, 2010. — 253 с.
11. Крамаренко Н.В. Методы подобия в механике: анализ уравнений / Н.В. Крамаренко. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. — 124 с.
12. Bridgman P.W. Dimensional analysis / P.W. Bridgman. — Yale: New Haven, 2006. — 124 p.

13. Соколов Л.И. Управление отходами / Л.И. Соколов. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. — 209 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Grigor'ev V.N. Optimizaciya texnologicheskoy sxemy' sortirovki tverdy'x by'tovy'x otkodov [Optimization of the technological scheme for sorting solid municipal waste]. / V.N. Grigor'ev, S.V. Parshakova // Ecology and scientific and technological progress. — 2013. — 1. — P. 39–45. [in Russian]
2. Lukka T. Zenrobotics recycler robotic sorting using machine learning. / T. Lukka, T. Tossavainen, J. Kujala et al. // Proceedings of the International Conference on Sensor-Based Sorting; — 1. — Aachen: SBS, 2014. — P. 1–8.
3. Karelin A.E. Sovershenstvovanie metodologii proektirovaniya sistem sortirovki tverdikh kommunalnikh otkhodov [Improving the methodology for designing solid municipal waste sorting systems] / A.E. Karelin, A.V. Kozhemyachenko. — Shakhti: ISOiP (branch) of DSTU in Shakhti, 2024. [in Russian]
4. Karelin A.E. Obzor sistem sortirovki tverdy'x kommunal'ny'x otkodov [Overview of municipal solid waste sorting systems]. / A.E. Karelin, A.V. Kozhemyachenko, M.A. Lemeshko // Engineering Bulletin of the Don. — 2021. — 7(79). — URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7064> (accessed: 16.12.24). [in Russian]
5. Karelin A.E. Sistema raspoznavaniya ob'ektov dlya sortirovki tverdy'x by'tovy'x otkodov [Object recognition system for sorting solid household waste]. / A.E. Karelin, A.V. Kozhemyachenko, M.A. Lemeshko // Engineering Bulletin of the Don. — 2022. — 6(90). — URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7757> (accessed: 16.12.24). [in Russian]
6. Ivanov I.E. Metodi podobiya fizicheskikh protsessov [Methods of similarity of physical processes] / I.E. Ivanov, V.E. Yereshchenko. — Moscow: MADI, 2015. — 144 p. [in Russian]
7. Arkhipov V.A. Osnovi teorii inzhenerno-fizicheskogo eksperimenta [Fundamentals of the theory of engineering and physical experiment] / V.A. Arkhipov, A.P. Berezikov. — Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2008. — 206 p. [in Russian]
8. Kramarenko N.V. Obzor sposobov vy'voda kriteriev podobiya v mexanike [An overview of ways to derive similarity criteria in mechanics]. / N.V. Kramarenko // Bulletin of Samara State Technical University. — 2021. — 1. — P. 163–192. [in Russian]
9. Kramarenko N.V. Ispol'zovanie teorii podobiya dlya provedeniya inzhenernogo e'ksperimenta [Using similarity theory to conduct an engineering experiment]. / N.V. Kramarenko, A.A. Kapustina, V.M. Lavrina et al. // Science. Industry. Defense; — Novosibirsk: NGTU, 2019. — P. 96–101. [in Russian]
10. Sannikov R.Kh. Teoriya podobiya i modelirovaniya. Planirovanie inzhenernogo eksperimenta [Theory of similarity and modeling. Planning an engineering experiment] / R.Kh. Sannikov. — Ufa: UGNTU, 2010. — 253 p. [in Russian]
11. Kramarenko N.V. Metodi podobiya v mekhanike: analiz uravnenii [Similarity methods in mechanics: equation analysis] / N.V. Kramarenko. — Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2018. — 124 p. [in Russian]
12. Bridgman P.W. Dimensional analysis / P.W. Bridgman. — Yale: New Haven, 2006. — 124 p.
13. Sokolov L.I. Upravlenie otkhodami [Waste management] / L.I. Sokolov. — Vologda: Infra-Inzheneriya, 2018. — 209 p. [in Russian]