

ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА СБОРА МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОТХОДОВ: ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНДУСТРИИ 4.0¹ НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ ИНФОРМИРОВАННОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ. ОБЗОР

Tamás Bányaí², Péter Tamás³, Bélla Illés³, Živilė Stankėvičiūtė³, Ágota Bányaí³

Международный журнал экологических исследований и общественного
здравоохранения. Февраль 2019 г.

OPTIMIZATION OF MUNICIPAL WASTE COLLECTION ROUTING: IMPACT OF INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES ON ENVIRONMENTAL AWARENESS AND SUSTAINABILITY

International Journal of Environmental Research and Public Health MDPI⁴

Резюме

Ускоренное перемещение людей в города привело к тому, что городское население мира в настоящее время увеличивается на 60 млн. чел. в год. Возрастающее количество городского населения оказывает значительное воздействие на объем образования бытовых отходов, которые нужно своевременно собирать и подвергать рециклингу. Сбор бытовых отходов, особенно в центральной части города связан с рядом проблем; система сбора должна быть надежной, гибкой, экономически эффективной и экологически чистой. В рамках этой статьи авторы описали возможности применения технологий Индустрии 4.0 для решений по сбору отходов и потенциал оптимизации этого процесса. После систематического обзора литературы в статье приводятся сведения о процессе сбора отходов в центральной части города как кибер-физической системе. Описана математическая модель процесса сбора отходов, в которой представлены проблемы маршрутизации, размещения и планирования. У модели следующие цели: (1) оптимальное размещение отходов из источников в мусоровозы; (2) планирование сбора отходов путем определения маршрута каждого мусоровоза для минимизации общих эксплуатационных затрат, повышения надежности, и в то же самое время необходимо учитывать комплексные экологические индикаторы, которые оказывают большое воздействие на общественное здоровье.

¹ Индустрия 4.0 – массовое внедрение киберфизических систем (информационно-технологическая концепция, подразумевающая интеграцию вычислительных ресурсов в физические сущности любого рода, как биологические, так и рукотворные). в производство (Индустрия 4.0).

² Институт логистики, университет Мишкольца, Венгрия, altpeti@uni-miskolc.hu.

³ Школа экономики и бизнеса, Каунасский технологический институт, Литва, zivilė.stankėvičiūtė@ktu.lt.

⁴ Междисциплинарный цифровой издательский институт, основанный в 2004 г. в Базеле китайским ученым в области неорганической химии и химической физики Шу-Кун Лин.

охранение. Затем описывается бинарный алгоритм летучих мышей⁵, результативность которого подтверждена различными эталонными функциями. Сценарный анализ подтверждает модель, а затем оценивается ее результативность для повышения экономической эффективности и гарантии экологической информированности о процессе сбора отходов.

1. Введение

В настоящее время 54% мирового населения проживает в городских районах. Ожидается, что эта доля возрастет до 66% к 2050 г. [1]. Этот интенсивный рост мирового населения приводит к росту образования отходов. Системы обращения с отходами можно разделить на две основные части: технологическую часть и логистику. Мы концентрируем внимание на аспектах системы обращения с отходами, связанных с логистикой, особенно с точки зрения сбора в рамках этой статьи.

Имеется широкий набор технологий переработки отходов, включая анаэробное сбраживание, биологическую сушку⁶ [2], газификацию [3], сброс в отвал, захоронение отходов в почву, компостирование, пиролиз [4], очистку сточных вод [5], сжигание [6] и повторное использование, но некоторые из них оказывают значительное воздействие на окружающую среду, и они могут привести к серьезному загрязнению окружающей среды. Размещение отходов (на полигоне) может вызвать образование парниковых газов, которые поглощают и излучают радиационную энергию в тепловом инфракрасном диапазоне и вызывают парниковый эффект. Технология сжигания также может вызвать проблемы для окружающей среды, поскольку при сжигании пластмасс могут образовываться токсичные вещества типа углеводородов, диоксида серы, хлорида водорода или оксидов азота. Это означает, что должны быть разработаны доступные технологии для снижения образования загрязняющих веществ. В предыдущие годы доля используемых технологий переработки изменялась. Как показано на рис. 1, доля полигонного депонирования значительно снизилась, в то время как доля сжигания, рециклинга и компостирования как экологически безвредных технологий обращения с отходами возросла.

Технология сжигания является широко распространенной технологией обращения с отходами, поскольку ее можно использовать не только для смешанных муниципальных отходов, но также и для предварительно обработанных муниципальных отходов, опасных отходов, осадков сточных вод и отходов лечебно-профилактических учреждений [8].

Разработка систем обращения с отходами находится под влиянием лиц, определяющих политику. Они несут ответственность за приведение в исполнение и мониторинг регламентов, законов и директив. Как показано на рис. 2, среднее образование отходов в ЕС-28 близко к 500 кг на душу населения. Это означает, что системы обращения с отходами должны собирать и перерабатывать значительные количества. Сбор и переработка этого большого количества отходов становятся причиной загрязнения окружающей среды [9], типа выбросов CO₂, SO₂, CO, HC и твердых частиц (PM) [10].

⁵ Алгоритм летучих мышей – алгоритм оптимизации, разработанный в 2010 г. и показывающий отличные результаты в решении задач поисковой оптимизации. Он описывает коллективное поведение децентрализованной самоорганизующейся системы.

⁶ Биологическая сушка – процесс, при котором биоразлагаемые отходы быстро нагреваются на начальных стадиях компостирования, чтобы удалить влагу из потока отходов, и, следовательно, уменьшить его общий вес.

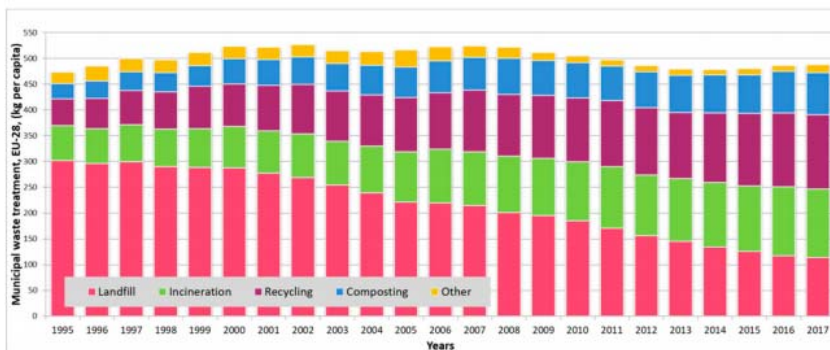


Рисунок 1. Тенденции обращения с муниципальными отходами в странах ЕС-28.
Источник [7]

Пояснения к рисунку 1: Municipal waste treatment, EU-28, (kg per capita) – обращение с муниципальными отходами, ЕС-28 (кг на душу населения), Landfill – полигонное депонирование, Incineration - сжигание, Recycling - рециклинг, Composting - компостирование, Other – прочее, Years - годы

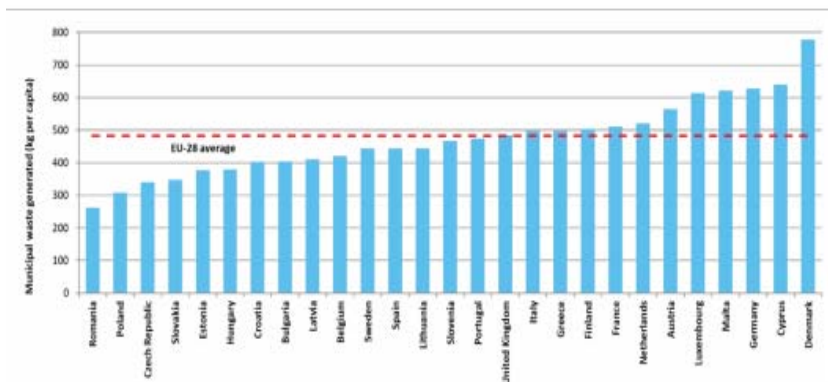


Рисунок 2. Образование муниципальных отходов по странам в 2016 г. Источник [7]

Пояснения к рисунку 2: Municipal waste generated (kg per capita) – образование муниципальных отходов (кг на душу населения), EU-28 average – среднее для ЕС-28, Romania - Румыния, Poland - Польша, Czech Republic – Чешская республика, Slovakia - Словакия, Estonia - Эстония, Hungary - Венгрия, Croatia - Хорватия, Bulgaria - Болгария, Latvia - Латвия, Belgium - Бельгия, Sweden - Швеция, Spain - Испания, Lithuania - Литва, Slovenia - Словения, Portugal - Португалия, United Kingdom - Великобритания, Italy - Италия, Greece - Греция, Finland - Финляндия, France - Франция, Netherlands - Нидерланды, Austria - Австрия, Malta - Мальта, Germany - Германия, Cyprus - Кипр, Denmark – Дания

Стимулирующим фактором для написания этой статьи явилось то, что технологии в Рамках Индустрии 4.0 сделали возможным перевод обычных систем производства и обслуживания в кибер-физические системы. В рамках нашей статьи мы хотели бы проанализировать воздействие технологий Индустрии 4.0 на возможности оптимизации систем сбора отходов, особенно с точки зрения потребления энергии и выбросов парниковых газов (ПГ). Цель статьи заключается в описании кибер-физической системы сбора отходов, включая интеллектуальные решения и демонстрацию возможностей оптимизации в кибер-физической системе сбора отходов с концентрацией внимания на проблемах маршрутизации.

Статья организована следующим образом. В Разделе 2 представлен литературный обзор, в котором последовательно подводятся итоги исследований проектирования систем обращения с отходами. В Разделе 3 описана рамочная модель кибер-физической системы обращения с отходами, включая технологии Индустрии 4.0. В Разделе 4 представлен бинарный алгоритм летучей мыши. Для нашего исследования в Разделе 5 мы сосредоточили внимание на результатах оптимизации с численным анализом. Обсуждение и будущие направления исследований приведены в Разделе 6, а в Разделе 7 сделаны выводы.

2. Литературный обзор

В рамках этой главы даны ответы на следующие вопросы после системного литературного обзора: кто чем занимается? кто первым это сделал или опубликовал? Какие пробелы в исследовании?

2.1. Концептуальные рамки и обзор методологии

Использованная нами методология систематического обзора литературы включает следующие аспекты [11]: формулировка вопросов исследования, выбор источников из системы “Web of Science”⁷, сокращение количества статей после их прочтения и определения основных тем, определение методологии для анализа выбранных статей, описание основных научных результатов и идентификацию научных разрывов и узких мест.

Во-первых, были определены относящиеся к тематике термины. Это важный этап обзора, поскольку имеются отличные обзорные статьи в области обращения с отходами, и мы не хотели бы проводить почти аналогичный обзор. Мы использовали следующие ключевые слова для проведения поиска в базе данных Web of Science: ТЕМА: “отходы”, “логистика” и “сбор”). На начальной стадии было идентифицировано 240 статей. Этот перечень был сокращен до 227 статей, с выбором только журнальных статей. Это исследование было проведено в ноябре 2018 г.; поэтому с тех пор могли быть опубликованы новые статьи.

⁷ Поисковая Интернет-платформа, объединяющая реферативные базы данных публикаций в научных журналах и патентов, в том числе базы, учитывающие взаимное цитирование публикаций. Эта платформа охватывает материалы по естественным, техническим, общественным, гуманитарным наукам и искусству.

2.2. Описательный анализ

Уменьшенное количество статей можно было классифицировать в зависимости от области исследования. На рис. 3 представлена классификация этих 227 статей с рассмотрением 10 предметных областей. Эта классификация демонстрирует большинство технических наук и наук об окружающей среде, в то время как оперативное исследование и компьютерные науки определили важность вычислительных методов, которые связаны с дизайнерскими решениями для сбора муниципальных отходов.

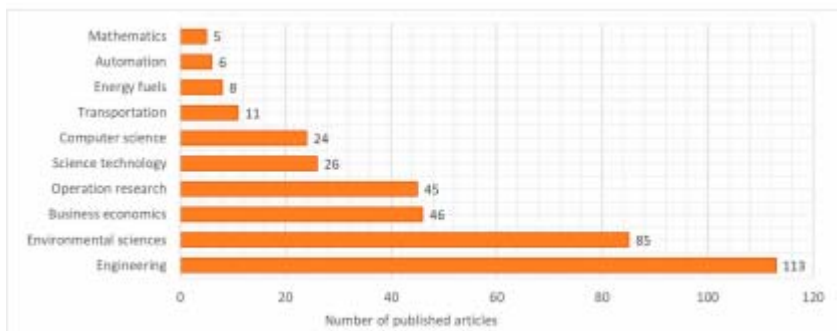


Рисунок 3. Классификация статей с учетом предметных областей на основе исследований в базе данных Web of Science с использованием ТЕМЫ: “отходы”, “логистика” и “сбор”

Пояснения к рисунку 3: Mathematics - математика, Automation - автоматика, Energy fuels – энергетические топлива, Transportation - транспорт, Computer science – компьютерные науки, Science technology – научные технологии, Operation research – исследование операций, Business economics – экономика бизнеса, Environmental sciences – науки об окружающей среде, Engineering - инженерия, Number of published articles – количество опубликованных статей

На рис. 4 демонстрируются проблемы проектирования и эксплуатации систем проектирования и эксплуатации сбора отходов с логистической точки зрения, которые исследовались в течение 20 прошлых лет. Первая статья в этой области была опубликована в 1994 г. в разделе управления запасами [12], и она была посвящена концепции “запасы – это отходы” в своевременных производственных процессах. Число опубликованных статей возрастало в последние 10 лет, и это подчеркивает важность этой области исследований.

Статьи анализировались с точки зрения научного значения. Самой обычной формой оценки статей с научной точки зрения является цитирование. На рис. 5 показаны 10 самых цитируемых статей с количеством цитирований.

Как демонстрируется на рис. 6, большинство статей было опубликовано в журналах с темами обращения с отходами и экологически чистых технологий, но значительная часть статей была принята для публикации в журналах, специализирующихся на вычислениях, исследовании операций и математике. Распределение журналов показывает, что проблемы проектирования и эксплуатации в системах обращения с отходами являются межотраслевыми

проблемами, когда не только технологические, но также экономические и другие аспекты должны приниматься в соображение.

Мы проанализировали опубликованные статьи с точки зрения категорий “Web of Science”. Мы проанализировали распределение статей в следующих категориях: науки об окружающей среде, инженерия окружающей среды, исследование операций, управленческие науки, экологически чистые и устойчивые научные технологии, промышленный инжиниринг, технология машиностроения, компьютерные науки, экологические исследования, искусственный интеллект в вычислениях, мультидисциплинарный подход, транспорт, экономика, энергетика, автоматизация и бизнес. Распределение категорий представлено на рис. 7. Как показывают категории, проектирование систем сбора отходов основано на методах оптимизации, а не только на экономической эффективности, и важными являются также экологические, экономические и социальные аспекты.

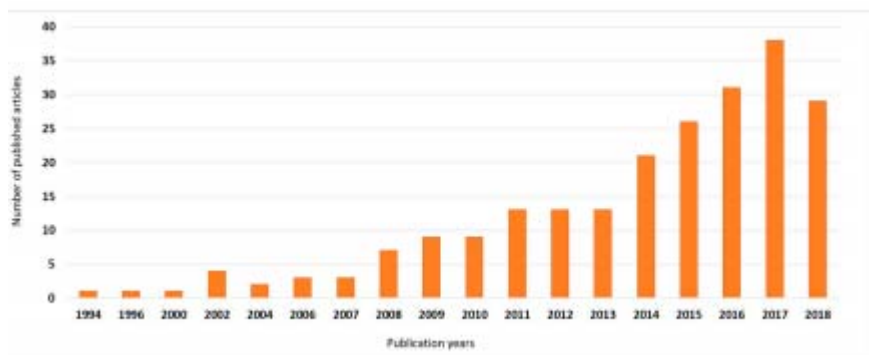


Рисунок 4. Классификация статей по году публикации на основе исследований “Web of Science”

Пояснения к рисунку 4: Number of published articles – количество опубликованных статей, Publication years – годы публикации

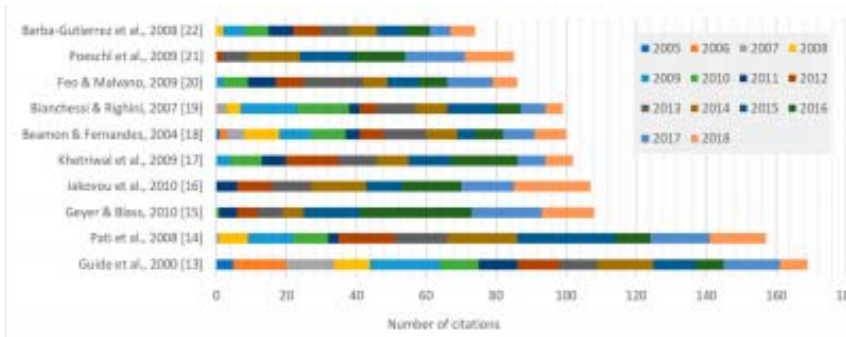


Рисунок 5. 10 самых цитируемых статей на основе исследований “Web of Science”

Пояснения к рисунку 5: Barba Guttirrez. et al. [22], Poeschl et al. [22], Feo & Malvano [20], Bianchessi & Righini [19], Beamon & Fernandes [18], Khetrival et. Al. [17], Iakovou et al. [16], Geyer & Blass [15], Pati et al. [14], Guide et al. [13], Number of citation – количество цитирований

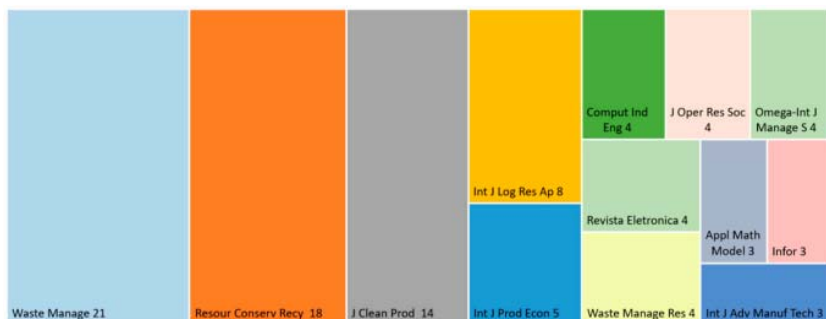


Рисунок 6. Распределение статей, относящихся к сбору отходов, на основе исследований “Web of Science”

Пояснения к рисунку 6: наименования журналов “Waste Management”, “Resource Conservation & Recycling”, Journal of Cleaner Production, International Journal of Engineering Research and Applications, International Journal of production economics, Computer Engineering India, Revista Electronica, Waste management & research, Journal of Operation Research Society of Japan, Applied Mathematical Modelling, International Journal of Management Science, Information System and Operational Research, International Journal of Advanced Manufacturing Technology

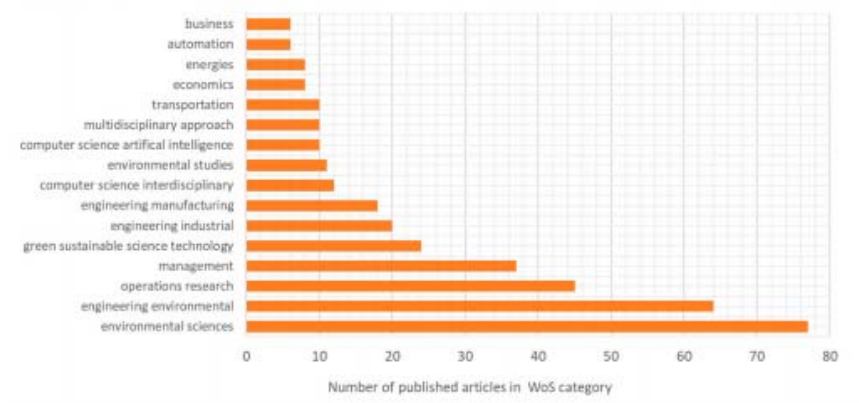


Рисунок 7. Распределение статей в соответствии с категориями Web of Science

Пояснения к рисунку 7: business - бизнес, automation - автоматика, energies - энергетика, economics - экономика, transportation - транспорт, multidisciplinary approach - мультидисциплинарный подход, computer science artificial intelligence - искусственный ин-

теллект в компьютерных науках, environmental studies – экологические исследования, computer science interdisciplinary – междисциплинарные компьютерные науки, engineering manufacturing – технология машиностроения, engineering industrial – организация производства, green sustainable science technology – экологичные и устойчивые научные технологии, management – менеджмент, operation research – исследование операций, engineering environmental – инженерная среда, environmental sciences – науки об окружающей среде

2.3. Анализ содержания

В литературе приведены данные о широком наборе методов, которые используются для решения проблем проектирования и эксплуатации в системах обращения с отходами, типа целочисленного программирования⁸, методы принятия решений, эвристический⁹ и метаэвристический алгоритмы¹⁰, моделирование сети Петри¹¹, статистические подходы, моделирование и оптимизация на основе моделирования, линейное программирование с нечеткими параметрами или эмпирические исследования. Модель принятия многокритериальных решений на основе метода анализа иерархий (АНР)¹² была использована для оценки затрат и деловых контактов для важных решений, относящихся к проектированию сети обратной логистики¹³, с акцентированием внимания на решение о выборе места размещения [23]. Целочисленное линейное программирование типа смешанного целочисленного линейного программирования или многократного целочисленного программирования делает возможным проводить анализ и оценку систем обращения с отходами. Исследователи использовали смешанное целочисленное целевое программирование (MIGP) для анализа взаимоотношений между множеством целей сети распределения переработанной бумаги из макулатуры для определения места размещения объекта, маршрута и потока отходов в многоэлементной, многоступенчатой и многокомпонентной структуре принятия решений [14]. Модель многопериодного целочисленного программирования была использована для поддержки совместного анализа инвестиций и эксплуатационных затрат в замкнутой сети цепочки поставок, включая процессы, связанные с отходами [18]. В случае системы утилизации транспортных средств с выработанным ресурсом в Анкаре проектирование сети, включая различных субъектов экономической деятельности, было выполнено и поддержано с помощью модели смешанного целочисленного линейного программирования (MILP) [24]. Проблему проектирования двухступенчатой

⁸ Целочисленное программирование – задача математической оптимизации или выполнимости, в которой некоторые или все переменные должны быть целыми числами

⁹ Эвристический алгоритм – алгоритм решения задачи, включающий практический метод, не являющийся гарантированно точным, но достаточный для решения поставленной задачи.

¹⁰ Метаэвристические алгоритмы объединяют в себе один или более эвристических методов, которые опираются на стратегию более высокого уровня

¹¹ Сеть Петри – математический аппарат для моделирования динамических дискретных систем, предложенный немецким математиком Карлом Петри.

¹² Метод анализа иерархий – математический инструмент системного подхода к сложным проблемам принятия решений.

¹³ Обратная логистика – часть процесса управления цепочкой поставок, которая включает в себя все виды деятельности, связанные с движением товара обратно на склад поставщика или продавца, логистикой, контролем и аннулированием возврата.

системы обращения с муниципальными отходами для стекла, бумаги, пластика и органических материалов можно описать как сложный набор проблем охвата и максимальной выполнимости, которая была решена для города Барселоны с пригородами с генетическим алгоритмом¹⁴ (GA) и вероятностным жадным алгоритмом¹⁵ (GRASP) [25]. Проблема периодического маршрута транспортных средств с промежуточными объектами (PVRP-IF) при сборе фракций муниципальных отходов в виде стекла, металлов, пластика и бумаги была решена с помощью метода гибридного решения, который основан на поиске с чередующимися окрестностями¹⁶ (VNS) и динамическом программировании [26]. Исследователи описали и провели сравнение конструктивных алгоритмов типа алгоритмов локального поиска¹⁷ и алгоритмов запрещенного поиска¹⁸ с окрестностями на основе обмена кривыми и обмена узлами, и в то же самое время с использованием различных и взаимодействующих перечней запретов для решения проблемы определения маршрутов транспортных средств с комплексным распределением товаров и цепочкой поставки собранных отходов [19]. Упомянутые методы оптимизации делают оптимизацию системы обращения с отходами возможной с логистической и технологической точки зрения. Например, имеется возможность рассчитать оптимальное отношение различных имеющихся технологий обращения с отходами, типа сжигания, компостирования и полигонного депонирования [27]. В случае стохастических параметров и неопределенной обстановки можно использовать методы на основе нечеткой логики¹⁹, типа вероятностной модели с нечетким интервалом²⁰, нечеткого целевого²¹ программирования или моделирование с нечеткой раскрашенной сетью Петри²². Комплексные сети прямых и обратных цепочек поставок характеризуются широким диапазоном неопределенных параметров, и для поиска надежного проектирования сети в случае черной металлургии использовали двухцелевое интервальное нечеткое целочисленное ли-

¹⁴ Генетический алгоритм – эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искоемых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе.

¹⁵ Жадный алгоритм – алгоритм, заключающийся в принятии локально оптимальных решений на каждом этапе, допуская, что конечное решение также окажется оптимальным.

¹⁶ Метод поиска чередующихся окрестностей состоит в последовательном изучении набора предопределенных окрестностей для получения лучшего решения. Метод используется в комбинаторной оптимизации.

¹⁷ Алгоритмы локального поиска – группа алгоритмов, в которых поиск ведется только на основании текущего состояния, а ранее пройденные состояния не учитываются и не запоминаются.

¹⁸ Поиск с запретами или табу-поиск – мета-алгоритм поиска, использующий методы локального поиска, применяемые для математической оптимизации.

¹⁹ Нечеткая логика – раздел математики, являющийся обобщением классической логики и теории множеств, базирующийся на понятии нечеткого множества, как объекта с функцией принадлежности элемента к множеству, принимающей любые значения в интервале [0, 1].

²⁰ Нечеткий интервал – инструмент, позволяющий оценивать качество гипотезы в зависимости от ее длины. Он может измеряться в единицах расстояния или символах.

²¹ Под нечеткой целью подразумевается цель, которую можно описать как нечеткое множество в соответствующем пространстве.

²² Раскрашенная сеть Петри – сеть Петри (см. сноску 11), каждой из фишек которой приписано значение, исторически называемое цветом.

нейное программирование с вероятностными ограничениями [28]. Основная цель применения метода нечеткого целевого программирования состояла в оптимизации многоцелевой, многоступенчатой, многопрофильной и многопериодной цепочки поставок с замкнутым циклом как модели оптимизации неопределенной сети [29]. Исследователи использовали метод прогнозирования с нечеткой раскрашенной сетью Петри (FCPN), который сосредоточен на проблемах размещения объекта для моделирования неопределенных процессов модели действия для продуктов в стадии спада жизненного цикла [30]. Гибридный алгоритм²³, сочетающий метаэвристику (см. сноску 10) с моделированием, является подходящим инструментом для анализа различных проблем сбора с большим количеством пунктов сбора и стохастических параметров [31].

Несколько сценариев и конкретных исследований, которые относятся к различным типам сбора отходов и проблемам обращения с отходами, были оценены и проанализированы для сравнения воздействий технологий, логистики, человеческих ресурсов, политики и социальных аспектов. Конкретные исследования показывают, что сбор муниципальных отходов, отходов электротехнического и электронного оборудования и транспортных средств с выработанным ресурсом зависит от оптимальной структуры системы обращения с отходами, когда, среди прочего, должны быть проанализированы, а затем оптимизированы сеть утилизации, процесс сбора и размещения. В португальском конкретном исследовании показано, что типовая модель МПР может обеспечить поддержку планам стратегического расширения компаний в секторе обращения с отходами [32], в особенности с точки зрения сети утилизации. Трехстадийный иерархический подход был предложен для оптимизации проектирования сети обратной логистики в испанском автономном сообществе Галисия, с концентрацией внимания на проблеме размещения объекта, проблеме составления маршрутов для парка транспортных средств и проблемах составления маршрута сбора [33]. В реальном конкретном исследовании, проведенном в Анкаре, описаны сложности проблем в цепочке сбора транспортных средств с выработанным ресурсом, в особенности с точки зрения предложенной новой системы утилизации транспортных средств с выработанным ресурсом [24]. Воздействие неопределенной информации демонстрируется на примереконкретного исследования в Гонконге, где были описаны трудности с проектированием надлежащей инфраструктуры для сбора и рециклинга отходов. В исследовании показано, что сектор торговли отходами электротехнического и электронного оборудования повышает эту неопределенность, и, поэтому, разработка схемы ответственности производителя является важной вехой в повышении эффективности сбора [34]. Как было продемонстрировано на примере конкретного исследования в Дании, проектирование и контроль систем обращения с отходами должны быть эффективными и справедливыми для всех партнеров, включая конечных потребителей, заказчиков, муниципалитеты, компании в секторе сбора и рециклинга отходов [35]. В промышленно развитых странах реализация всей системы обращения с отходами от выполнения директив по обращению с отходами до эксплуатации сетей сбора и утилизации была осуществлена в короткие сроки, но возрастающая информированность должна приводить к более благоприятному для окру-

²³ Гибридный алгоритм – алгоритм, который объединяет два или более алгоритмов, которые решают одну и ту же проблему, либо выбирая один, либо переключаясь между ними.

жающей среды поведению [36]. В условиях Индустрии 4.0 системы обращения с отходами характеризуются возрастающим применением технологий Интернета вещей²⁴ (IoT), что приводит к повышению эффективности и надежности сбора и повторного использования отходов. Инструменты Географической информационной системы предлагаются для поддержки определения наилучших маршрутов сбора отходов, подходящего парка транспортных средств и логистических и технологических возможностей, использованных Органом управления столичным регионом Кампалы (Уганда) [37]. Итеграция технологий радиочастотной идентификации (RFID) в процессы сбора и утилизации может повысить эффективность и доступность всей системы обращения с отходами [38], в то время как в Италии используют умные контейнеры²⁵ для сбора электронных отходов для повышения эффективности логистических процессов. Конкретное исследование на основе моделирования на Тайване было посвящено изучению факторов, которые влияют на конструкцию технологической линии для сбора свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Результаты исследования моделирования показывают, что анализ и оптимизация различных сценариев систем обращения с отходами повышают их экономическую эффективность, надежность и характеристики [40].

Примененные математические модели систем обращения с отходами представляют широкий набор подходов, типа составления маршрута транспортного средства, размещения объекта, размещения контейнера, моделирования сети или местоположения. Различные методы решения проблем составления маршрутов транспортных средств описаны в литературе: метод расчета полных затрат используется для оптимизации решения проблемы упорядоченного по пропускной способности маршрута одновременного распределения и сбора [41], эвристический метод запрещенного поиска используется для изменения маршрутов сбора, с последующим сравнением вариантов сбора отходов пластика с использованием в качестве показателя эффективности экономической эффективности [42], а эвристический алгоритм (см. сноску 9) используется для решения проблемы большого количества пробегов транспортного средства [43]. Специальные модели решения проблем маршрутизации являются проблемами с раздельными нагрузками и временным интервалом [44], проблемами составления периодических маршрутов для сбора отходов растительного масла [45] или проблемой периодического составления многоцелевого маршрута с множеством пунктов сбора с маршрутами в промежуточные пункты [46]. Маршрутизация является важной проблемой в области обращения с отходами, но на практике выбор транспортного средства и типа контейнера для отходов также связан с трудностями, поскольку функционирование систем сбора отходов и соответствующие затраты и выбросы находятся под влиянием выбранного для использования транспортного средства, прицепных тележек или мусоровозов с прессом. Однако во многих случаях маршрутизацию приходится проводить с имеющимся набором грузовиков, но управление парком транспортных

²⁴ Концепция вычислительной сети физических предметов (“вещей”), оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или внешней средой, рассматривающая организацию таких сетей как явление, способное перестроить экономические и общественные процессы, исключаящее из части действий и операций необходимость участия человека.

²⁵ Контейнеры, оснащенные датчиками, информирующими о заполненности контейнера отходами.

средств и инвестициями в различные типы транспортных средств также относится к важному компоненту оптимизации сбора отходов. Расположение объекта (для обращения с отходами) представляет собой широкий набор проблем обращения с отходами, поскольку сбор муниципальных отходов на значительной территории, на которой должны быть размещены различные объекты цепей поставок, типа территорий сбора муниципальных отходов и участков для проведения рециклинга, компостирования или сжигания [25]. Проблемы размещения объектов обычно интегрируются с определением требуемых мощностей, поскольку размещение участков сбора оказывает влияние на требующиеся мощности для сбора и предварительной переработки [47]. Однако размещение объекта обычно концентрируется на объектах системы сбора, но определение оптимального размещения пунктов для рециклинга и установок также является важной частью планирования системы оптимального обращения с отходами, как было продемонстрировано в конкретном исследовании в Пекине, Китай [48].

Системы обращения с отходами размещаются в динамичной среде, в которой воздействие окружающей среды на функционирование системы сбора и переработки отходов может быть проанализировано с использованием системной динамики. Исследователи использовали системную динамику для моделирования функционирования замкнутой системы цепочек поставок, а затем исследовали различные решения цепочек поставок [49]. Комплексный подход к системам обращения с отходами может быть представлен разными способами, а многоцелевая, многократная, многокомпонентная модель совокупного планирования производства представлена в экологически чистой цепочке поставок, с учетом сети обратной логистики. Комплексный подход включает возможность проведения рециклинга, способность к биоразложению, потребление энергии и аспекты риска, связанного с продуктом [50]. В случае комплексного проектирования многокритериальная модель оптимизации может быть решена с использованием различных моделей, от многоцелевого линейного программирования до метаэвристических алгоритмов на основе искусственного интеллекта. Применение линейного программирования привело к снижению затрат на логистику, потреблению искусственных топлив и образованию выбросов от транспорта [51]. Еще одним подходом к модели комплексного проектирования является сочетание размещения контейнера, размера контейнера и размещения, которое решается с помощью метаэвристического эффективного поиска с чередующимися окрестностями и точного метода на основе целочисленного смешанного линейного программирования [52]. Стохастические параметры и неопределенности системы обращения с отходами требуют новых моделей и методов решения [53, 54], как было показано в случае сбора инфицированных отходов лечебно-профилактических учреждений [55].

С помощью теории сетей можно анализировать системы обращения с отходами. Теория сетей является частью теории графов²⁶, а сеть обращения с отходами может быть определена как граф, в котором узлы и/или грани представляют объекты и отношения. Общая модель сети систем рециклинга продуктов включает все операции в сети утилизации и обращения с отходами для бывших в эксплуатации транспортных средств и повторного использования компонентов транспортных средств, таких как сбор, демонтаж, мо-

²⁶ Теория графов – раздел дискретной математики, изучающий графы. В общем смысле граф представляется как множество вершин, соединенных ребрами.

дернизация, переработка, рециклинг, размещение и повторное использование деталей [56, 57]. Поточковый анализ может содействовать проектированию всей цепочки поставок, поскольку анализ данных о поступающем потоке отходов на пункт сбора отходов может поддержать принять решение с логистической и технологической точки зрения. Специальный подход к решению об обращении с отходами включает аспекты выбора поставщика. В исследовании предложена модель, которая определяет приоритетные фракции и назначает поставщика для сбора каждой фракции [59].

Концептуальная структура, включая модели, методы и сценарии		
Цель	Области исследования	Конкретные исследования
● Многокритериальная [23]	● муниципальные твердые отходы [60, 71]	● сеть утилизации WEE в Португалии [32]
● Одновременный сбор и распределение [41, 76]	● WEEE ²⁷ [61, 62]	● транспортные средства с отработанным ресурсом в Турции [24]
● Затраты или прибыль [61, 77]	● шины [63]	● сеть утилизации WEE в Испании [33]
● Требуемая производительность [78]	● кулинарный жир [64, 65]	● WEEE в Гонконге [34]
● Экологическая и социальная [46, 79]	● отходы бытового пластика [66, 67]	● сеть сбора отходов в Дании [35] ● выполнение Директивы ЕС в Финляндии [36] ● сбор и размещение отходов в Кампале [37] ● моделирование системы сбора на Тайване [40]
● Выработка политики [80, 81]	● биомасса [16, 68]	
● Согласование образования и сбора [65]	● бумага [69]	
● Выработка стратегии [30]	● пищевая фракция [70]	
● Затраты по сравнению с выбросами углерода [53, 68, 82]	● отходы лечебно-профилактических учреждений [55]	
● Экономическая, экологическая и географическая [83, 84, 85]	● тара для повторного использования [72]	
	● батарейки электровелосипедов [74]	
	● ПЭТ-бутылки [75]	
	● мобильные телефоны [15]	
Модели, методы и инструменты		
● составление маршрута транспортного средства [41, 42, 43]	● процесс аналитической иерархии [23]	
● составление маршрута до промежуточного пункта [46]	● смешанное целочисленное целевое программирование [14]	
● проблема составления периодического маршрута транспортного средства [26]	● генетический алгоритм [25]	
● размещение места сбора [25]	● динамическое программирование [26]	
● место сбора [47]	● гибридный алгоритм [31]	
● многоступенчатая модель [48]	● моделирование нечеткой раскрашенной сети Петри [30]	
● системная динамика [49]	● нечеткое целевое программирование [29]	
● многоцелевое принятие решений [51]	● вероятностный жадный алгоритм [25]	
● размещение контейнеров и маршрут транспортного средства [52]	● оптимизационное моделирование [40, 86]	

Рисунок 8. Концептуальная структура опубликованных статей

²⁷ Отходы электротехнического и электронного оборудования.

Модели обращения с отходами имеют широкую область применения: муниципальные твердые отходы [60], отходы электротехнического и электронного оборудования [61, 62], жиры [63], кулинарный жир [64, 65], бытовые отходы пластика [66, 67], биомассу [16, 68], бумагу [69], пищевую фракцию [70], отходы лечебно-профилактических учреждений [55], муниципальные отходы в сельской местности [71], тару для повторного использования [72], совместный сбор отходов [73], батареи для электровелосипедов [74], ПЭТ-бутылки (из полиэтилентерефталата) и мобильные телефоны [15]. Концептуальная структура опубликованных статей приведена на рис. 8.

2.4. Выводы из литературного обзора

Более 50% статей было опубликовано за последние четыре года. Это указывает на научный потенциал проектирования систем обращения с муниципальными отходами. Статья, которая направлена на оптимизацию систем обращения с отходами, сосредоточена на затратах, эффективности, надежности, но ни в одной статье не стояла цель в идентификации оптимизационных аспектов систем сбора муниципальных отходов с точки зрения экологической информированности и общественного здравоохранения, и ни в одной из них не описана система обращения с отходами как кибер-физическая система. Поэтому проектирование систем сбора отходов все еще требует большего внимания и исследований. Было выявлено, что математические модели и алгоритмы являются важными инструментами в проектировании и контроле проблем сбора и переработки отходов, так как проблеме оптимизации определяет широкий набор моделей.

В литературе описан широкий круг моделей сбора отходов, но эти модели обычно основаны на традиционных технологиях и интеллектуальных решениях, которые не принимаются в рассмотрение. Преобразование традиционных систем сбора отходов в кибер-физическую систему с использованием технологий Индустрии 4.0 создает возможности для сбора большего количества данных о системе и достижения более надежных решений. В соответствии с этим постулатом основным вопросом исследования является модклирование и анализ кибер-физических систем сбора муниципальных отходов с использованием алгоритма летучих мышей.

Как следствие, основные положения этой статьи следующие: (1) модель схемы кибер-физической системы сбора отходов; (2) математическое описание аспектов проектирования, целевых функций и ограничения, связанные с временным промежутком и производительностью; (3) результаты вычислений описанной модели с различными наборами данных и сценариями.

3. Модель кибер-физической схемы сбора отходов

Методология исследования в нашей статье основана на двух различных типах систем сбора отходов. Первый тип систем сбора отходов представлен традиционным сбором отходов, в то время как второй тип представляет собой преобразование традиционного сбора отходов в кибер-физическую систему с использованием технологий Индустрии 4.0, интеллектуальных технологий для повышения производительности, гибкости, доступности и экономической эффективности процессов сбора. Частота маршрутов сбора отходов устанавливается заранее на основе установленного плана [87], и она не зависит от уровня отходов в контейнерах в традиционных системах образования отходов. В этом случае трудно достичь высокого коэффициента ис-

пользования мусоровозов, в то время как все требования для сбора отходов выполняются. Конкретные исследования указывают, что в промышленной атмосфере контейнеры могут быть оснащены датчиками уровня и беспроводным оборудованием для связи. Провайдер услуг по сбору отходов имеет доступ к информации в реальном масштабе времени о состоянии каждого контейнера, и маршруты сбора могут быть спланированы в зависимости от уровня отходов в контейнерах [87, 88]. Еще в одном исследовании подчеркивается, что в промышленной атмосфере для решения проблемы неопределенности в объемах размещаемых отходов и флуктуаций в связи с повседневными и сезонными эффектами необходима упреждающая политика, которая будет балансировать рабочую загрузку с течением времени [89]. Кибер-физическая модель сбора отходов, которая представлена на рис. 9, включает заказчиков, поставщиков логистических и технологических услуг. Дистанционный мониторинг уровней заполнения контейнеров создает возможности для управления всем процессом сбора, в зависимости от имеющегося объема отходов в домовладениях.



Рисунок 9. Облако системы сбора отходов и его связи с кибер-физической системой сбора отходов, включая заказчиков, мусоровозы, участки обращения с отходами и поддержку заказчика

Пояснения к рисунку 9: Customer's home – место пребывания заказчика, Garbage bin – контейнер для мусора, RFID tag in garbage bin – метка радиочастотной идентификации на контейнере для мусора, Customers - заказчики, PC or mobil – персональный компьютер или мобильный телефон, Garbage truck depot – парк мусоровозов, Garbage truck – мусоровоз, GPS – глобальная система позиционирования, RFID – радиочастотная идентификация, Waste collection cloud – облако системы сбора отходов, garbage volume forecasting – прогнозирование объема мусора, Database – база данных, Algorithms & Apps – алгоритмы и приложения, Web page – веб-страница в Интернете, Access point – точка доступа, Cloud site – облачный сайт, planning, scheduling – планирование, составление графика, loading position – место загрузки, validate operations – проверка достоверности, stock processing capacity – складские мощности, garbage truck driver – водитель мусоровоза, Handheld / RFID or barcode reader – обработка/считывание радиочастотных меток или штрих-кода, planning, troubleshooting, scheduling – планирование, разрешение проблем, составление графика, Waste management sites – участки для обращения с отходами, Sorting – сортировка, Recycling - рециклинг, Incineration - сжигание, Composting – компостирование

Дистанционный мониторинг умных контейнеров (см. сноску 25) может быть выполнен либо как мониторинг в реальном масштабе времени с помощью беспроводной передачи данных, либо как отсроченный автономный мониторинг без доступа к Интернету, когда собранные данные передаются с помощью считывателя радиочастотных меток. Данные, собранные с умных контейнеров, загружаются в сервис хранения данных в облаке²⁸. Другая сторона этой обратной цепочки поставок может включать различные методы обращения с отходами, типа сброса в отвал, полигонного депонирования, особенно в странах с низким душевым уровнем дохода [90], но в рамках этой модели вследствие ограниченных мощностей переработки авторы работы сконцентрировались на технологиях рециклинга и сжигания. Имеющиеся мощности для переработки также доступны в облаке путем мониторинга в реальном масштабе времени. Связь между домовладениями (источниками образования отходов) и участками для переработки отходов представлена мусоровозами, водители которых несут ответственность за сбор и транспортирование муниципальных отходов на участки для переработки. Планирование и оптимизация маршрутов для сбора отходов выполняются с помощью алгоритмов оптимизации в компоненте облака для сбора отходов. Общая целевая функция планирования процесса сбора состоит в повышении экологической информированности о сокращении потребления энергии и выбросов загрязняющих веществ мусоровозами, и в то же самое время в синхронизации процесса сбора с имеющимися перерабатывающими мощностями. Водители мусоровозов осуществляют проверку опорожнения контейнеров с отходами.

Модель сбора муниципальных отходов включает m домовладений и n участков для переработки. В парке мусоровозов имеется q мусоровозов, которые могут осуществлять услуги по сбору. На участках для переработки имеются определенные мощности по хранению, на которых прибывающие отходы можно сортировать для последующей переработки. Искомые переменные этой модели следующие: распределение домохозяйств по маршрутам мусоровозов и составление графика работы мусоровозов, в зависимости от уровня заполнения контейнеров и имеющихся мощностей на участках переработки. Интеграция этого распределения и проблемы составления графика представлена в проблеме оптимизации в рамках решения задачи недетерминированной полиномиальной сложности (NP)²⁹.

Имея это в виду, мы определяем следующие параметры, описывающие кибер-физическую систему сбора отходов:

- b_i – местоположение заказчика i , где $i \in (1, 2, \dots, m)$;
- p_j – местоположение участка для переработки j , где $j \in (1, 2, \dots, n)$;
- d_k – местоположение парка мусоровозов k , где $k \in (1, 2, \dots, q)$

²⁸ Облако для хранения данных (облачное хранилище) – специализированная инфраструктура для размещения данных, к которой пользователь получает доступ через сеть.

²⁹ В теории алгоритмов классом NP (недетерминированный полином) называют множество задач разрешимости, решение которых можно проверить с помощью компьютера за время, не превосходящее некоторого многочлена от размера входных данных, при наличии некоторых дополнительных сведений (так называемого *сертификата решения*)

Целевая функция проблемы описывает минимизацию использования энергии в процессе сбора:

$$\min U = U^{DH} + U^{HH} + U^{HT} + U^{TD} + U^{TH} \quad (1)$$

Здесь U^{DH} – энергия, используемая мусоровозом от парка мусоровозов до первого домовладения, в котором должны быть собраны отходы (начальная грань маршрута сбора), U^{HH} – используемая мусоровозом между домохозяйствами (внутренние грани среди вершин, представляющих домовладения), U^{HT} – энергия, используемая мусоровозом от последнего домовладения в маршруте сбора до участка переработки, U^{TD} – энергия, используемая мусоровозом от участка переработки до парка мусоровозов (заключительная грань маршрута сбора), U^{TH} – энергия, используемая мусоровозом от участка переработки до следующего домовладения (начальная грань последующего маршрута сбора) (см. рис. 10). Используемая энергия относится к потреблению мусоровозами дизтоплива, в зависимости от протяженности маршрутов и загрузки.

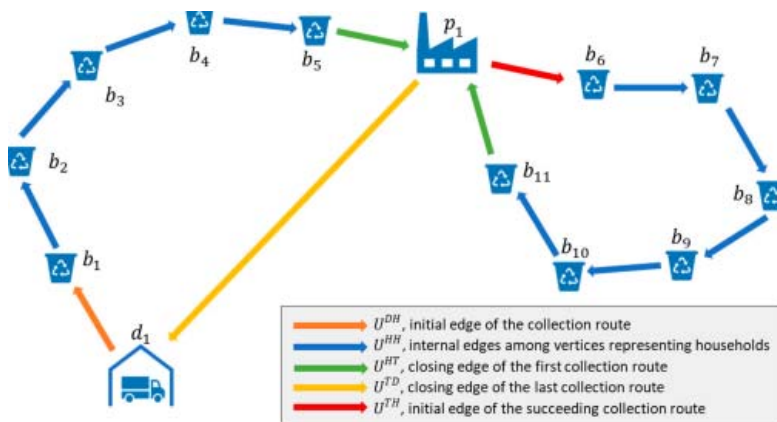


Рисунок 10. Маршрут сбора как граф, на котором вершины представляют домовладения, участки переработки и парк мусоровозов, в то время грани соответствуют транспортным маршрутам (обозначения в прямоугольнике приведены в предыдущем тексте)

Первая часть функции потребления энергии (1) включает суммарное потребление энергии мусоровозом между парком мусоровозов и первым по графику домовладением. Используемая энергия является функцией удельного потребления энергии мусоровозом без загрузки и длины маршрута между парком мусоровозов и первым по графику домохозяйством.

$$U^{DH} = \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{i=1}^m \vartheta_{k,\alpha} \cdot l_{k,i}(d_k, b_i) \cdot x_{k,\alpha,i}^{DH} \quad (2)$$

Здесь $\vartheta_{k,\alpha}$ – удельное потребление энергии мусоровозом a от парка мусоровозов k до первого домовладения по маршруту сбора, $l_{k,i}$ – длина маршрута между парком мусоровозов k и первым домовладением, определенным для мусоровоза a , а $x_{k,\alpha,i}^{DH}$ – матрица назначений маршрутов сбора до первого домовладения на начальной грани маршрута сбора.

Вторая часть функции потребления энергии (1) включает потребление энергии мусоровозами между домовладениями, исключая маршрут от парка мусоровозов до домовладений и маршруты от домовладений до участков переработки.

$$U^{HH} = \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{\beta=1}^{n_\alpha} \sum_{\gamma=1}^{n_\beta} \sum_{i=1}^m \vartheta_{k,\alpha}^* \left(q_{k,\alpha,\beta,\gamma} \right) \cdot l_{k,\alpha,\beta} \left(B_{k,\alpha,\beta} \right) \cdot x_{k,\alpha,\beta,\gamma,i}^{HH} \quad (3)$$

Здесь $\vartheta_{k,\alpha}^*$ – удельное потребление энергии мусоровозом a от парка мусоровозов k между домовладениями, $q_{k,\alpha,\beta,\gamma}$ – загрузка мусоровоза, объезжающего назначенные домовладения $\gamma^{t,b}$, $l_{k,\alpha,\beta}$ – протяженность маршрута сбора β от парка мусоровозов k между назначенными домовладениями, $B_{k,\alpha,\beta}$ – группа назначенных домовладений для маршрута сбора β от парка мусоровозов k , а $x_{k,\alpha,\beta,\gamma,i}^{HH}$ – матрица назначений до маршрутов сбора.

Третья часть функции потребления энергии (1) включает потребление энергии мусоровозами от последнего домовладения в маршруте сбора до участка переработки:

$$U^{HT} = \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{\beta=1}^{n_\alpha} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \vartheta_{k,\alpha}^* \left(q_{k,\alpha,\beta,n_\beta} \right) \cdot l_{k,\alpha,\beta,j} \left(b_i, p_j \right) \cdot x_{k,\alpha,\beta,n_\beta,i}^{HT} \cdot x_{k,\alpha,\beta,j}^T \quad (4)$$

Здесь $\vartheta_{k,\alpha}^*$ – удельное потребление энергии мусоровозом a от парка мусоровозов k от последнего назначенного домовладения в маршруте сбора до участка переработки j , $q_{k,\alpha,\beta,n_\beta}$ – загрузка мусоровоза a , объезжающего назначенное домовладение в маршруте сбора β от парка мусоровозов k , $l_{k,\alpha,\beta}$ – протяженность маршрута сбора β от парка мусоровозов k между назначенными домовладениями, $x_{k,\alpha,\beta,n_\beta,i}^{HT}$ – матрица назначений домовладения до мар-

прутов сбора как конечной грани маршрута, а $x_{k,\alpha,\beta,j}^T$ – матрица назначений участков переработки до маршрутов сбора.

Четвертая часть функции потребления энергии (1) включает суммарное потребление энергии мусоровозом между участками переработки и парком мусоровозов:

$$U^{TD} = \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h v_{k,\alpha} \cdot l_{k,j} (d_k, p_j) \cdot x_{k,\alpha,n\beta,j}^T \quad (5)$$

Здесь $l_{k,j}$ – протяженность маршрута между парком мусоровозов k и участком переработки j , а $x_{k,\alpha,n\beta,j}^T$ – матрица назначений маршрутов сбора и участков переработки.

Пятая часть функции потребления энергии (1) включает суммарное потребление энергии мусоровозом между участками переработки и первым назначенным домовладением последующего маршрута сбора:

$$U^{TH} = \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{\beta=2}^{n_\alpha} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m v_{k,\alpha} \cdot l_{k,j,i} (p_j, b_i) \cdot x_{k,\alpha,\beta,1}^{TH} \cdot x_{k,\alpha,\beta-1,j}^T \quad (6)$$

Решение описанной выше проблемы комплексного плана-графика и назначения связано ограничениями, которые относятся к временному промежутку и производительности. Временной промежуток соответствующих ограничений определен в случае домовладений и участков переработки, в то время как ограничения по производительности можно определить как для мусоровозов, так и участков переработки.

Ограничение 1: производительность участков переработки ограничена, и нет возможности ее повысить.

$$\forall j: \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{\gamma=1}^{n_\beta} \sum_{\beta=1}^{n_\alpha} \sum_{i=1}^m q_i^{HH} \cdot \left(x_{k,\alpha,i}^{DH} + x_{k,\alpha,\beta,\gamma,i}^{HH} + x_{k,\alpha,\beta,1}^{TH} \right) \cdot x_{k,\alpha,\beta,j}^T \leq c_j^{P_{\max}} \quad (7)$$

Здесь $c_j^{P_{\max}}$ – верхний предел производительности переработки на участке переработки j

Ограничение 2: мы можем определить предельную грузоподъемность для мусоровозов, но нет возможности превысить верхний предел грузоподъемности:

$$\forall k, \alpha, \beta: \sum_{\gamma=1}^{n_{\beta}} \sum_{i=1}^m q_i^{HH} \cdot \left(x_{k, \alpha, i}^{DH} + x_{k, \alpha, \beta, \gamma, i}^{HH} + x_{k, \alpha, \beta, 1}^{TH} \right) \cdot x_{k, \alpha, \beta, j}^T \leq c_{k, \alpha}^{T_{\max}} \quad (8)$$

Здесь $c_{k, \alpha}^{T_{\max}}$ – верхний предел производительности на участке переработки j , а q_i^{HH} – количественный объем отходов в домовладении i и $c_{k, \alpha}^{T_{\max}}$ – грузоподъемность мусоровоза в парке мусоровозов.

Ограничение 3: мы можем определить временные рамки для времени поставки до участков переработки, но не можем превысить верхний и нижний предел временных рамок:

$$\tau_j^{D_{\min}} \leq t_{k, \alpha}^{INI} + t_{k, \alpha}^{DH} + \sum_{\beta=1}^u \left(t_{k, \alpha, \beta, j}^{HT} + t_{k, \alpha, \beta, j}^{TH} \right) + \sum_{\gamma=1}^{n_{\beta}} t_{k, \alpha, \beta, \gamma}^{TR} + t_{k, \alpha, \beta, \gamma}^{LO} + t_{k, \alpha, \beta, \gamma}^{VA} \leq \tau_j^{D_{\max}} \quad (9)$$

Здесь $t_{k, \alpha}^{INI}$ – время отправки мусоровоза a из парка мусоровозов k , $\tau_j^{D_{\min}}$ и $\tau_j^{D_{\max}}$ – верхний и нижний предел временных рамок для доставки на участок переработки после сбора отходов из домовладений, $t_{k, \alpha}^{DH}$ – время транспортирования от парка мусоровозов до первого домовладения в маршруте сбора мусоровозом a из парка мусоровозов k , $t_{k, \alpha, \beta, j}^{HT}$ – время транспортирования от последнего домовладения в маршруте сбора до участка переработки, $t_{k, \alpha, \beta, j}^{TH}$ – время транспортирования от участка переработки до первого домовладения в последующем маршруте сбора, $t_{k, \alpha, \beta, \gamma}^{TR}$ – время транспортирования между домовладениями, $t_{k, \alpha, \beta, \gamma}^{LO}$ – требуемое время за-

грузки мусоровоза, $t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{VA}$ – требуемое время для подтверждения и управления загрузкой в домохозяйствах и u – идентификация маршрута сбора, который назначается до участка переработки j .

Ограничение 4: мы можем определить временные рамки для графика опорожнения контейнеров, но не можем превысить верхний и нижний предел временных рамок:

$$\tau_i^{E_{\min}} \leq \tau_i^E \leq \tau_i^{E_{\max}} \quad (10)$$

Здесь $\tau_1^E = \tau_1^E$, если домовладение назначено для первого маршрута сбора как первое по пути домовладение, $\tau_2^E = \tau_2^E$ – если домовладение назначено для первого маршрута сбора как не первое по пути домовладение и $\tau_3^E = \tau_3^E$ – если домовладение назначено не для первого маршрута сбора, где

$$\tau_1^E = t_{k,\alpha}^{INI} + t_{k,\alpha}^{DH} \quad (11)$$

$$\tau_2^E = t_{k,\alpha}^{INI} + t_{k,\alpha}^{DH} + \sum_{\gamma=2}^{n_1} t_{k,\alpha,1,\gamma}^{TR} + t_{k,\alpha,1,\gamma}^{LO} + t_{k,\alpha,1,\gamma}^{VA} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tau_3^E = & t_{k,\alpha}^{INI} + t_{k,\alpha}^{DH} + t_{k,\alpha,z,j}^{TH} + \sum_{\beta=1}^{z-1} \left(t_{k,\alpha,\beta,j}^{HT} + t_{k,\alpha,\beta,j}^{TH} \right) + \\ & + \sum_{\beta=1}^{z-1} \sum_{\gamma=1}^{n_\beta} \left(t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{TR} + t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{LO} + t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{VA} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь $\tau_j^{D_{\min}}$ и $\tau_j^{D_{\max}}$ – нижний и верхний предел временных рамок для доставки до участка переработки после сбора отходов из домовладений, $\tau_{k,\alpha}^{DH}$ – время транспортирования от парка мусоровозов до первого домовладения первого маршрута сбора мусоровозом a от парка мусоровозов k , $t_{k,\alpha,\beta,j}^{TH}$ – время транспортирования от участка переработки до первого домовладения в последующем маршруте сбора, $t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{TR}$ – время транспорти-

рования между домовладениями, $t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{LO}$ – требуемое время загрузки мусоровоза, а $t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{VA}$ – требуемое время для подтверждения и управления грузкой в домохозяйствах.

Имеется два типа искоемых переменных: искоемые переменные задачи назначения, которые являются бинарными матрицами³⁰, в то время как искомая переменная проблемы составления графика является матрицей с реальными значениями. Матрицы назначения (14) определяют назначение опорожнения умных контейнеров в домовладениях для маршрутов сбора.

$$\begin{aligned} x_{k,\alpha,i}^{DH} \in (0,1) \wedge x_{k,\alpha,\beta,\gamma,i}^{HH} \in (0,1) \wedge x_{k,\alpha,\beta,n_\beta,i}^{HT} \in (0,1) \wedge \\ \wedge x_{k,\alpha,\beta,1}^{TH} \in (0,1) \wedge x_{k,\alpha,\beta,j}^T \in (0,1) \end{aligned} \quad (14)$$

Матрица составления графика маршрутов сбора представлена величиной $t_{k,\alpha}^{INI}$, которая определяет время отправления первого маршрута мусоровоза a от парка мусоровозов k :

$$t_{k,\alpha}^{INI} \in \mathbb{R} \quad (15)$$

Бинарный алгоритм оптимизации летучей мыши

Алгоритм летучей мыши (ВА) является представлением оптимизации методом роя частиц³¹ (PSO). Алгоритмы оптимизации методом роя частиц основаны на поведении роя животных. В литературе имеется широкий набор алгоритмов на основе поведения роя, типа алгоритма искусственной пчелиной колонии³²[91], поиска косяком рыб³³ [92], алгоритма летучей мыши [93], алгоритма крилей³⁴ [94], оптимизации выявления “черных дыр” [95], алгоритм “большого взрыва-большого сжатия”³⁵ [96], гравитационного поиска³⁶

³⁰ Бинарная матрица – матрица, элементы которой принадлежат множеству.

³¹ Метод роя частиц – метод численной оптимизации, для использования которого не требуется знать точного градиента оптимизируемой функции. Он оптимизирует функцию, поддерживая популяцию возможных решений, называемых частицами, и перемещая эти частицы в пространстве решений согласно простой формуле.

³² Один из полиномиальных эвристических алгоритмов для решения оптимизационных задач в области информатики и исследования операций.

³³ Действие алгоритма основано на поведении косяка рыб в реальных условиях поиска пищи.

³⁴ Действие алгоритма основано на поведении групп крилей (рачков), которые занимаются поиском пищи и хищничеством.

³⁵ Алгоритм основан на теории эволюции Вселенной, согласно которой сначала совершился большой взрыв, связанный с распределением частиц и энергии в пространстве, а затем произойдет большое сжатие, когда все частицы сожмутся в одну, расположенную в центре масс вселенной.

[97], алгоритма светлячков³⁷ [98], алгоритма опыления цветковых растений [99], муравьиного алгоритма³⁸ [100] и алгоритма дрозофилы³⁹ [101]. Летучие мыши являются млекопитающими из отряда рукокрылых. Это единственный вид млекопитающих, которые могут устойчиво летать. Летучие мыши более управляемые, чем птицы. Нетопырь-карлик (небольшая летучая мышь семейства гладконосых) использует эхолокацию для поиска пищи, избегания препятствий и поиска наскальных расщелин в темноте [102]. Алгоритм летучей мыши основан на роевом поведении маленьких летучих мышей. Роевое поведение маленьких летучих мышей основано на процессе корректировки их местоположения и скорости в многомерном пространстве поиска, представляющем многомерную задачу оптимизации. Мы определяем частоту, длину волны и интенсивность импульсного излучения, представляющие эхолокацию для каждой маленькой летучей мыши. Мы можем рассчитать частоту каждой маленькой летучей мыши следующим образом:

$$f_i = f_{\min} = \mu(f_{\max} - f_{\min}) \quad (16)$$

Здесь f_i – частота, генерируемая между равномерным частотным интервалом $f_{\min}$ и $f_{\max}$ а $\mu \in [0, 1]$ – равномерно распределенное значение.

Мы можем рассчитать скорость каждой маленькой летучей мыши в итеративном шаге t следующим образом:

$$v_i(t) = v_i(t-1) + f_i(v_i(t) - x^{OPT}(t)) \quad (17)$$

Здесь $v_i(t)$ – скорость маленькой летучей мыши в итеративном шаге t , а x^{OPT} – наилучшее глобальное решение в итеративном шаге t .

Мы можем рассчитать местоположение каждой маленькой летучей мыши в итеративном шаге t следующим образом:

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t) \quad (18)$$

Здесь $x_i(t)$ – местоположение маленькой летучей мыши в итеративном шаге t .

Однако алгоритмы летучей мыши пригодны для решения проблем непрерывной оптимизации, но имеются и математические методы для решения дискретной задачи с алгоритмом оптимизации летучих мышей, например, с использованием сигмоидальной функции⁴⁰ [103]. Мы можем рассчитать сигмоидную функцию, описывающую характерную “S”-образную кривую

³⁶ Гравитационный поиск – молодой алгоритм, который появился в 2009 г. и является логическим развитием метода центральной силы. В основе находятся законы гравитации и взаимодействия масс.

³⁷ Стохастический алгоритм, основанный на модели поведения роя светлячков.

³⁸ Алгоритм, основанный на идее коллективного поиска оптимальных путей муравьями.

³⁹ Алгоритм, основанный на знании структуры обонятельной системы плодовой дрозофилы.

⁴⁰ Сигмоидальная функция – гладкая монотонно возрастающая нелинейная функция, имеющая форму буквы “S”, которая часто применяется для “сглаживания” значений некоторой величины.

или сигмоидную кривую из скорости маленькой летучей мыши; затем можно откорректировать двоичную позицию следующим образом:

$$x_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } \theta < S(v_i(t)) \\ 1 & \text{if } \theta \geq S(v_i(t)) \end{cases} \quad (19)$$

Здесь $S(v_i(t))$ – сигмоидная функция, рассчитанная по скорости маленькой мыши:

$$S(v_i(t)) = \frac{e^{-v_i(t)}}{1 + e^{-v_i(t)}} \quad (20)$$

После глобального поиска мы можем провести местный поиск. Возможность местного поиска находится под влиянием частоты импульсного излучения. Если она больше некоторого определенного значения $r_i(t)$, можно осуществлять местный поиск. Местный поиск означает корректировку выбранного наилучшего решения после глобального поиска:

$$x^{OPT}(t) = x^{OPT}(t-1) + \omega L(t) \quad (21)$$

Здесь $\omega \in [0, 1]$ – равномерно распределенное случайное значение, а $L(t)$ – функция уровня звука, которую можно рассчитать следующим образом:

$$L_i(t) = L_i(t-1)\alpha \quad (22)$$

Частота импульсного излучения должна корректироваться после каждого местного поиска на основе следующего уравнения:

$$r_i(t) = r_i(0) \left(1 - e^{-\gamma t} \right) \quad (23)$$

Здесь α и γ – предопределенные константы [103].

В табл. 1 представлены результаты анализа эффективности алгоритма летучей мыши (ВА), который сравнивается с другими эвристическими алгоритмами [104]. Мы использовали сопоставительные функции [105] для проверки значения ошибки эвристических алгоритмов в 50 итеративных шагов.

Как показывают результаты эффективности эвристических алгоритмов, которые были оценены с сопоставительными функциями, алгоритм летучих мышей годится также для решения проблем оптимизации алгоритмов класса NP (см. сноску 29). В рамках следующей главы применение алгоритма летучей мыши будет показано для случая кибер-физических систем обращения с отходами.

Значения ошибки алгоритма летучих мышей (ВА) и трех других эвристических алгоритмов⁴¹

Сопоставительная функция [102]	ВНО*	GA**	HS***	ВА
Функция Экли ⁴²	$3,66 \times 10^{-7}$	$4,67 \times 10^{-6}$	$1,28 \times 10^{-7}$	$1,84 \times 10^{-8}$
Функция Букина №6 ⁴³	$2,45 \times 10^{-6}$	$5,45 \times 10^{-7}$	$9,08 \times 10^{-7}$	$4,57 \times 10^{-7}$
Cross-in-tray ⁴⁴	$8,55 \times 10^{-9}$	$7,32 \times 10^{-9}$	$6,98 \times 10^{-8}$	$1,04 \times 10^{-6}$
Функция Исома ⁴⁵	$1,18 \times 10^{-5}$	$2,09 \times 10^{-4}$	$8,18 \times 10^{-9}$	$6,73 \times 10^{-9}$
Eggholder function ⁴⁶	$5,50 \times 10^{-7}$	$3,12 \times 10^{-7}$	$1,98 \times 10^{-8}$	$8,11 \times 10^{-8}$
Функция Химмельбай ⁴⁷	$5,79 \times 10^{-8}$	$2,25 \times 10^{-6}$	$1,05 \times 10^{-8}$	$9,42 \times 10^{-7}$
Функция Леви ⁴⁸	$1,20 \times 10^{-6}$	$7,34 \times 10^{-8}$	$3,12 \times 10^{-8}$	$6,54 \times 10^{-5}$
Функция Матияса ⁴⁹	$9,12 \times 10^{-8}$	$1,78 \times 10^{-7}$	$6,70 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-7}$
Модифицированная сферическая функция Бесселя ⁵⁰	$2,21 \times 10^{-8}$	$1,93 \times 10^{-6}$	$2,40 \times 10^{-8}$	$4,25 \times 10^{-7}$
Функция трехгорбого верблюда ⁵¹	$1,51 \times 10^{-6}$	$4,17 \times 10^{-8}$	$7,79 \times 10^{-10}$	$5,79 \times 10^{-9}$

* оптимизация выявления черных дыр

**генетический алгоритм

***алгоритм поиска гармонии⁵²

5. Результаты и обсуждение сценарного анализа кибер-физических систем сбора отходов с акцентированием внимания на экологической информированности

В рамках этой главы 2 сценария будут демонстрировать возможности применения описанной выше математической модели и обосновывать применяемый алгоритм эвристической оптимизации с различными наборами данных. Оптимизационный алгоритм (1-15) следит за парком с различными грузовыми автомобилями, и мы будем также выбирать контейнеры различного размера, но сценарии упрощаются, чтобы сделать примеры как можно более привлекательными. В табл. 2 демонстрируется объем образующихся отходов в каждом домовладении в течение периода времени 10 дней. Мы используем эти объемы для анализа различных стратегий системы обращения с отходами в случае традиционной работы и в случае кибер-физической

⁴¹ После 50 итеративных шагов. Результаты ВА сравниваются с результатами в работе [101]

⁴² Функция Экли – невыпуклая функция, используемая для проверки производительности для алгоритмов оптимизации.

⁴³ Тестовая функция для проверки производительности для алгоритмов оптимизации.

⁴⁴ Мультимодальная, двумерная не выпуклая математическая функция.

⁴⁵ Функция Исома используется для онлайн оптимизации функции нескольких переменных.

⁴⁶ Функция, трудная для задач оптимизации из-за большого количества локальных минимумов.

⁴⁷ Мультимодальная функция двух переменных.

⁴⁸ Неотрицательная функция плотности распределения.

⁴⁹ Одномодальная двумерная выпуклая математическая функция.

⁵⁰ Функция, используемая при решении задач математической физики.

⁵¹ Мультимодальная двумерная не выпуклая математическая функция.

⁵² Алгоритм, навеянный процессами поиска музыкантами гармонии в музыке.

системы. Перерабатывающие мощности на участке переработки составляют 450 единиц объема (UV) в день, грузоподъемность мусоровоза составляет 930 UV, а объем загрузки контейнера составляет 120 UV. В этом случае мы используем только описанную выше эвристическую оптимизацию для составления маршрута мусоровозов, поскольку разработка графика сводится к статически последовательному планированию, и в настоящее время не имеется информации об уровне загрузки контейнеров.

Таблица 2

Исходные параметры сценариев: отходы, образующиеся в домовладениях⁵³

НН	Последовательность временных промежутков																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	15	19	14	23	39	40	36	28	11	36	18	11	19	33	37	27	40	27	25	11
2	10	35	24	19	40	30	26	0	26	19	32	20	7	27	24	40	10	4	2	21
3	40	25	4	38	39	6	33	30	9	14	14	15	17	13	13	6	1	25	18	6
4	36	12	37	37	39	38	11	12	37	4	7	18	33	10	33	2	14	30	20	38
5	27	38	21	35	35	31	22	17	18	23	1	14	3	23	29	27	23	8	24	14
6	1	3	36	35	35	30	15	39	8	37	12	21	36	26	39	32	23	7	3	38
7	33	1	29	35	29	16	29	35	31	30	23	0	37	21	41	28	8	32	9	9
8	21	1	31	9	16	13	32	36	35	20	23	34	42	34	32	35	31	8	11	22
10	33	10	4	22	38	28	30	14	33	15	1	22	32	40	27	32	20	6	5	30

НН – домовладение

5.1. Сценарий 1: маршруты периодического сбора в традиционной системе обращения с отходами

В случае 1 сценария система обращения с отходами реализуется как традиционная система сбора без использования технологий IoT. У координатора системы обращения с отходами не имеется информации в режиме реального времени относительно уровня отходов в контейнерах домовладений; поэтому процесс опорожнения контейнеров планируется как последовательность периодических маршрутов сбора. В таблице 3 показано расчетное образование отходов в домовладении в случае периодических маршрутов сбора раз в два дня.

Количественные значения в затусшеванных клетках показывают домовладения и временные серии, когда образующиеся отходы превышают вместимость контейнеров. Это означает, что мусоровозы будут собирать отходы позднее и контейнеры для отходов будут заполнены в следующих случаях: в четвертый временной промежуток трех клиентов, в восьмой временной промежуток один клиент и в шестнадцатый временной промежуток четыре клиента не были найдены вовремя; поэтому уровень услуг по сбору составил 84%, и клиенты хранили 94 единицы объема не в контейнерах во время проведения анализа. На рис. 11а показан объем отходов, которые транспортировались до участка переработки отходов. Вследствие недостаточного количества информации об уровне загрузки контейнеров и статического, периодического графика или маршрутов сбора перевозимый объем и имеющиеся мощности для переработки не синхронизированы. Как показано на рис. 11b, мощности для хранения должны быть доступны, чтобы гарантировалась переработка.

⁵³ Образующиеся объемы отходов приводятся в единицах объема (UV).

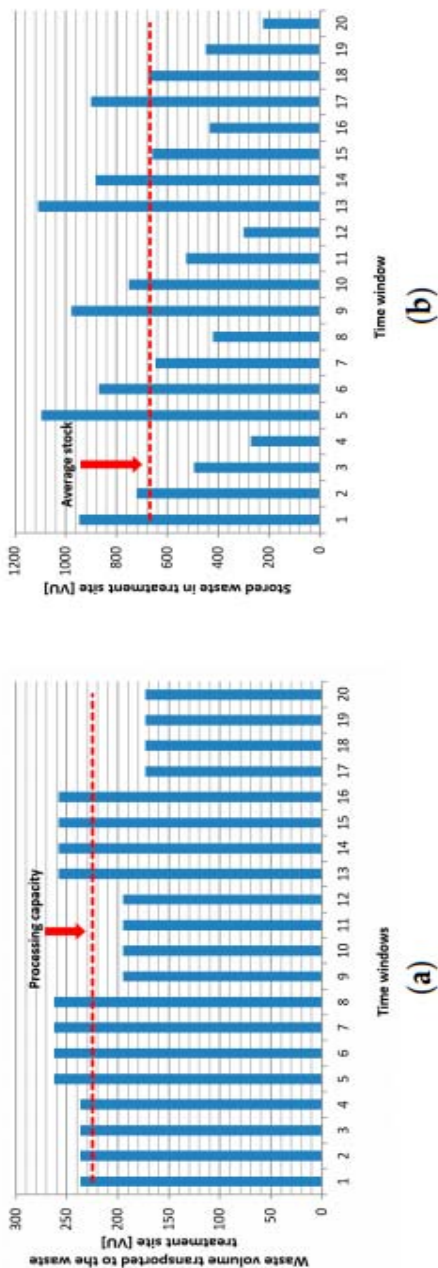


Рисунок 11. (а) Средний объем отходов между двумя транспортируемыми поставками

до участка переработки отходов в Сценарии 1. Поставка отходов не синхронизирована с мощностями по переработке, поскольку поставляемый объем отходов превышает требуемое количество во временные промежутки от 1 до 8 и от 13 до 16, в то время как не было достигнуто требуемое количество во временные промежутки от 9 до 12 и от 17 до 20.

(б) Инвентаризация отходов на участке переработки (среднее 668 UV, максимальное 1109 UV)

Пояснения к рисунку 11: Waste volume transported to the waste treatment site (UV) – объем отходов, транспортируемых до участка переработки (единиц объема), Processing capacity – перерабатывающие мощности, Time window – временные промежутки, Stored waste in treatment site (UV) – отходы, хранящиеся на участке переработки, Average stock – средний запас

Таблица 3

**Совокупный объем отходов, образующихся в домовладениях
(см. сноску 53)**

НН	Последовательность временных промежутков																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	15	34	48	71	39	79	115	143	11	47	65	76	19	52	89	116	40	67	92	103
2	10	45	69	88	40	70	96	96	25	45	77	97	7	34	58	98	10	14	16	37
3	40	65	69	107	39	45	78	108	9	23	37	52	17	30	43	49	1	26	44	50
4	36	48	85	122	39	77	88	100	37	41	48	66	33	43	76	78	14	44	64	103
5	27	65	86	121	35	66	88	105	18	41	42	56	3	26	55	82	23	31	55	69
6	1	4	40	75	35	65	80	119	8	45	57	78	36	62	101	133	23	30	33	71
7	33	34	63	98	29	45	74	109	31	61	84	37	58	99	127	8	40	49	58	
8	21	22	53	62	16	29	61	97	35	55	78	112	42	76	108	143	31	39	50	72
9	33	43	47	69	38	66	96	110	33	48	49	71	32	72	99	131	20	26	31	61
10	37	69	97	134	28	31	57	62	7	40	56	89	10	35	68	75	39	52	54	68

Последовательность во временных сериях означает полдня (понедельник до полудня = 1, понедельник после полудня = 2, вторник до полудня = 3, вторник после полудня = 4 и т.д.)

Алгоритм маршрутизации рассчитан для последовательности *парк мусоровозов* – b_5 – b_4 – b_3 – b_1 – b_{10} – b_8 – b_2 – b_9 – b_7 – b_6 – p_1 – *парк мусоровозов* как оптимальный маршрут сбора, когда общая протяженность пяти маршрутов сбора составила 103,056 км при расходе дизтоплива 32,98 л. Это потребление дизтоплива означает выбросы 86698 г CO₂, 2,63 г SO₂, 72,56 г CO, 39,58 г углеводородов (HC), 392,44 г NO_x и 3,298 г твердых частиц (PM). Из данных табл. 2 мы можем рассчитать, что в случае пяти последовательных маршрутов сбора будет собрано 947, 1049, 781, 1032 и 691 UV. Следовательно, в этом сценарии мусоровозы будут перегружены в трех случаях: четвертый, восьмой и шестнадцатый временные промежутки, а общая перегрузка составит 238 UV. Если перегрузка недопустима для мусоровозов, тогда должен быть пересмотрен график сбора (см. рис. 12).

После пересмотра графика маршрутов сбора в рамках времени проведения анализа протяженность общего маршрута сбора возросла на 15,36 км с дополнительным потреблением дизтоплива 4,92 л. Дополнительное потребление топлива, вызванное дополнительными маршрутами *парк мусоровозов* – b_6 – p_1 – *парк мусоровозов*, привело к росту выбросов CO₂ на 12935 г, CO – на 10,82 г, HC – на 5,90 г, NO_x – на 58,55 г и PM – на 0,49 г. В качестве резюме к Сценарию 1 в табл. 4 представлены расчетные выбросы для маршрутов сбора с целью демонстрации воздействия на окружающую среду.

Пояснения к рисунку 12: Y-coordinate of households, garbage truck depot and treatment site – ось Y – домовладения, парк мусоровозов и участок переработки, household – домовладение, treatment site – участок переработки, truck depot – парк мусоровозов, X-coordinate of households, garbage truck depot and treatment site – ось X – домовладения, парк мусоровозов и участок переработки

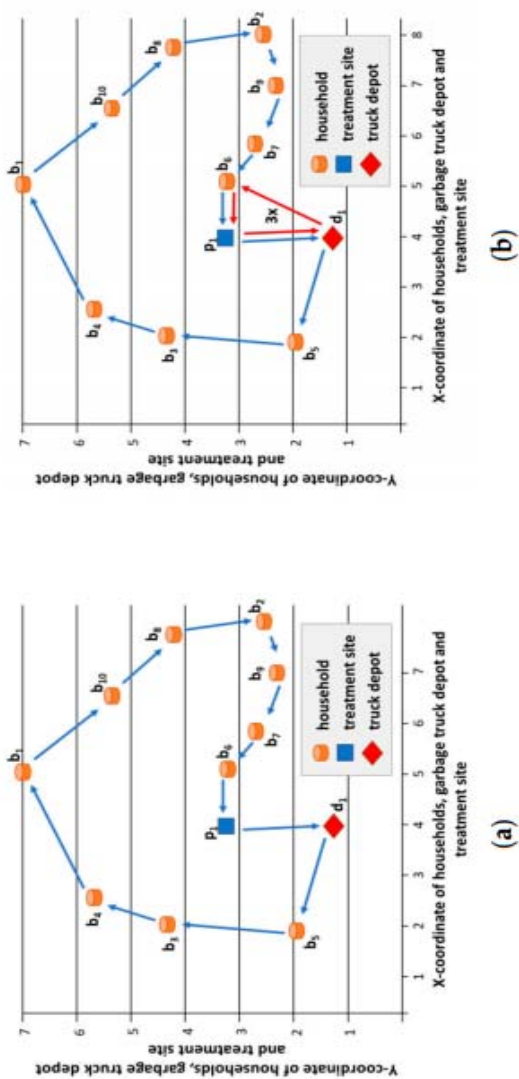


Рисунок 12. Маршруты сбора: (а) исходный маршрут;
 (б) если перегрузка мусоровоза не допустима, должны быть предусмотрены дополнительные маршруты сбора

Расчетные выбросы для маршрутов сбора

Маршруты	Длина маршрута	Выбросы					
		CO ₂	SO ₂	CO	HC	NO _x	PM
Удельные выбросы в г/л при потреблении топлива [106]	-	2629	0,08	2,2	1,2	11,9	0,1
Маршрут сбора с перегруженным мусоровозом	103,056	86698	2,63	72,56	39,58	392,44	3,29
Маршрут сбора без перегруженного мусоровоза	118,420	99633	3,02	83,38	45,48	450,99	3,78
Дополнительные маршруты для решения проблемы перегрузки	15,360	12935	0,39	10,82	5,90	58,55	0,49

Объемы образующихся отходов приведены в объемных единицах (UV)

5.2. Сценарий 2: Динамический график маршрута сбора в кибер-физической системе обращения с отходами

В случае второго сценария система обращения с отходами функционирует как кибер-физическая система, в которой технологии Индустрии 4.0 и парадигмы поддерживают оптимальное выполнение процессов. Информация в масштабе реального времени об уровне загрузки контейнеров имеется в облаке обращения с отходами, и существует возможность планирования маршрутов и определения домовладения для маршрутов сбора таким образом, что уровень услуг всей системы обращения с отходами можно увеличить. В рамках этого сценария мы рассчитали количество образующихся отходов, как показано в табл. 2.

Увеличенный маршрут и алгоритм графика использовали для расчета трех различных маршрутов для сбора всех образующихся в домовладениях отходов (см. рис. 13).

Второй, четвертый и пятый маршруты представляют собой последовательность *парк мусоровозов* – $b_5-b_3-b_4-b_1-b_{10}-b_2-b_9-b_7-b_6-p_1$ -*парк мусоровозов*, в которой общая протяженность этих трех маршрутов сбора составляет 61,83 км с потреблением дизтоплива 19,79 л. Первый маршрут сбора представляет собой последовательность *парк мусоровозов*– $b_5-b_3-b_4-b_1-b_{10}-b_2-b_9-b_7-b_6-p_1$ -*парк мусоровозов*, в которой общая протяженность маршрута сбора составляет 20,37 км с потреблением дизтоплива 6,52 л. Третий маршрут представляет собой последовательность *парк мусоровозов*– $b_5-b_3-b_4-b_1-b_{10}-b_8-b_2-b_9-b_7-b_6-p_1$ -*парк мусоровозов*, а его общая протяженность составляет 19,91 км с потреблением дизтоплива 6,37 л. При потреблении дизтоплива для всех маршрутов в рамках этого анализа будет образовываться выбросы CO₂ в количестве 85911 г, SO₂ – 2,61 г, CO – 71,89 г, HC – 39,21 г, NO_x – 388,87 г, твердых частиц (PM) – 3,26 г (табл. 5).

На рис. 14а показаны объемы отходов, которые транспортировались на участок переработки отходов. В рамках этого сценария процесс сбора оптимизирован с точки зрения экологической информированности, включая минимизацию выбросов мусоровозов и синхронизацию транспортируемых объемов отходов с имеющимися перерабатывающими мощностями. Как видно из рис. 14b, мощностей для хранения отходов должно быть достаточно, чтобы справиться с проблемой несинхронности.

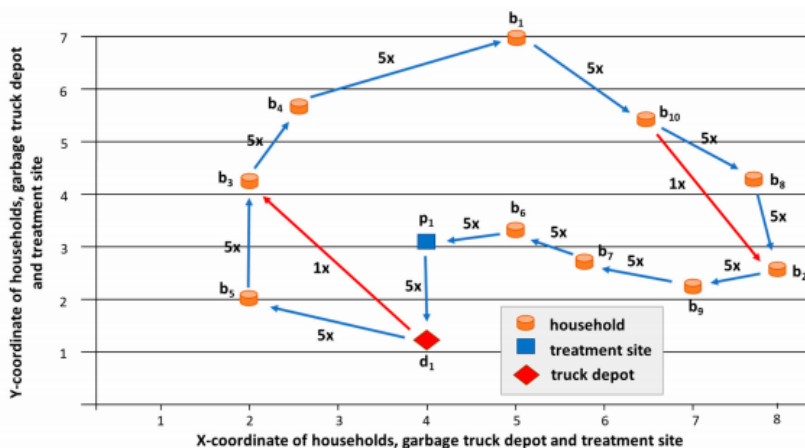


Рисунок 13. Маршруты сбора Сценария 2: были изменены пять сходных периодических маршрутов сбора. Как график, так и последовательность домовладений были скорректированы для снижения выбросов и повышения экологической информированности о процессе сбора. Оптимизационный алгоритм привел к сокращению выбросов на 14,78%.

Обозначения те же, что и на рис. 12.

Таблица 5

Расчетные выбросы для маршрутов в Сценарии 2

Маршруты	Длина маршрута	Выбросы					
		CO ₂	SO ₂	CO	HC	NO _x	PM
2-й, 4-й и 5-й маршруты сбора без перегруженного мусоровоза	61,83	52019	1,58	43,53	23,74	235,46	1,97
1-й маршрут сбора без перегруженного мусоровоза	20,37	17144	0,52	14,35	7,82	77,60	0,65
3-й маршрут сбора без перегруженного мусоровоза	19,91	16747	0,51	14,01	7,64	75,80	0,63
Весь маршрут сбора без перегруженного мусоровоза	102,11	85911	2,61	71,89	39,21	388,87	3,26

Описанные выше сценарии подтверждают представленную кибер-физическую модель системы обращения с отходами при сборе муниципальных отходов и обосновывают тот факт, что применение технологий Индустрии 4.0 для преобразования традиционной системы обращения с отходами в кибер-физическую систему оказывает сильное влияние на показатели всего процесса поставки, и в то же самое время устойчивость и экологическая информированность также принимаются во внимание в форме минимизации потребления энергии и выбросов.

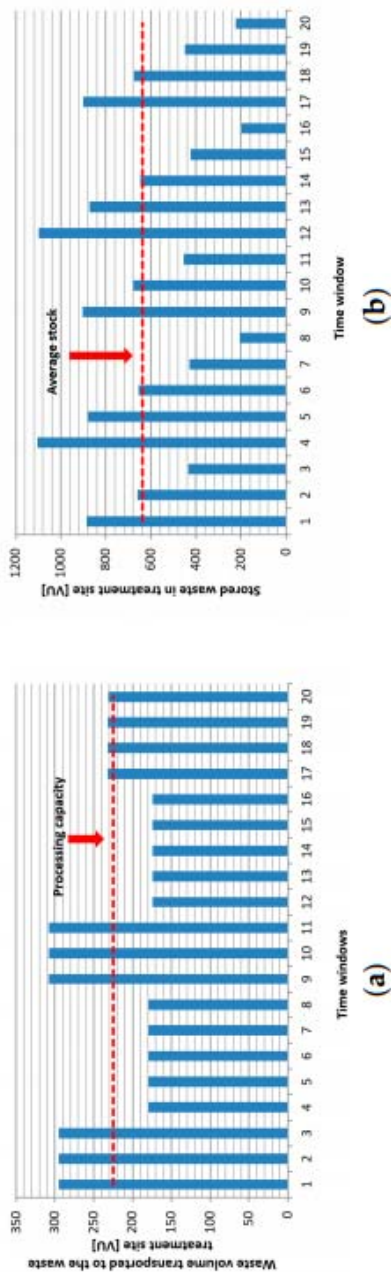


Рисунок 14. (а) Средний объем отходов между двумя поставками до участка переработки в Сценарии 2. Поставка отходов не синхронизирована с перерабатывающими мощностями, поскольку поставляемый объем отходов превышает требуемое количество в промежутки времени с 1 до 3, с 9 до 11 и с 17 до 20, но в то же самое время не достигается требуемое количество в промежутки времени с 4 до 8 и с 12 до 16. (б). Инвентаризация отходов на участке переработки (среднее 639 UV, максимальное 1105 UV)

Обозначения такие же, что и для рис. 11.

Подводя итог, предложенная модель оптимизации, которая была основана на бинарном алгоритме летучей мыши, делает анализ воздействия графика и распределения объектов на экономические и экологические аспекты (общественное здравоохранение), когда общественное здравоохранение находится под влиянием выбросов, которые вызываются процессом сбора отходов, возможным.

Анализы обоих сценариев показывают, что с неопределенностью в объеме отходов можно справиться путем применения датчиков уровня в контейнерах и беспроводного кооммуникационного оборудования. Поставщики услуг по сбору отходов могут получить доступ к собранным данным в облаке обращения с отходами, и будут доступны дополнительные возможности оптимизации. Как показывают сценарии, оптимизация маршрутов сбора отходов, включая ограничения, связанные с временными факторами и производительностью, приводит к сокращению длительности маршрутов транспортирования, снижению количества энергии, потребляемой мусоровозами, и снижению выбросов парниковых газов.

Как показывают данные литературного обзора, статьи, в которых рассматривается анализ систем обращения с отходами, сосредоточены на оптимизации затрат и проблемах эффективности традиционных систем обращения с отходами, но ни в одной статье не поставлена цель идентификации потенциальных решений IoT для повышения экологической информированности о процессе сбора отходов. Сравнение наших результатов с результатами других исследований показывает, что проектирование и эксплуатация в среде Индустрии 4.0, и преобразование традиционной системы обращения с отходами в кибер-физическую систему все еще требует большего внимания и исследований. Причина этого заключается в том, что в случае стохастических систем⁵⁴ большого размера, типа систем сбора отходов, доступность информации в режиме реального времени об объеме образующихся отходов, возможностях переработки, транспортировании и возможностях погрузки-разгрузки должна приниматься в соображение.

Несмотря на небольшой масштаб демонстрируемых проблем, полученные результаты показывают, что предложенный метод с использованием эвристической оптимизации работает лучше, чем традиционные формальные модели для оценки проблем, связанных с обращением с отходами. Традиционные формальные модели обычно сосредоточены на оптимизации на основе затрат традиционного сбора муниципальных твердых отходов: проектирование эффективной сети обслуживания в новом районе Нанкина Цзянбэй⁵⁵ осуществляется с акцентом на минимизацию ежегодных эксплуатационных затрат, и в то же самое время будут оптимизированы количество, размер и размещение мусороперегрузочных станций [107]. По мнению авторов статьи, лица, принимающие политические решения, могут оказать влияние на направление развития систем обращения с отходами. Это должна быть своего рода политика вмешательства для поддержки технологических инвестиций, в особенности с точки зрения Индустрии 4.0 и IoT [108]. Однако определяющие факторы успешного внедрения экологически благоприятной кибер-физической системы обращения с отходами основаны на использовании технологий Индустрии 4.0 и решений IoT; но имеются и другие влияющие факторы, которые необходимо учитывать, типа экологической

⁵⁴ Стохастическая система – система, изменения в которых носят случайный характер.

⁵⁵ Создание в Нанкине нового района площадью 788 кв. км на северном берегу реки Янцзы было утверждено решением горсовета КНР в 2015 г.

сознательности населения, экологической культуры в регионе, характеристик поколений [109] или правового регулирования, определяющего операции рециклинга и обращения с отходами.

Как демонстрирует математическая модель (см. уравнения (1) – (15)), в модели можно учесть технологические аспекты, и они могут быть описаны с помощью стратегий эксплуатации и принятия решений. Модель была предназначена для оказания помощи руководителям производства в выборе оптимальных стратегических и тактических планов эксплуатации в соответствии с имеющейся информацией в масштабе реального времени об образующемся количестве отходов и доступных технологических и логистических возможностях.

6. Обсуждение

В рамках этой исследовательской работы авторы использовали модель оптимизации на основе бинарного алгоритма летучей мыши, который создает возможности для проведения анализа функционирования традиционной и кибер-физической системы обращения с отходами с точки зрения процесса сбора отходов. В более широком смысле эта статья сосредоточена на математическом описании рамок систем обращения с отходами, включая домовладения как источник образования отходов, участки переработки и процессы сбора. Почему так много усилий потребовалось для проведения этого исследования? Роль систем обращения с отходами становится все более важной, поскольку приоритетом является отход от зависимости от свалок отходов, которые не обеспечивают защиты окружающей среды, к системам обращения с отходами, которые сохраняют полезные ресурсы в экономике, а их эксплуатация является безвредной для окружающей среды, и они не угрожают общественному здравоохранению в связи с загрязнением окружающей среды [110].

Однако имеются также ограничения исследования и описанной модели, которые дают направление для дальнейших исследований. Наша модель отслеживает парк с различными грузовыми автомобилями, поскольку программное обеспечение позволяет установить грузоподъемность каждого грузового автомобиля. Мы можем также выбрать размер контейнера для каждого домовладения, но это отличается от точки зрения объема отходов, поскольку “умные” контейнеры могут определять уровень заполнения контейнера отходами, а затем рассчитывается объем в зависимости от типа контейнера (граничные вычисления⁵⁶). В рамках этой модели стохастические параметры окружающей среды и другие неопределенности не принимаются в соображение. В ходе дальнейших исследований модель можно расширить до более сложной модели, включая описание неопределенных параметров с нечеткими моделями, а другое направление связано с применением моделирования с нечеткой раскрашенной сетью Петри (см. сноску 22) [111, 112]. Во-вторых, в данном исследовании рассмотрен только процесс однокомпонентного рециклинга/повторного использования, но имеется возможность разработки модели с технологиями многокомпонентного повторного использования/рециклинга [113, 114], в том числе технологии разборки и измельчения.

⁵⁶ Самое важное отличие граничных вычислений от облачных заключается в том, что сбор и анализ данных проводится не в централизованной среде, такой как центр обработки данных, а в том месте, где происходит генерация потоков данных. Источниками данных являются цифровые устройства, которые передают эти данные в режиме реального времени в центральный репозиторий (хранилище данных).

Модели в будущих исследованиях также могут включать эти аспекты. Политика ЕС по отходам основана на иерархии обращения с отходами, и рециклинг играет важную роль. В рамочной директиве ЕС по отходам имеются обязательства, связанные с тем, что некоторые фракции отходов должны собираться раздельно в источнике образования, и системы сбора отходов во многих странах ЕС основаны на сборе нескольких фракций отходов. В рамках нашего будущего исследования мы намерены сосредоточиться на сборе отходов как одном целом на комплексной основе, и мы будем концентрировать внимание на всех фракциях, которые должны собираться, а не на одной фракции как в обсужденной нашей модели. Обсуждаемая модель может быть расширена до модели сбора нескольких фракций, поскольку математическое описание можно преобразовать в модель, которая рассматривает сбор различных фракций отходов как одно целое. Сеть клиентов часто сопротивляется изменениям как группа персональных сообщений, и введение услуг по управлению взаимоотношениями с клиентом может привести к значительным изменениям [115]. Это также необходимо рассмотреть в будущих исследованиях.

Что касается отходов электротехнического и электронного оборудования, то имеется несколько новых и инновационных публикаций о моделях и методах в Китае или Гонконге, которые также необходимо рассматривать в наших будущих исследованиях. Исследователи выявили, что компании в секторе сбора отходов в Китае осуществляют два различных вида интеллектуального сбора отходов: сбор в рамках взаимодействия человека с человеком или в рамках взаимодействия человека с машиной. Сравнительные преимущества были выявлены в организации, торговле, сборе данных и источниках прибыли. Однако интеллектуальный сбор в Китае все еще находится на ранней стадии, но его потенциал для устойчивой бизнес-модели необходимо исследовать дополнительно [116, 117]. Однако применение систем интеллектуального сбора расширяется, но готовность населения платить и принимать участие в обращении с отходами оказывает влияние на показатели сбора, особенно в сельских районах [118]. Как показывает модель “Интернет + Рециклинг”, интеллектуальность китайских решений основана на решениях Интернета вещей. Эта модель сбора отходов дает возможность отдельным лицам договориться о месте сбора с помощью различных онлайн платформ, после чего компании по сбору отходов проводят сбор в назначенном месте [119]. Количество собранных отходов оказывает влияние на логистические процессы обращения с отходами, в то время как оказывает большое воздействие на технологии переработки отходов. Исследования показывают, что индекс характеристик сжигания является разным в различных экономических группах, и это означает, что должна использоваться различная доля технологий переработки [120]. Технологии переработки отходов, особенно в случае отходов электротехнического и электронного оборудования, когда выполняются операции разборки и модернизации, требуют дополнительного исследования для описания факторов, влияющих на производительность, как в случае труднообрабатываемых материалов [121]. Теория запланированного применения является подходящим методом для поддержки процессов принятия решений в секторе обращения с отходами и для анализа механизма принятия решений в отношении размещения твердых бытовых отходов на основе поведения жителей [122]. Стиль руководства является важным фактором, который влияет на повышение эффективности работы организации и производительности труда сотрудников [123], которые оказывают значительное влияние на глобальные процессы в системе обращения с отходами; поэтому это тоже необходимо рассмотреть в наших будущих исследованиях.

7. Заключение

Дополнительная ценность статьи состоит в описании математической модели традиционной и кибер-физической системе обращения с отходами, что позволяет описать воздействие технологий Индустрии 4.0, типа радиочастотной идентификации, облачных и “туманных” вычислений⁵⁷, анализа больших данных при проектировании и функционировании систем. Научный вклад этой статьи для исследователей в этой области состоит в математическом моделировании и оптимизации процессов сбора отходов на основе оптимизации с использованием бинарного алгоритма летучей мыши. Результаты можно обобщить, поскольку модель можно применить для различных систем обращения с отходами – от отходов электротехнического и электронного оборудования до биомассы и отходов лечебно-профилактических учреждений.

Библиография

1. World's Population Increasingly Urban with More than Half Living in Urban Areas. Available online: <http://www.un.org/en/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html> (accessed on 14 January 2019).
2. *Velis, C.A.; Longhurst, P.J.; Dren, G.H.; Smith, R.; Pollard, S.J.T.* Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. *Bioresour. Technol.* **2009**, *100*, 2747–2761. [CrossRef] [PubMed]
3. *Guo, S.S.; Nie, R.; Yu, Z.* Syngas production from biomass gasification in China: A clean strategy for sustainable development. *Energ. Source Part A* **2019**, *41*, 911–917. [CrossRef]
4. *Shen, L.; Min, F.F.; Liu, L.Y.; Zhu, J.B.; Xue, C.G.; Cai, C.C.; Zhou, W.; Wang, C.* Application of gaseous pyrolysis products of the waste cooking oil as coal flotation collector. *Fuel* **2019**, *239*, 446–451. [CrossRef]
5. *Baronti, C.; Curini, R.; D'Ascenzo, G.; Di Corcia, A.; Gentili, A.; Samperi, R.* Monitoring natural and synthetic estrogens at activated sludge sewage treatment plants and in a receiving river water. *Environ. Sci. Technol.* **2000**, *34*, 5059–5066. [CrossRef]
6. *McKay, G.* Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: Review. *Chem. Eng. J.* **2002**, *86*, 343–368. [CrossRef]
7. Municipal Waste Statistics. Eurostat. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Municipal_waste_statistics (accessed on 11 January 2019).
8. Integrated Pollution Prevention and Control—Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration. Available online: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf (accessed on 4 December 2018).
9. *Bányai, T.* Real-Time Decision Making in First Mile and Last Mile Logistics: How Smart Scheduling Affects Energy Efficiency of Hyperconnected Supply Chain Solutions. *Energies* **2018**, *11*, 1833. [CrossRef]

⁵⁷ “Туманные” вычисления – модель, в которой данные, их обработка и приложения находятся не в облаке, а в вычислительных центрах на границе сети, что делает такие вычисления оптимальными для Интернета вещей и приложений.

10. Brennan, L.; Owende, P. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2010**, *14*, 557577. [CrossRef]
11. Cronin, P.; Ryan, F.; Coughlan, M. Undertaking a literature review: A step-by-step approach. *Br. J. Nurs.* **2008**, *17*, 38–43. [CrossRef]
12. Bonney, M.C. Trends in inventory management. *Int. J. Prod. Econ.* **1994**, *35*, 107–114. [CrossRef]
13. Guide, V.D.R.; Jayaraman, V.; Srivastava, R.; Benton, W.C. Supply-chain management for recoverable manufacturing systems. *Interfaces* **2000**, *30*, 125–142. [CrossRef]
14. Pati, R.K.; Vrat, P.; Kumar, P. A goal programming model for paper recycling system. *Omega-Int. J. Manag. Sci.* **2008**, *36*, 405–417. [CrossRef]
15. Geyer, R.; Blass, V.D. The economics of cell phone reuse and recycling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2010**, *47*, 515–525. [CrossRef]
16. Iakovou, E.; Karagiannidis, A.; Vlachos, D.; Toka, A.; Malamakis, A. Waste biomass-to-energy supply chain management: A critical synthesis. *Waste Manag.* **2010**, *30*, 1860–1870. [CrossRef] [PubMed]
17. Khetrival, D.S.; Kraeuchi, P.; Widmer, R. Producer responsibility for e-waste management: Key issues for consideration—Learning from the Swiss experience. *J. Environ. Manag.* **2009**, *90*, 153–165. [CrossRef] [PubMed]
18. Beamon, B.M.; Fernandes, C. Supply-chain network configuration for product recovery. *Prod. Plan. Control* **2004**, *15*, 270–281. [CrossRef]
19. Bianchessi, N.; Righini, G. Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery. *Comput. Oper. Res.* **2007**, *34*, 578–594. [CrossRef]
20. De Feo, G.; Mahvano, C. The use of LCA in selecting the best MSW management system. *Waste Manag.* **2009**, *29*, 1901–1915. [CrossRef]
21. Poeschl, M.; Ward, S.; Owende, P. Environmental impacts of biogas deployment—Part I: Life cycle inventory for evaluation of production process emissions to air. *J. Clean. Prod.* **2009**, *24*, 168–183. [CrossRef]
22. Barba-Gutierrez, Y.; Adenso-Diaz, B.; Hopp, M. An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. *Resour. Conserv. Recycl.* **2008**, *52*, 481–495. [CrossRef]
23. Barker, T.J.; Zabinsky, Z.B. A multicriteria decision making model for reverse logistics using analytical hierarchy process. *Omega* **2011**, *39*, 558–573. [CrossRef]
24. Demirel, E.; Demirel, N.; Gokcen, H. A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in Turkey. *J. Clean Prod.* **2016**, *112*, 2101–2113. [CrossRef]
25. Bantista, J.; Pereira, J. Modeling the problem of locating collection areas for urban waste management. An application to the metropolitan area of Barcelona. *Omega* **2006**, *34*, 617–629. [CrossRef]
26. Hemmelmayr, V.; Doerner, K.F.; Hartl, R.F.; Rath, S. A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems. *J. Heuristics* **2013**, *19*, 129–156. [CrossRef]
27. Jalil, E.E.A.; Grant, D.B.; Nicholson, J.D.; Deutz, P. Reverse logistics in household recycling and waste systems: A symbiosis perspective. *Supply Chain Manag.* **2016**, *21*, 245–258. [CrossRef]

28. Vahdani, B.; Tavakkoli-Moghaddam, R.; Jolai, F.; Baboli, A. Reliable design of a closed loop supply chain network under uncertainty: An interval fuzzy possibilistic chance-constrained model. *Eng. Optimiz.* **2013**, *45*, 745–765. [CrossRef]
29. Subulan, K.; Tasan, A.S.; Baykasoglu, A. Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming. *Appl. Math. Model.* **2015**, *39*, 2661–2702. [CrossRef]
30. Hanafi, J.; Kara, S.; Kaebernick, H. Reverse logistics strategies for end-of-life products. *Int. J. Logist. Manag.* **2008**, *19*, 367–388. [CrossRef]
31. Gruler, A.; Fikar, C.; Juan, A.A.; Hirsch, P.; Contreras-Bolton, C. Supporting multi-depot and stochastic waste collection management in clustered urban areas via simulation-optimization. *J. Simul.* **2017**, *11*, 11–19. [CrossRef]
32. Gomes, M.I.; Barbosa-Póvoa, A.P.; Novais, A.Q. Modelling a recovery network for WEEE: A case study in Portugal. *Waste Manag.* **2011**, *31*, 1645–1660. [CrossRef]
33. Mar-Ortiz, J.; Adenso-Díaz, B.; González-Velarde, J.L. Design of a recovery network for WEEE, collection: The case of Galicia, Spain. *J. Oper. Res. Soc.* **2011**, *62*, 1471–1484. [CrossRef]
34. Chung, S.S.; Lau, K.Y.; Zhang, C. Generation of and control measures for e-waste in Hong Kong. *Waste Manag.* **2011**, *31*, 544–554. [CrossRef] [PubMed]
35. Grunow, M.; Gobbi, C.; Altin, L. Designing the reverse network for WEEE in Denmark. *Cirp Ann.-Manuf. Technol.* **2009**, *58*, 391–394. [CrossRef]
36. Ylä-Mella, J.; Poikela, K.; Lehtinen, U.; Keiski, R.L.; Pongracz, E. Implementation of Waste Electrical and Electronic Equipment Directive in Finland: Evaluation of the collection network and challenges of the effective WEEE management. *Resour. Conserv. Recycl.* **2014**, *86*, 38–46. [CrossRef]
37. Kinobe, J.R.; Bosona, T.; Gebresenbet, G.; Niwagaba, C.B.; Vinneras, B. Optimization of waste collection and disposal in Kampala city. *Habitat Int.* **2015**, *49*, 126–137. [CrossRef]
38. Lee, C.K.; Chan, T.M. Development of RFID-based Reverse Logistics System. *Expert Syst. Appl.* **2009**, *36*, 9299–9307. [CrossRef]
39. Gamberini, R.; Gebennini, E.; Rimini, B. An innovative container for WEEE collection and transport: Details and effects following the adoption. *Waste Manag.* **2009**, *29*, 2846–2858. [CrossRef] [PubMed]
40. Yu, M.C.; Wu, P.S. A simulation study of the factors influencing the design of a waste collection channel in Taiwan. *Int. J. Logist. Res. Appl.* **2010**, *13*, 257–271. [CrossRef]
41. Dell'Amico, M.; Righini, G.; Salani, M. A branch-and-price approach to the vehicle routing problem with simultaneous distribution and collection. *Transp. Sci.* **2006**, *40*, 235–247. [CrossRef]
42. Bing, X.Y.; de Keizer, M.; Bloemhof-Ruwaard, J.M.; van der Vorst, J.G.A.J. Vehicle routing for the eco-efficient collection of household plastic waste. *Waste Manag.* **2014**, *34*, 719–729. [CrossRef]
43. Cattaruzza, D.; Absi, N.; Feillet, D. Vehicle routing problems with multiple trips. *4OR-Q. J. Oper. Res.* **2016**, *14*, 223–259. [CrossRef]
44. Mar-Ortiz, J.; González-Velarde, J.L.; Adenso-Díaz, B. Designing routes for WEEE collection: The vehicle routing problem with split loads and date windows. *J. Heuristics* **2013**, *19*, 103–127. [CrossRef]

45. Aksen, D.; Kaya, O.; Salman, F.S.; Akca, Y. Selective and periodic inventory routing problem for waste vegetable oil collection. *Optim. Lett.* **2012**, *6*, 1063–1080. [CrossRef]
46. Ramos, T.R.P.; Gomes, M.I.; Barbosa-Povoa, A.P. Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns. *Omega* **2014**, *48*, 60–74. [CrossRef]
47. Alumur, S.A.; Turi, I. Collection Center Location with Equity Considerations in Reverse Logistics Networks. *INFOR* **2014**, *52*, 157–173. [CrossRef]
48. Zhou, X.G.; Zhou, Y.H. Designing a multi-echelon reverse logistics operation and network: A case study of office paper in Beijing. *Resour. Conserv. Recycl.* **2015**, *100*, 58–69. [CrossRef]
49. Golroudbary, S.R.; Zahraee, S.M. System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain. *Simul. Model. Pract. Theory* **2015**, *53*, 88–102. [CrossRef]
50. Entezaminia, A.; Heydari, M.; Rahmani, D. A multi-objective model for multi-product multi-site aggregate production planning in a green supply chain: Considering collection and recycling centers. *J. Manuf. Syst.* **2016**, *40*, 63–75. [CrossRef]
51. Achillas, C.; Aidonis, D.; Vlachokostas, C.; Moussiopoulos, N.; Banias, G.; Triantafyllou, D. A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media. *Resour. Conserv. Recycl.* **2012**, *66*, 76–84. [CrossRef]
52. Hemmelmayr, V.C.; Doerner, K.F.; Hartl, R.F.; Vigo, D. Models and Algorithms for the Integrated Planning of Bin Allocation and Vehicle Routing in Solid Waste Management. *Transp. Sci.* **2014**, *48*, 103–120. [CrossRef]
53. Xu, Z.T.; Elomri, A.; Pokharel, S.; Zhang, Q.; Ming, X.G.; Liu, W.J. Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint. *Waste Manag.* **2017**, *64*, 358–370. [CrossRef]
54. Entezaminia, A.; Heidari, M.; Rahmani, D. Robust aggregate production planning in a green supply chain under uncertainty considering reverse logistics: A case study. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* **2017**, *90*, 1507–1528. [CrossRef]
55. Nolç, P.C.; Absi, N.; Feillet, D. A Stochastic Inventory Routing Problem for Infectious Medical Waste Collection. *Networks* **2014**, *63*, 82–95. [CrossRef]
56. Ene, S.; Öztürk, N. Network modeling for reverse flows of end-of-life vehicles. *Waste Manag.* **2015**, *38*, 284–296. [CrossRef] [PubMed]
57. Yu, H.; Solvang, W.D. A general reverse logistics network design model for product reuse and recycling with environmental considerations. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2016**, *87*, 2693–2711. [CrossRef]
58. Kwak, M.; Behdad, S.; Zhao, Y.; Kim, H.; Thurston, D. E-Waste Stream Analysis and Design Implications. *J. Mech. Des.* **2011**, *133*, 101003. [CrossRef]
59. Shakourloo, A.; Kazemi, A.; Javad, M.O.M. A new model for more effective supplier selection and remanufacturing process in a closed-loop supply chain. *Appl. Math. Model.* **2016**, *40*, 9914–9931. [CrossRef]
60. Bing, X.Y.; Bloembergen, J.M.; Ramos, T.R.P.; Barbosa-Povoa, A.P.; Wong, C.Y.; van der Vorst, J.G.A.J. Research challenges in municipal solid waste logistics management. *Waste Manag.* **2016**, *48*, 584–592. [CrossRef] [PubMed]
61. Dat, L.Q.; Doan, T.T.L.; Chou, S.Y.; Yu, V.F. Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. *Expert Syst. Appl.* **2012**, *39*, 6380–6387. [CrossRef]

62. Kilic, H.S.; Cebeci, U.; Ayhan, M.B. Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) in Turkey. *Resour. Conserv. Recycl.* **2015**, *95*, 120–132. [CrossRef]
63. Fagundes, L.D.; Amorim, E.S.; Lima, R.D. Action Research in Reverse Logistics for End-Of-Life Tire Recycling. *Syst. Pract. Act. Res.* **2017**, *30*, 553–568. [CrossRef]
64. Ramos, T.R.P.; Gomes, M.I.; Barbosa-Poiva, A.P. Planning waste cooking oil collection systems. *Waste Manag.* **2013**, *33*, 1691–1703. [CrossRef] [PubMed]
65. Araujo, V.K.W.S.; Hamacher, S.; Scavarda, L.F. Economic assessment of biodiesel production from waste frying oils. *Bioresour. Technol.* **2010**, *12*, 4415–4422. [CrossRef] [PubMed]
66. Bing, X.Y.; Bloembergen, J.M.; van der Vorst, J.G.A.J. Sustainable reverse logistics network design for household plastic waste. *Flex. Serv. Manuf. J.* **2014**, *26*, 119–142. [CrossRef]
67. Bing, X.Y.; Groot, J.J.; Bloembergen, J.M.; van der Vorst, J.G.A.J. Multimodal network design for sustainable household plastic recycling. *Int. J. Phys. Distrib.* **2013**, *43*, 452–477. [CrossRef]
68. Chueh, P.T.; Lee, K.C.; Syn, F.S.; Lo, S.L. Implications of biomass pretreatment to cost and carbon emissions: Case study of rice straw and Pennisetum in Taiwan. *Bioresour. Technol.* **2012**, *108*, 285–294. [CrossRef] [PubMed]
69. Pati, R.K.; Vrat, P.; Kumar, P. Economic analysis of paper recycling vis-a-vis wood as raw material. *Int. J. Prod. Econ.* **2006**, *103*, 489–508. [CrossRef]
70. Grandhi, B.; Singh, J.A. What a Waste! A Study of Food Wastage Behavior in Singapore. *J. Food Period. Mark.* **2016**, *22*, 471–485. [CrossRef]
71. Poldnau, J. Optimisation of the economic, environmental and administrative efficiency of the municipal waste management model in rural areas. *Resour. Conserv. Recycl.* **2015**, *97*, 55–65. [CrossRef]
72. Menesatti, P.; Canali, E.; Sperandio, G.; Burchi, G.; Devlin, G.; Costa, C. Cost and Waste Comparison of Reusable and Disposable Shipping Containers for Cut Flowers. *Packag. Technol. Sci.* **2012**, *25*, 203–215. [CrossRef]
73. McLeod, F.N.; Cherrett, T.J.; Waterson, B.J. The scope for joint household/commercial waste collections: A case study. *Int. J. Logist. Res. Appl.* **2011**, *14*, 399–411. [CrossRef]
74. Chen, F.; Yang, B.D.; Zhang, W.Y.; Ma, J.; Lv, J.; Yang, Y.J. Enhanced recycling network for spent e-bicycle batteries: A case study in Xuzhou, China. *Waste Manag.* **2017**, *60*, 660–665. [CrossRef] [PubMed]
75. Kuczenski, B.; Geyer, R. PET bottle reverse logistics-environmental performance of California's CRV program. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2013**, *18*, 456–471. [CrossRef]
76. Zacharias, J.; Zhang, B.J. Local distribution and collection for environmental and social sustainability — Tricycles in central Beijing. *J. Transp. Geogr.* **2015**, *49*, 9–15. [CrossRef]
77. Batarti, R.; Jaber, M.Y.; Ajazgar, S.M. A profit maximization for a reverse logistics dual-channel supply chain with a return policy. *Comput. Ind. Eng.* **2017**, *106*, 58–82. [CrossRef]
78. Figueiredo, J.N.; Mayerle, S.F. Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput. *Transp. Res. E* **2008**, *44*, 731–752. [CrossRef]
79. Ghisolfi, V.; Chaves, G.D.L.D.; Siman, R.R.; Xavier, L.H. System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A

perspective for social inclusion of waste pickers. *Waste Manag.* **2017**, 60, 14–31. [CrossRef]

80. Achillas, C.; Vlachokostas, C.; Aidonis, D.; Moussiopoulos, N.; Iakovou, E.; Banias, G. Optimising reverse logistics network to support policy-making in the case of Electrical and Electronic Equipment. *Waste Manag.* **2010**, 30, 2592–2600. [CrossRef]

81. Gamberini, R.; Gebennini, E.; Manzini, R.; Ziveri, A. On the integration of planning and environmental impact assessment for a WEEE transportation network—A case study. *Resour. Conserv. Recycl.* **2010**, 54, 937–951. [CrossRef]

82. Tao, Z.G.; Guang, Z.Y.; Hao, S.; Song, H.J.; Xin, D.G. Multi-period closed-loop supply chain network equilibrium with carbon emission constraints. *Resour. Conserv. Recycl.* **2015**, 104, 354–365. [CrossRef]

83. Accorsi, R.; Manzini, R.; Pini, C.; Penazzi, S. On the design of closed-loop networks for product life cycle management: Economic, environmental and geography considerations. *J. Transp. Geogr.* **2015**, 48, 121–134. [CrossRef]

84. Ramos, T.R.P.; Gomes, M.I.; Barbosa-Poiva, A.P. Economic and environmental concerns in planning recyclable waste collection systems. *Transp. Res. E* **2014**, 62, 34–54. [CrossRef]

85. Sarkar, B.; Ullah, M.; Kim, N. Environmental and economic assessment of closed-loop supply chain with remanufacturing and returnable transport items. *Comput. Ind. Eng.* **2017**, 111, 148–163. [CrossRef]

86. Zang, B.; Luo, Y.M.; Zhang, H.Y.; Li, G.X.; Zhang, F. Optimization for MSW logistics of new Xicheng and new Dongcheng districts in Beijing based on maximum capacity of transfer stations. *J. Mater. Cycles Waste* **2013**, 15, 449–460. [CrossRef]

87. Johansson, O.M. The effect of dynamic scheduling and routing in a solid waste management system. *Waste Manag.* **2006**, 26, 875–885. [CrossRef] [PubMed]

88. Elia, V.; Gnoni, M.G.; Tornese, F. Improving logistic efficiency of WEEE collection through dynamic scheduling using simulation modeling. *Waste Manag.* **2018**, 72, 78–86. [CrossRef] [PubMed]

89. Mes, M.; Schutten, M.; Rivera, A.P. Inventory routing for dynamic waste collection. *Waste Manag.* **2014**, 34, 1564–1576. [CrossRef] [PubMed]

90. Joubaraa, H.; Czajczyńska, D.; Ghazal, H.; Krzyżyska, R.; Anguilano, L.; Reynolds, A.D.; Spencer, N. Municipal waste management systems for domestic use. *Energy* **2017**, 139, 485–506. [CrossRef]

91. Karaboga, D.; Basturk, B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. *J. Glob. Optim.* **2007**, 39, 459–471. [CrossRef]

92. Serapiao, A.B.S.; Correa, G.S.; Goncalves, F.B.; Carvalho, V.O. Combining K-Means and K-Harmonic with Fish School Search Algorithm for data clustering task on graphics processing units. *Appl. Soft Comput.* **2016**, 41, 290–304. [CrossRef]

93. Yang, X.S.; Gandomi, A.H. Bat algorithm: A novel approach for global engineering optimization. *Eng. Comput.* **2012**, 29, 464–483. [CrossRef]

94. Gandomi, A.H.; Alavi, A.H. Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm. *Commun. Nonlinear Sci.* **2012**, 17, 4831–4845. [CrossRef]

95. Bányai, Á.; Bányai, T.; Illés, B. Optimization of Consignment-Store-Based Supply Chain with Black Hole Algorithm. *Complexity* **2017**, 2017, 6038973. [CrossRef]

96. Kaveh, A.; Talatahari, S. Size optimization of space trusses using Big Bang-Big Crunch algorithm. *Comput. Struct.* **2009**, *87*, 1129–1140. [CrossRef]
97. Mirjalili, S.; Hashim, S.Z.M.; Sardroudi, H.M. Training feedforward neural networks using hybrid particle swarm optimization and gravitational search algorithm. *Appl. Math. Comput.* **2012**, *218*, 11125–11137. [CrossRef]
98. Fister, I.; Fister, I., Jr.; Yang, X.S.; Brest, J. A comprehensive review of firefly algorithms. *Swarm. Evol. Comput.* **2013**, *13*, 34–46. [CrossRef]
99. Yang, X.S.; Karamanoglu, M.; He, X.S. Flower pollination algorithm: A novel approach for multiobjective optimization. *Eng. Optim.* **2014**, *46*, 1222–1237. [CrossRef]
100. Santos, L.; Coutinho-Rodrigues, J.; Current, J.R. An improved ant colony optimization based algorithm for the capacitated arc routing problem. *Transp. Res. B Methodol.* **2010**, *44*, 246–266. [CrossRef]
101. Pan, W.T. A new Fruit Fly Optimization Algorithm: Taking the financial distress model as an example. *Knowl.-Based Syst.* **2012**, *26*, 69–74. [CrossRef]
102. Yang, X.S. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. In *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization—Studies in Computational Intelligence*, 1st ed.; González, J.R., Pelta, D.A., Cruz, C., Terrazas, G., Krasnogor, N., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2010; Volume 284, pp. 65–74.
103. Kongkaew, W. Bat algorithm in discrete optimization: A review of recent applications. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* **2017**, *39*, 641–650. [CrossRef]
104. Bányaí, T.; Illés, B.; Bányaí, Á. Smart Scheduling: An Integrated First Mile and Last Mile Supply Approach. *Complexity* **2018**, *2018*, 5180156. [CrossRef]
105. Zhao, S.Z.; Suganthan, P.N.; Das, S. Self-adaptive differential evolution with modified multi-trajectory search for CEC'2010 large scale optimization. *Lect. Notes Comput. Sci.* **2010**, *6466*, 1–10. [CrossRef]
106. Larsen, A.W.; Vrgoc, M.; Christensen, T.H. Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance. *Waste. Manag. Res.* **2009**, *27*, 652–659. [CrossRef] [PubMed]
107. Liang, J.; Liu, M. Network Design for Municipal SolidWaste Collection: A Case Study of the Nanjing Jiangbei New Area. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2018**, *15*, 2812. [CrossRef] [PubMed]
108. Hettiarachchi, H.; Meegoda, J.N.; Ryn, S. Organic Waste Buyback as a Viable Method to Enhance Sustainable Municipal SolidWaste Management in Developing Countries. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2018**, *15*, 2483. [CrossRef] [PubMed]
109. Kolnhofer-Derecskei, A.; Reicher, R.Z.; Szeghegyi, A. The X and Y Generations' Characteristics Comparison. *Acta Politec. Hung.* **2017**, *14*, 107–125. [CrossRef]
110. Kumar, S.; Smith, S.R.; Fowler, G.; Velis, C.; Kumar, J.; Arya, S.; Kumar, R.R.; Cheeseman, C. Challenges and opportunities associated with waste management in India. *R. Soc. Open Sci.* **2017**, *4*, 160764. [CrossRef] [PubMed]
111. Yang, B.; Li, H.G. A novel dynamic timed fuzzy Petri nets modeling method with applications to industrial processes. *Expert Syst. Appl.* **2018**, *97*, 276–289. [CrossRef]
112. Deng, Z.Y.; Zhang, J.; He, T.Q. Automatic Combination Technology of Fuzzy CPN for OWL-S Web Services in Supercomputing Cloud Platform. *Int. J. Pattern Recognit.* **2017**, *31*, 1759010. [CrossRef]
113. Chen, H.K.; Chou, H.W.; Chiu, Y.C. On the modeling and solution algorithm for the reverse logistics recycling flow equilibrium problem. *Transp. Res. C* **2007**, *15*, 218–234. [CrossRef]

114. *Cannella, S.; Bruccoleri, M.; Framinan, J.M.* Closed-loop supply chains: What reverse logistics factors influence performance? *Int. J. Prod. Econ.* **2016**, *175*, 35–49. [CrossRef]
115. *Reicher, R.; Komaromi, N.; Szeghegyi, A.* The Possible Success Factors of Introduction of CRM System at Hungarian SMEs. *Acta Politec. Hung.* **2015**, *12*, 215–229. [CrossRef]
116. *Zhou, Z.Z.; Chi, Y.; Dong, J.; Tang, Y.J.; Ni, M.J.* Model development of sustainability assessment from a life cycle perspective: A case study on waste management systems in China. *J. Clean. Prod.* **2019**, *210*, 1005–1014. [CrossRef]
117. *Xue, Y.Y.; Wen, Z.G.; Bressers, H.; Ai, N.* Can intelligent collection integrate informal sector for urban resource recycling in China? *J. Clean. Prod.* **2019**, *208*, 307–315. [CrossRef]
118. *Han, Z.Y.; Zeng, D.; Li, Q.B.; Cheng, C.; Shi, G.Z.; Mou, Z.S.* Public willingness to pay and participate in domestic waste management in rural areas of China. *Resour. Conserv. Recycl.* **2019**, *140*, 166–174. [CrossRef]
119. *Gu, F.; Zhang, W.J.; Guo, J.F.; Hall, P.* Exploring “Internet plus Recycling”: Mass balance and life cycle assessment of a waste management system associated with a mobile application. *Sci. Total Environ.* **2019**, *649*, 172–185. [CrossRef] [PubMed]
120. *Sebastian, R.M.; Kumar, D.; Alappat, B.J.* A technique to quantify incinerability of municipal solid waste. *Resour. Conserv. Recycl.* **2019**, *140*, 286–296. [CrossRef]
121. *Kundrák, J.; Molnár, V.; Deszpoth, I.* MRR-based productivity decisions in hard machining. *Wseas Trans. Environ. Dev.* **2018**, *14*, 374–382.
122. *Meng, X.Y.; Tan, X.C.; Wang, Y.; Wen, Z.G.; Tao, Y.; Qian, Y.* Investigation on decision-making mechanism of residents’ household solid waste classification and recycling behaviors. *Resour. Conserv. Recycl.* **2019**, *140*, 224–234. [CrossRef]
123. *Manzoor, F.; Wei, L.; Nurunnabi, M.; Subban, Q.A.; Shah, S.I.A.; Fallatah, S.* The impact of transformational leadership on job performance and CSR as mediator in SMEs. *Sustainability* **2019**, *11*, 436. [CrossRef]