

Материальный баланс системы «отходы потребления – сырье – готовая продукция»

С.В. Чмыхалова, Ф.Д. С. Алкинани, Д.И. Коновалов

Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва

Аннотация: Предмет исследования в статье – система обращения с твердыми коммунальными отходами, выбор способа сортировки и переработки отходов для получения готовой продукции на основе метода материального баланса.

Для анализа производственных систем предлагается метод материального баланса, который позволяет оценить количество (массу) отходов, вовлеченных в сортировку, переработку и получение готовой продукции и количество полученной готовой продукции на каждом из приведенных этапов системы обращения с отходами. Одними из таких показателей могут быть коэффициент эффективной переработки отходов (КЭПО) Π при производстве новых товаров народного потребления (аналогичен коэффициенту полезного действия (КПД)) с учетом хозяйственного цикла по переработке твердых коммунальных отходов (ТКО), включающего сбор, сортировку, переработку отходов и производство новых товаров в одном хозяйственном цикле, и коэффициент образования отходов (КОО) μ в том же хозяйственном цикле, определяемый методом материального баланса.

Ключевые слова: коммунальные отходы, сортировка, переработка, продукция, материальный баланс, коэффициент эффективной переработки отходов, коэффициент образования отходов.

Введение

Проблема управления обращением с твердыми коммунальными отходами (ТКО) является весьма актуальной и важной, поскольку ее решение связано с необходимостью обеспечения нормальной жизнедеятельности населения, санитарной очистки городов, оздоровления окружающей среды и ресурсосбережения. Проблема ТКО характерна для всех стран, каждого города, населенного пункта.

Этой проблеме посвящено большое количество работ. Однако многие из них рассматривают систему обращения с твердыми отходами как индикаторы «устойчивого развития» государства, общества [1-3].

Показатели, классифицированные по экономическому аспекту, в первую очередь, определяются их прямой связью с затратами на внедрение,

техническое обслуживание и эксплуатацию систем обращения с твердыми коммунальными отходами. Что касается социального аспекта, то показатели находятся на стадии разработки и представлены в меньшем количестве исследований. Среди показателей этого аспекта в публикациях чаще всего упоминаются масштабы сбора и услуги (включая количество, виды и тарифы). Важно подчеркнуть, что показатели по твердым городским отходам должны быть сопоставимыми в разных странах и городах и что необходимо установить международные стандарты управления качеством на предприятиях [1].

В стратегии Европейского союза «Европа 2020» и флагманской инициативе «Ресурсоэффективная Европа» делается акцент на управление отходами. Управление отходами играет ключевую роль в успехе этой стратегии. Для анализа и мониторинга нашего продвижения к устойчивому развитию с точки зрения экологических показателей и управления отходами необходимы индикаторы. Эти индикаторы должны обеспечить комплексное представление о взаимосвязях между потреблением, производством, истощением ресурсов, использованием ресурсов, переработкой ресурсов, воздействием на окружающую среду и образованием отходов [2].

Твердые коммунальные отходы являются хронической проблемой во многих развивающихся странах, таких как Бразилия. Решение проблем обращения с отходами требует надежной системы оценки воздействия политики. Основная цель данного исследования – предложить основу для определения и классификации показателей, связанных с обращением с отходами, в рамках государственной политики Бразилии. Для определения и классификации полезности этих показателей в контексте управления отходами была использована комплексная система оценки движущей силы-давления-состояния-воздействия-реакции (Force–Pressure–State–Impact–Response – DPSIR). Был определен в общей сложности 151 показатель, а

также 283 цели, задания и обязательства в отношении отходов, которые, в первую очередь, были связаны с муниципальными отходами и в основном были взяты из планов, законов, президентских указов и коллегиальных постановлений [3].

Однако основой всех этих исследований должны быть показатели, которые характеризуют состав отходов, их свойства, состояние технологий и оборудования для сортировки и переработки отходов.

ТКО, образующиеся в результате жизнедеятельности людей, представляют собой смесь сложного морфологического состава (пластиковые упаковочные материалы, бумагу и текстильные компоненты, черные и цветные металлы, стекломой, пластмасса, токсически опасные гниющие пищевые и растительные остатки, камни, кости, кожа, резина, дерево, уличный смет и пр.). В ТКО, кроме твердой фазы, имеются жидкая и газообразная фазы, которые образуются в процессе накопления ТКО [4].

Основы рационального природопользования и вопросы о том, как человечество расходует свои ресурсы глубоко проанализированы, достаточно ли ресурсов для дальнейшего развития, ставятся вопросы об истощении запасов полезных ископаемых и сделаны соответствующие выводы в [5 – 6].

Основные ресурсно-экологические проблемы больших городов, к которым относятся проблемы с твердыми коммунальными отходами, рассмотрены в [7]. Проанализирована система управления природоохранной деятельностью, намечены пути дальнейшего совершенствования природопользования.

Фундамент междисциплинарной науки — природопользования заложен более чем 30 лет назад в [8].

Проблемы, с которыми человечество сталкивается в настоящее время, связанные с развитием экономики и человечества в целом, среди которых можно назвать изменение климата, утрата биологического разнообразия и др.

подчиняются общим законам развития. Управление этими процессами для обеспечения экологической безопасности основывается на экономических стимулах охраны природы, нормировании хозяйственных воздействий и внедрении системы обращения с коммунальными отходами изложены в [9-11].

Одним из главных выводов анализа приведенных источников является вывод о вторичном использовании ресурсов.

Управление обращением с твердыми коммунальными отходами (ТКО) – сложный процесс, который базируется на сравнении экологических и экономических показателей, связанных с процессами сортировки, переработки и получения готовой продукции, динамикой движения отходов и их использования для получения новых товаров народного потребления.

Для анализа производственных систем предлагается метод материального баланса [12].

В данном исследовании к системе «образования-сортировки-переработки отходов и получения готовой продукции» применим метод материального баланса.

Одними из таких показателей могут быть коэффициент эффективной переработки отходов (КЭПО) Π при производстве новых товаров народного потребления (аналогичен коэффициенту полезного действия (КПД)) с учетом хозяйственного цикла по переработке ТКО, включающего сбор, сортировку, переработку отходов и производство новых товаров в одном хозяйственном цикле, и коэффициент образования отходов (КОО) μ в том же хозяйственном цикле, определяемый методом материального баланса.

Методика разработки КЭПО и КОО

Преобразование бытовых (коммунальных) отходов в готовую продукцию происходит на производственных объектах. Мусоросортировочный и перерабатывающий комплекс из отходов

потребления в результате сортировки, переработки используется для получения готовой продукции, варианты которой сведены в табл. 1 [4].

Таблица 1.

Варианты готовой продукции, получаемой из вторичного сырья

№ пп	Компоненты отходов	Вторсырье и иные результаты переработки отходов
1	Бумага, древесина	Топливные брикеты. Вторсырьё на ЦБФ (целлюлозно-бумажную фабрику)
2	Стекло	Сырье для упаковки, тепло-, гидроизоляционных материалов, жидкое стекло и т. п.
3	Полимеры	Сырье для упаковки синтетического волокна, полимерных и древеснополимерных плиток.
4	Цветной лом	Вторцветмет
5	Лом чёрных металлов	Вторчермет
6	Пищевые отходы	Биогумус, удобрения, природный газ на котельную
7	Грунт	Используется для подготовки территорий
8	Щебень	Устройство дорог
9	Автомобильные шины	Измельчение в крошку для производства резиновой плитки и автомобильных деталей, для подложки при строительстве дорог, для наполнения спортивных снарядов

Для сортировки и переработки ТКО необходимы следующие виды технологических операций (как вариант) [4]:

- сортировка ручная (визуальная) с элементами механизированной, для получения стандартного вторсырья на конвейере;

- измельчение отсортированных отходов с целью получения вторсырья для производства товарной продукции;

- производственные участки переработки вторсырья:

- а) участок измельчения и агломерирования пленочного и ПЭТ-сырья (вариант – прессование пленочного и ПЭТ-сырья);

б) участок переработка стекла;

- раздельное прессование металлического лома (в том числе алюминия и др.);

- переработка автомобильных шин и резинотехнических изделий.

В настоящее время разработаны и внедрены различные комплексы для сортировки и переработки вторичного сырья. Состав технологических комплексов в зависимости от состава ТКО, региональных задач и возможностей и др. условий может быть различным.

Однако все объекты по сортировке и переработке отходов относятся к производственным объектам [12].

В общем случае под производственным объектом мы понимаем любой объект (производственное объединение, предприятие, цех, участок, техническое устройство и др.), созданный человеком для производства (изготовления) какой-либо продукции [12].

Технологический процесс любых объектов сопровождается преобразованием вещества (материи) и энергии (механической, тепловой, электрической и др.). Для изучения преобразовательных процессов, происходящих в производственных объектах, в том числе при преобразовании твердых коммунальных отходов в новую готовую продукцию для использования ее в хозяйственном обороте, составляют материальные, энергетические и комбинированные (материально-энергетические или энерго-материальные) балансы действующих (функционирующих) объектов [12].

Под балансами мы понимаем равенства между количествами вещества или энергии на «входах» и «выходах» объекта до и после осуществления в нем преобразований [12].

Заметим, что балансовый метод может быть использован не только для исследования технологических процессов, реализуемых в объектах в целом,

но и в их составных частях – предприятиях, технологических комплексах машин и аппаратов и в отдельно взятых технических средствах. Поэтому результаты данного исследования могут быть распространены на все технологические компоненты производственных предприятий, технологических линий и оборудования.

В настоящее время материальные и энергетические балансы производственных объектов нередко называют экобалансами, подчеркивая тем самым особую роль таких объектов в загрязнении окружающей среды [1–3, 12].

Составление балансов материи и энергии в производственных объектах позволяет не только определить, насколько полезно используются вещество и энергия в технологическом процессе, но и выявить влияние производственного объекта на окружающую среду и природные ресурсы. Полученные при этом данные могут послужить основой для разработки природоохранных мероприятий, направленных на сбережение природных ресурсов и защиту природной среды от техногенных загрязнений [4, 12 – 13].

Производственная система сортировки и переработки бытовых (коммунальных) отходов для получения новой готовой продукции состоит из следующих основных (укрупненных) производственных объектов (площадок для сбора ТКО у населения, мусоросортировочных организаций; мусороперерабатывающих организаций или организаций по производству новых товаров народного потребления) (рис. 1):



Рис. 1. Обращение с ТКО, как производственная система

Составим внешний материальный баланс – макробаланс производственной системы обращения с ТКО. Макробаланс является первым этапом исследования, он учитывает только «входы» и «выходы» объекта. Схемы каждой производственной подсистемы представлены на рис. 2 – рис. 5.

Материальный баланс сбора и транспортировки отходов представлен на рис. 2.

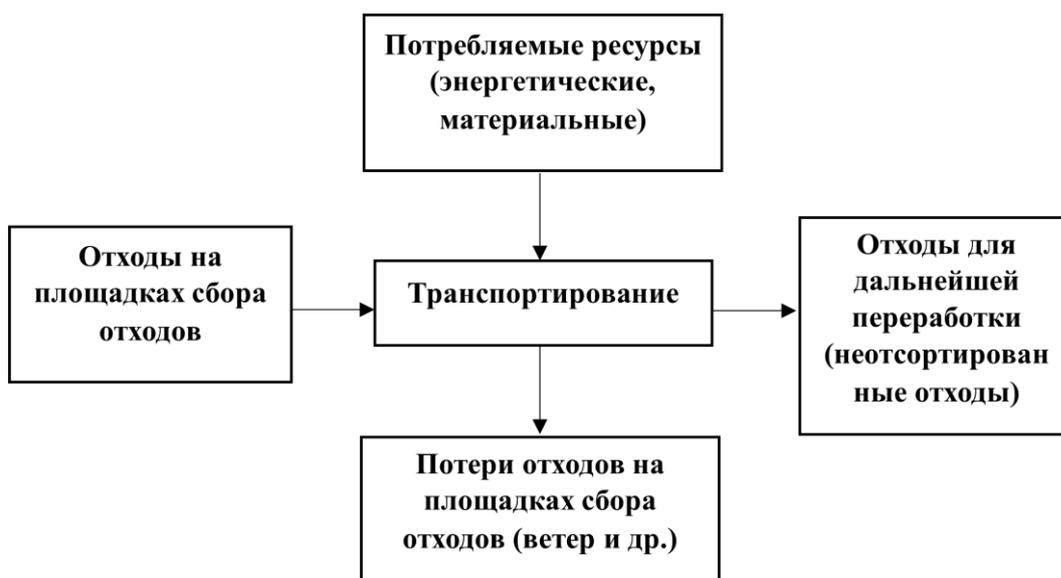


Рис. 2. Укрупненная схема транспортировки ТКО от площадок сбора до производственных участков сортировки отходов.

Составим материальный баланс первого этапа обращения с отходами – погрузкой в транспортные средства отходов, принесенных жителями на площадки сбора отходов и их транспортировкой:

$$M_{отх} = M_{отх.в_трансп} + M_{потерь_на_площадках}$$

где $M_{отх}$ – масса коммунальных (бытовых) отходов, принесенных жителями на площадку для сбора отходов, т;

$M_{отх.в_трансп}$ – масса коммунальных (бытовых) отходов, загруженная в специальные транспортные средства, т;

$M_{потерь_на_площадках}$ – масса потерь коммунальных отходов в результате различных факторов (ветра, рассыпанных жителями и др.), т.

Разделим правую и левую часть уравнения на $M_{отх}$:

$$1 = M_{отх.в_трансп} / M_{отх} + M_{потерь_на_площадках} / M_{отх}$$

или
$$1 = \eta_{1_отх.в_трансп} + \mu_{1_потерь}$$

$\eta_{1_отх.в_трансп}$ – коэффициент полезного действия сбора отходов жителей (КПД1);

$\mu_{1_потерь}$ – коэффициент потерь отходов на площадках сбора отходов.

$$M_{отх.в_трансп} = \eta_{1_отх.в_трансп} M_{отх}$$

На рис. 3. Представлена схема для определения материального баланса при сортировке отходов

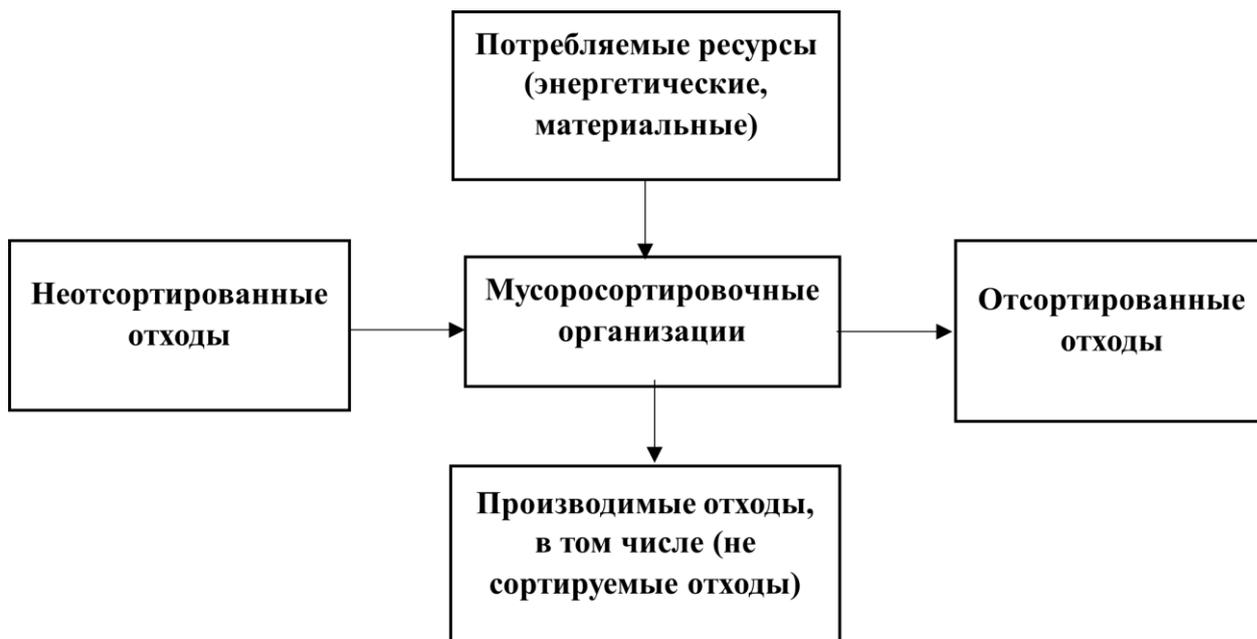


Рис. 3. Схема для определения материального баланса при сортировке ОТХОДОВ

Составим материальный баланс второго этапа обращения с отходами – мусоросортировкой:

$$M_{\text{неотсорт}} = M_{\text{отсорт.отх}} + M_{\text{потерь_неотсорт}}$$

где $M_{\text{неотсорт}}$ – масса коммунальных отходов, принесенных жителями на площадку для сбора отходов и доставленных на мусоросортировку, т;

$M_{\text{отсорт.отх}}$ – масса отсортированных отходов, т;

$M_{\text{потерь_неотсорт}}$ – масса несортируемых коммунальных отходов (отходы от сортировки ТКО), т.

Разделим правую и левую часть уравнения на $M_{\text{несорт}}$:

$$1 = M_{\text{отсорт.отх}} / M_{\text{несорт}} + M_{\text{потерь_неотсорт}} / M_{\text{несорт}}$$

$$1 = \eta_{2\text{отсорт.отх}} + \mu_{2\text{потерь_несорт}}$$

$$M_{\text{отсорт.отх}} = \eta_{2\text{отсорт.отх}} M_{\text{несорт}}$$

$\eta_{2отсорт.отх}$ – коэффициент полезного действия при сортировке отходов (КПД2);

$\mu_{2потерь_несорт}$ – коэффициент потерь отходов на площадках сбора ОТХОДОВ.

На рис. 4. представлена схема подготовки отсортированных отходов к этапу производства новых товаров народного потребления (отобранное вторичное сырье досортировывается по видам и цвету, если это требуется, перерабатывается в полуфабрикаты).

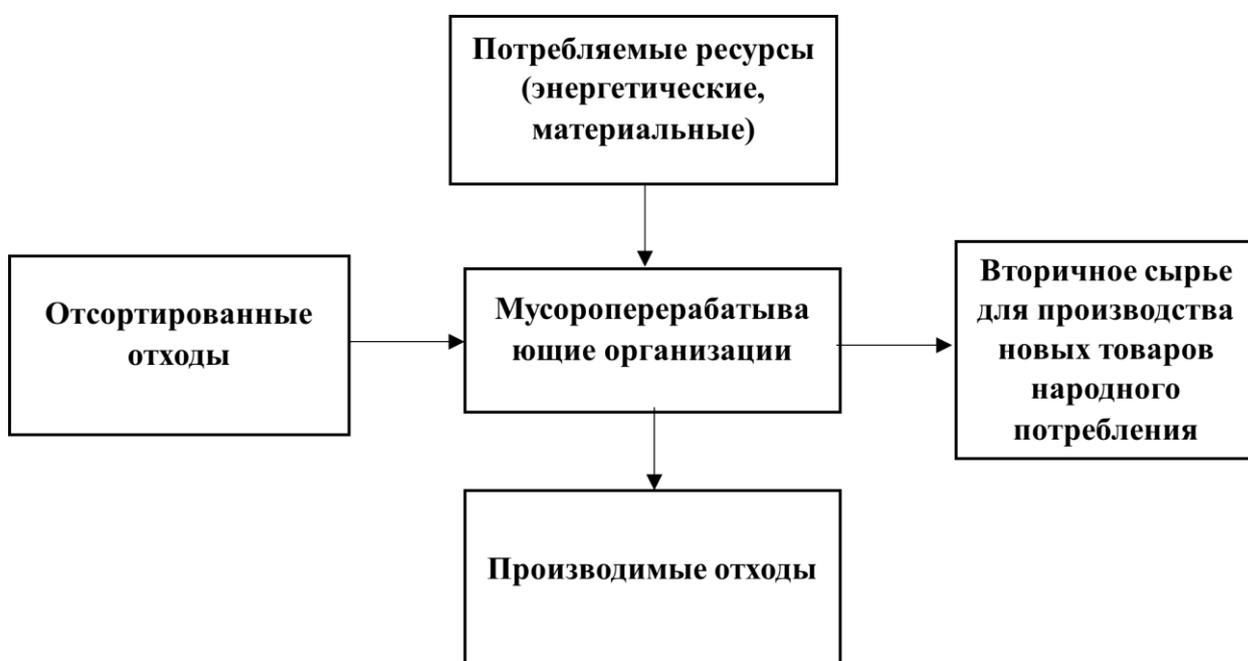


Рис. 4. Схема для определения материального баланса при сортировке ОТХОДОВ

Составим материальный баланс третьего этапа обращения с отходами – подготовкой вторичного сырья для производства товаров народного потребления:

$$M_{отсорт} = M_{перераб} + M_{потерь_при_перераб}$$

где $M_{отсорт}$ – масса коммунальных отходов, поступивших на мусороперерабатывающий комплекс, т;

$M_{перераб}$ – масса коммунальных отходов, переработанных в мусороперерабатывающем комплексе, т;

$M_{потерь_при_перераб}$ – масса потерь коммунальных отходов при переработке, т.

Разделим правую и левую часть уравнения на $M_{отсорт}$:

$$1 = M_{перераб_отх} / M_{отсорт} + M_{потерь_при_перераб} / M_{отсорт}$$

или
$$1 = \eta_{зперераб.отх} + \mu_{зпотерь_при_перераб},$$

где $\eta_{зперераб.отх}$ – коэффициент полезного действия переработки отходов на перерабатывающем комплексе (КПДЗ);

$\mu_{зпотерь_при_перераб}$ – коэффициент потерь отходов на перерабатывающем комплексе.

$$M_{перераб} = \eta_{зперераб.отх} \cdot M_{отсорт}.$$

На рис. 5 представлена схема для определения материального баланса при производстве новой товарной продукции.

Составим материальный баланс четвертого этапа обращения с отходами – производством новых товаров народного потребления из переработанных отходов:

$$M_{перераб} = \sum_{i=1}^n M_{товар.i} + M_{отх.тов},$$

где $\sum_{i=1}^n M_{товар.i}$ – суммарная масса всех новых товаров народного потребления (n - количество товаров), полученных из ТКО, т;

$M_{отх.тов}$ – общая масса отходов, полученных при производстве новых товаров, т.

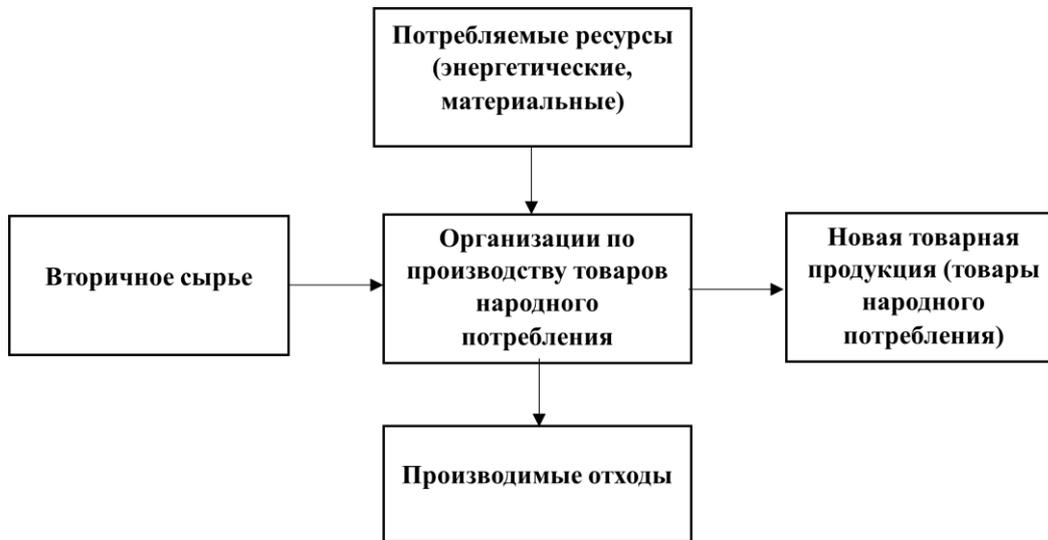


Рис. 5. Схема для определения материального баланса при производстве новой товарной продукции

Разделим правую и левую часть уравнения на $M_{перераб}$.

$$1 = \sum_{i=1}^n M_{товар.i} / M_{перераб} + M_{отх.тов} / M_{перераб}$$

Или
$$1 = \eta_{4новых_товаров} + \mu_{4отх_тов},$$

где $\eta_{4новых_товаров}$ – коэффициент использования отходов полезного действия (КПД) при производстве новых товаров народного потребления;

$\mu_{4отх_товаров}$ – коэффициент потерь при производстве новых товаров народного потребления.

$$M_{товар} = \eta_{4новых_товаров} M_{перераб}$$

Коэффициент эффективной переработки отходов (КЭПО) η при производстве новых товаров народного потребления из коммунальных отходов (аналогичен коэффициенту полезного действия (КПД)) – сбор, сортировка и переработка отходов и производство новых товаров в одном хозяйственном цикле, можно определить, как:

$$\eta = \eta_{1отх.с_трансп} \eta_{2отсорт_отх} \eta_{3перераб_отх} \eta_{4новых_товаров}$$

Коэффициент образования отходов при производстве новых товаров народного потребления (КОО) (сбор, сортировка и переработка отходов и производство новых товаров в одном хозяйственном цикле) можно определить, как:

$$\mu = \mu_{1\text{отх.в.трансп}} \mu_{2\text{отсорт.отх}} \mu_{3\text{перераб.отх}} \mu_{4\text{отх.товаров}}$$

Начальные свойства отходов и качество технологических процессов определяет коэффициент эффективного использования материалов (по массе исходного сырья (ТКО на входе в процесс сортировки-обработки и массе получившихся в результате обработки новых товаров). Таким образом Π можно также определить, как:

$$\eta = (M_{\text{отх}} - \sum_{i=1}^n M_{\text{товар.}i}) / M_{\text{отх}}$$

В табл. 2 представлен усредненный состав твердых коммунальных отходов (в соответствии с УсСП 320.1325800.2017. Свод правил. Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация. ОКС 13.030.10. Дата введения 2018-05-18), из которого видно, что уже на начальной стадии отсев составляет значительную часть.

Таблица 2

Усредненный состав твердых коммунальных отходов в Российской Федерации

Компонент ТКО	Содержание, % по массе
Макулатура	8,8-38,2
Стекло	3,3-25,3
Текстиль	1,1-11,9
Металлы	1,8-8,0
Полимеры	5,0-21,7
Пищевые отходы	6,1-35,0
Отсев	3,1-37,1
Прочее	2,6-19,0

Выводы и предложения

Твердые коммунальные отходы являются ценным вторичным сырьем, которое целесообразно полностью сортировать и использовать, что также позволит решать вопросы рационального природопользования за счет использования вторичного сырья, что может существенно повлиять на объемы добычи полезных ископаемых.

Современная система обращения с ТБО с технологической точки зрения недостаточно изучена, а многие ее технологические и технологические решения не являются достаточно эффективными.

Сравнивая различные технологии по сортировке, переработке отходов и производству готовой продукции по коэффициентам КЭПО и КОО можно обоснованно выбирать необходимые для этих процессов технические устройства и технологии.

Литература

1. Deus R.M., Bezerra B.S. & Battistelle R.A.G. Solid waste indicators and their implications for management practice. Int. J. Environ. Sci. Technol. 2019. URL: doi.org/10.1007/s13762-018-2163-3
2. European Commission. 2012. Life cycle indicators for waste management: development of life cycle based macro-level monitoring indicators for resources, products and waste for the EU-27. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability
3. Santos Eduardo, Fonseca Fernando, Santiago Aníbal, Rodrigues Daniel. Sustainability Indicators Model Applied to Waste Management in Brazil Using the DPSIR Framework. Sustainability 2024, 16(5), 2192. URL: doi.org/10.3390/su16052192
4. Абрамов В.Н. Результаты исследований морфологического состава твердых коммунальных отходов жилого фонда в южных регионах России /



Отходы и ресурсы. — 2023 — Т. 10 — № 4 — URL:
resources.today/PDF/19INOR423.pdf DOI: 10.15862/19INOR423

5. Скиннер Б. Хватит ли человечеству земных ресурсов? Пер. с англ. Под ред. А.С. Астахова. – М.: Мир, 1989. – 264 с.

6. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И. Промышленность и окружающая среда. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. 609 с. ISBN 5-94628-033-3.

7. Чмыхалова С.В. Ресурсно-экологические проблемы больших городов и пути их решения: Учебное пособие. – М.: Изд-во «Горная книга», 2012. - 328 с., - ил. (СТРОЙТЕХИЗДАТ).

8. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник. – М.: Мысль, 1990. – 639 с.

9. Красилов В.А. Охрана природы: Принципы, проблемы, приоритеты. – М.: ВНИИ Природы, 1992. – 173 с.

10. Снакин В.В. Экология и охрана природы: Словарь-справочник. Под ред. Акад. А.Л. Яншина. – М.: Akademia, 2000. – 384 с.

11. Кенуорси Л. Как убедить предприятия уменьшить количество отходов: Руководство для граждан / Пер. с англ. М.: М.: «Информ» и РХГУ им. Д.И. Менделеева. – 1995. 128 с.

12. Чмыхалова С.В. Моделирование процессов потребления ресурсов и загрязнения среды на горно-обогатительных комбинатах: макроподход. ГИАБ, 2000, №10, МГГУ, с. 136-138.

13. Хорошавин Л.Б. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов: [учеб. пособие]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 220 с.

References

1. Deus R.M., Bezerra B.S. & Battistelle, R.A.G. Solid waste indicators and their implications for management practice. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16, 2019, pp.1129–1144. URL: doi.org/10.1007/s13762-018-2163-3
 2. European Commission. 2012. Life cycle indicators for waste management: development of life cycle based macro-level monitoring indicators for resources, products and waste for the EU-27. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.
 3. Santos Eduardo, Fonseca Fernando, Santiago Aníbal, Rodrigues Daniel. Sustainability Indicators Model Applied to Waste Management in Brazil Using the DPSIR Framework. *Sustainability* 2024, 16(5), 2192. URL: doi.org/10.3390/su16052192
 4. Abramov V.N. Othody i resursy. 2023 T. 10, № 4. URL: resources.today/PDF/19INOR423.pdf DOI: 10.15862/19INOR423
 5. Skinner B. Hvatit li chelovechestvy zemnyh resursov? [Will humanity have enough Earth resources?]. Per. s angl. pod red. A.S. Astahova. M.: Mir, 1989. 264 p.
 6. Ysfin Y.S., Leontiev L.I., Chernousov P.I. Promushlennost i okruzhajushaja sreda [Industry and the environment]. M.: IKC «Akademkniga», 2002. 609 p. ISBN 5-94628-033-3.
 7. Chmykhalova S.V. Resursno-ekologicheskie problemy bolshih gorodov i puti ih reshenija: uchebnoe posobie [Resource and environmental problems of big cities and ways to solve them: A textbook]. M.: Izd-vo «Gornaja kniga», 2012. 328 p. il. (STROITEHIZDAT).
 8. Reimers N.F. Prirodopolzovanie: Slovar`-spravochnik [Nature management: A dictionary-reference]. M.: Mysl`:1990. 639 p.
 9. Krasilov V.A. Ohrana prirody: Principy, problemy, priority [Nature protection: principles, problems, priorities]. M.: VNIi Prirody, 1992. 173 p.
-



10. Snakin V.V. Ecologia i ohrana prirody: Slovar`-spravochnik [Ecology and Nature protection: A reference dictionary]. M.: Akademia, 2000. 384 p.

11. Kenworthy L. Kak ubedit' predpriyatiya umen'shit' kolichestvo promyshlennykh otkhodov: rukovodstvo dlya grazhdan [A citizen's guide to promoting toxic waste reduction. N.Y.: INFORM, Inc., 1990. 129 p]. Moskva: Rossijskij himiko-tehnologicheskij universitet imeni D. I. Mendeleeva, 1995. 128 p.

12. Chmykhalova S.V. GIAB, 2000, № 10, MGGU, pp. 136-138.

13. Horoshavin L.B. Osnovnye tehnologii pererabotki promyshlennyh I tverdyh kommunalnyh otkhodov. [Main technologies for processing industrial and solid municipal waste]. Izd-vo Ural. un-ta, 2016. 220 p.

Дата поступления: 26.03.2024

Дата публикации: 8.05.2024