

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-102-113



УДК 656.025

UDC 656.025

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ВЫВОЗА ОТХОДОВ ПОСРЕДСТВОМ
ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**ENHANCING WASTE DISPOSAL
LOGISTICS PROCESSES VIA
SIMULATION MODELING**

✉¹ **Маврин Вадим Геннадьевич**,
к.т.н., доцент кафедры сервиса транспорт-
ных систем, Набережночелнинский инсти-
тут (филиал) Казанского (Приволжского)
федерального университета, г. Набережные
Челны, e-mail: vadim_mmite@rambler.ru

✉¹ **Mavrin Vadim Gennadievich**,
candidate of technical sciences, associate professor
of the service of transport systems department, Na-
bereznyye Chelny institute (branch) Kazan (Volga
Region) Federal University, Naberezhnyye Chelny,
e-mail: vadim_mmite@rambler.ru

Макарова Ирина Викторовна,
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой сер-
виса транспортных систем, Набережночелнин-
ский институт (филиал) Казанского (Приволж-
ского) федерального университета, г. Набе-
режные Челны, e-mail: kamivm@mail.ru

Makarova Irina Viktorovna,
doctor of technical sciences, professor, head of the
service of transport systems department, Naberezh-
nyye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Re-
gion) Federal University, Naberezhnyye Chelny,
e-mail: kamivm@mail.ru

Зайнутдинова Айгель Рафисовна,
магистрант, Набережночелнинский инсти-
тут (филиал) Казанского (Приволжского)
федерального университета, г. Набережные
Челны, e-mail: aigelka14@gmail.com

Zainutdinova Aigel Rafisovna,
master's student, Naberezhnyye Chelny Institute
(branch) Kazan (Volga Region) Federal University,
Naberezhnyye Chelny, e-mail: aigelka14@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена разработке имитационной модели процесса транспортировки отходов с целью повышения эффективности и экологичности системы обращения с отходами. В работе представлен анализ современных подходов к организации логистических операций, включая применение интеллектуальных технологий, обратной логистики и принципов циркулярной экономики. На основе программной среды AnyLogic разработана модульная имитационная модель, учитывающая гетерогенность транспортных потоков, различные категории отходов и стратегии управления. Проведён оптимизационный эксперимент, позволивший определить оптимальное количество специализированного автотранспорта и снизить затраты на транспортировку

Annotation. This article is devoted to the development of a simulation model for waste transportation aimed at improving the efficiency and environmental sustainability of the waste management system. The work presents an analysis of modern approaches to organizing logistics operations, including the application of intelligent technologies, reverse logistics, and circular economy principles. A modular simulation model, developed using the AnyLogic software environment, accounts for the heterogeneity of transport flows, various waste categories, and management strategies. An optimization experiment was conducted, which allowed for determining the optimal number of specialized vehicles and reducing transportation costs by 40.64%. The results of the study demonstrate the potential of simulation modeling as a decision-support tool for enhancing the sustainability and economic efficiency of waste management systems.

на 40,64 %. Результаты исследования демонстрируют потенциал имитационного моделирования как инструмента поддержки принятия решений для повышения устойчивости и экономической эффективности систем обращения с отходами.

Ключевые слова: УПРАВЛЕНИЕ ОТХОДАМИ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОПАРКА, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.

Keywords: WASTE MANAGEMENT, SIMULATION, FLEET OPTIMIZATION, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Человечество на протяжении всей своей истории неизменно испытывает проблему загрязнения природной среды. Хотя технологический прогресс способствует повышению уровня комфорта и качества жизни, этот быстрый рост имеет обратную сторону – ухудшение экологической обстановки планеты. В результате экономического, технического и технологического развития ухудшается качество здоровья человека.

Современная мировая экономика, включая российскую, базируется преимущественно на ресурсозатратной модели хозяйствования, что ведет к росту затрат и падению эффективности производства. Регулярные финансовые, политические и вооруженные конфликты зачастую обусловлены именно такими экономическими особенностями. Кроме того, развитие мировой экономики связано с процессами урбанизации, что сопровождается негативным воздействием на окружающую среду и приводит к изменению климата. Стремительное увеличение численности городских жителей создает ситуации, когда городская экосистема уже неспособна удовлетворять основные физиологические и социальные нужды человека. По этой причине концепция перехода к экологически устойчивым принципам управления («зеленая экономика»), обеспечивающим благосостояние без ущерба экологии и социальной справедливости, приобретает особую значимость. Альтернативных путей поддержания устойчивого существования урбанизированных регионов пока не выявлено.

Одним из факторов ухудшения состояния окружающей среды является рост образования отходов и негативные для окружающей среды способы их утилизации. Формирование эффективной и устойчивой системы обращения с отходами производства и потребления является одной из ключевых глобальных проблем XXI века и приоритетной задачей государственной политики Российской Федерации. В условиях стремительной урбанизации, роста промышленного производства и уровня потребления объемы образующихся отходов неуклонно возрастают, создавая беспрецедентную антропогенную нагрузку на окружающую среду и неся значительные экономические и социальные издержки. В России, несмотря на реализацию реформы отрасли обращения с отходами и принятие ключевых нормативных актов (ФЗ № 89 «Об отходах производства и потребления», ФЗ № 7 «Об охране окружающей среды», национальный проект «Экологическое благополучие»), проблема обостряется [1-3]. Значительная часть отходов по-прежнему размещается на полигонах и свалках, не вовлекается во вторичный оборот, а существующие инфраструктурные объекты зачастую работают неэффективно.

Транспортно-логистическая составляющая является центральным, системообразующим элементом всей цепи управления отходами. Именно она обеспечивает физическое перемещение материальных потоков отходов между звеньями системы (источники образования,

пункты сбора/накопления, сортировочные станции, объекты переработки/утилизации, полигоны), определяя тем самым скорость, стоимость, экологичность и в конечном итоге – результативность всего процесса обращения с отходами. Эффективная логистическая система обращения с отходами способствует уменьшению негативного воздействия на окружающую среду, сокращению объемов захоронения отходов, повышению эффективности системы транспортировки отходов и рациональному использованию ресурсов.

Исторически обращение с отходами строилось на линейной модели («создать – использовать – захоронить») с акцентом на транспортировку к местам захоронения [4]. Современная научная парадигма смещается в сторону дифференцированного обращения с отходами и принципов циркулярной экономики. Это кардинально меняет требования к транспортно-логистической системе: она должна обеспечивать не просто «вывоз», а управление материальными потоками с целью их максимального вовлечения во вторичный оборот. Ключевым элементом становится обратная логистика – процесс планирования, реализации и контроля эффективного потока продукции, сырья и информации от точки потребления к точке происхождения с целью извлечения добавленной стоимости или обеспечения правильной утилизации.

Несмотря на очевидные преимущества использования обратной логистики существуют барьеры, препятствующие переходу традиционной экономики к циркулярной. По мнению авторов исследования [5] основными барьерами являются: отсутствие ответственности и инициативы со стороны руководства и собственников компаний-производителей продукции, высокие затраты на организацию и реализацию обратной логистики, низкая эффективность государственной политики в области переработки отходов, отсутствие адекватного программного обеспечения для организации процессов обратной логистики, неопределенность спроса из-за опасений потребителей приобретать восстановленную или переработанную продукцию. В статье предложены рекомендации по устранению данных барьеров, что, по мнению авторов, может создать условия для устойчивого развития за счет улучшения обратной логистики.

Сейчас основное внимание уделяется сокращению негативных последствий для общества и оптимизации логистической системы [6]. Важнейшими аспектами устойчивого роста выступают соблюдение строгих экологических норм, охрана природы, рациональное потребление природных богатств и преодоление экологических барьеров. Так, в статье [7] изучаются взаимосвязи между качеством услуг устойчивой обратной логистики, определяемым с помощью подхода «тройной нижней линии», и результатами для клиентов, а также качеством взаимоотношений. Кроме того, предлагается использовать операционный риск в качестве важной опосредующей переменной для предотвращения задержек или неэффективности в реализации и повышения удовлетворенности клиентов. Отмечено также, что значительное влияние на эффективность обратной логистики оказывает показатель устойчивости автотранспорта, используемого для транспортировки отходов.

Реализация целей государственной политики, ориентированной на охрану окружающей среды путем восприятия отходов как ресурса для вторичной переработки, способного приносить дополнительную прибыль, на деле продвигается недостаточно быстро. По мнению автора статьи [8], для решения проблемы в экономике страны необходимо создать отдельную отрасль по переработке компонентов, извлекаемых из состава отходов, для использования их в качестве вторичных ресурсов, сформировать правовую основу этой отрасли, а также изменить целевые ориентиры в национальном проекте «Экологическое благополучие».

Рассматривая проблему загрязнения окружающей среды, специалисты указывают на промышленный симбиоз как эффективный метод снижения отрицательного воздействия. Промышленный симбиоз представляет собой реализацию принципов циклической экономики, при которой отходы одной отрасли становятся сырьем для другой. Исследование [9], посвященное данному вопросу, описывает структуру экосистемы обращения с отходами, включающую взаимосвязанные элементы: группу заинтересованных лиц и механизмы управления, формируемые в ходе взаимодействия основных участников процесса.

Эффективная организация системы обращения с отходами и мониторинг объектов управления отходами для обеспечения соответствия законодательству – крайне сложные процессы. В исследовании [10] отмечается, что для решения данных задач целесообразно применять интеллектуальные технологии мониторинга и управления, разработанных на базе интеллектуальной аналитической программной платформы. В статье [11] объективность оценки объектов инфраструктуры управления отходами предлагается повысить за счет разработки модели и метода информационных технологий для анализа ряда показателей этих объектов на основе использования пространственно-распределенных данных. А в исследовании [12] представлена система мониторинга загрязнения урбанизированных территорий в режиме реального времени с использованием технологии для измерения расстояния от источников образования отходов до места их утилизации и датчиков для определения вместимости мусорных контейнеров. Интегрируя данные датчиков и сетевую связь, система поддерживает принятие обоснованных решений для оптимизации логистики сбора отходов, способствуя созданию более чистых и устойчивых городов.

Обращение с отходами – это комплексный подход, который включает процессы сбора, накопления, транспортировки, обработки, утилизацию и размещения (захоронения) отходов. Совершенствование каждого процесса в итоге приводит к общему повышению эффективности системы обращения с отходами. Одним из направлений повышения эффективности является совершенствование процесса транспортировки отходов. Так, в исследовании [13] разработан комплексный подход, позволяющий улучшить процедуру погрузки отходов с целью предотвращения отказов погрузочного оборудования, а также повысить эффективность процесса принятия решений в чрезвычайных ситуациях. Для этого предлагается использовать разработанную авторами математическую модель для корректировки функциональных связей между изменениями характеристик гидромассы в зависимости от веса предстоящей нагрузки во время работы специализированного транспортного средства в процессе взвешивания.

Оптимизация транспортных маршрутов и создание централизованных логистических узлов – ключевой элемент логистики в сфере обращения с отходами [14]. Учитывая неопределенность в объеме отходов и воздействие на окружающую среду их транспортировки в статье [15] представлены модели оптимизации маршрутов движения мусоровозов как для сухих, так и для влажных отходов. Цель исследования состояла в минимизации общих затрат, углеродного следа и вторичного загрязнения.

Применение методов искусственного интеллекта и машинного обучения может оказать положительное влияние на оптимизацию стратегий управления отходами, направленных на повышение экономической эффективности и снижение воздействия на окружающую среду. В исследовании [16] были применены различные методы машинного обучения, такие как модели регрессии, алгоритмы классификации, машины опорных векторов, случайный лес, экстремальный градиентный бустинг и алгоритмы оптимизации, включая линейное программирование. В отличие от других исследований, в данном исследовании была достигнута 85 % точность моделей прогнозной аналитики для прогнозирования тенденций образования отходов, что в основном объясняется интеграцией более разнообразных наборов данных, включая социально-экономические факторы.

Одним из оптимальных по цели и затратам решений для совершенствования любых логистических операций является разработка системы поддержки принятия решений, в которой имитационная модель является интеллектуальным ядром. Так, в статье [17] представлена разработка имитационной модели логистических операций, выполнен эксперимент для оптимизации параметров модели и рассчитана эффективность разработок.

В последние годы совершенствование облачных вычислений и мобильных вычислительных технологий привело к появлению приложений, предоставляющих информацию о транспортных средствах. Например, они могут предоставлять населению активные оповещения и уведомления о времени прибытия мусоровоза. В исследовании [18] разработан и реали-

зован метод прогнозирования времени прибытия мусоровозов в системе управления автопарком с точностью 81,45 %. Данное приложение предоставляет доступ любым желающим к информации о местоположении мусоровозов, местоположении пунктов сбора и прогнозируемом времени прибытия мусоровозов.

Имитационные модели как важные инструменты для сценарного анализа могут помочь организациям в принятии решений и реализации политики управления твердыми отходами. Поскольку планирование управления твердыми отходами включает в себя различные взаимосвязанные компоненты, понимание динамического характера их взаимодействия позволяет моделировать поведение между всеми процессами и участниками [19]. Так, в статье [20] представлена имитационная модель системной динамики для управления твердыми коммунальными отходами, которая обеспечивает всесторонний обзор задействованных ресурсов, мест назначения отходов и структуры затрат. Основным вкладом модели заключается в предоставлении инструмента финансового планирования, позволяющего проводить сценарный анализ для поддержки стратегических или тактических решений, таких как расширение мощностей, инвестиции в повышение эффективности работы и тому подобное.

Таким образом, проведенный анализ состояния вопроса позволяет констатировать, что, несмотря на значительное количество разработок в области совершенствования системы обращения с отходами, в частности, их сбора и вывоза, существующие решения зачастую носят фрагментарный характер, ориентированы на отдельные аспекты проблемы и, в некоторых случаях, не применимы в условиях Российской Федерации из-за своей специфики. Это определяет актуальность настоящего исследования, целью которого является разработка совершенствования процесса транспортировки отходов для повышения эффективности и устойчивости системы обращения с отходами.

2 Материалы и методы

Действующие транспортно-логистические схемы в сфере обращения с отходами зачастую характеризуются низкой оптимизацией маршрутов, нерациональным использованием подвижного состава, высокими издержками, значительными экологическими рисками и неспособностью адекватно реагировать на изменение объемов и структуры отходов. Оптимальным по соотношению цены и результата решением может стать создание системы поддержки принятия решений на базе имитационной модели, выполняющей роль интеллектуального ядра (рис. 1). В качестве инструментальной среды для разработки этой модели выбран российский программный продукт AnyLogic, позволяющий совмещать дискретно-событийный, агентный и системно-динамический подходы.

Модуль сбора и интеграции данных агрегирует информацию об отходах и их источниках, парке автотранспорта, используемого для перевозки отходов и инфраструктуре (местоположение полигонов, сортировочных станций, перерабатывающих заводов, пропускная способность).

Интеллектуальное ядро (имитационная модель) реализует логику процессов генерации отходов, системы обращения с ними, заказа транспорта, погрузки-разгрузки и движения по маршрутам. Модуль оптимизации на основе данных, сгенерированных моделью, и заданных критериев находит оптимальные параметры системы.

База данных системы поддержки принятия решений служит репозиторием для хранения оптимальных решений различных проблем. Её использование позволяет значительно сократить время на выработку и принятие необходимых мер. В условиях повторяющихся ситуаций система обеспечивает оперативный подбор оптимального алгоритма действий. Если же ситуация имеет существенные отличия, в базу данных вносятся корректировки, что обеспечивает её постоянное развитие и актуальность.



Рисунок 1 – Концептуальная модель системы поддержки принятия решений

На основе рекомендаций системы (эффективных решений, выданных системой поддержки принятия решений), уполномоченные лица принимают оптимальные решения.

Система построена на основе модульной архитектуры, что подразумевает ее структурирование в виде набора слабосвязанных, функционально независимых компонентов (модулей). Каждый такой модуль отвечает за конкретную задачу, обладает собственной логикой работы и стандартизированным интерфейсом для интеграции с другими частями системы. Такой подход обеспечивает гибкость сопровождения: система может быть легко модифицирована, а её функциональность расширена за счет добавления новых модулей.

Анализ проводился на примере двух источников образования отходов (производственных линий, цехов или предприятий). Образовавшиеся отходы подвергаются первичной обработке с целью возможности транспортировки на сортировочную станцию. Далее утилизируемые отходы транспортируются на мусороперерабатывающие (или мусоросжигательные) заводы. Неутилизируемые отходы отправляются на полигоны для захоронения.

Транспортирование отходов осуществляется региональными или федеральными экологическими операторами либо привлеченными подрядными организациями в строгом соответствии с требованиями ст. 16 Федерального закона № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [1], регламентирующими конструктивные особенности специализированных транспортных средств. Специфика агрегатного состояния, класс опасности и физико-химические характеристики отходов, образованных после их сортировки, обуславливают необходимость дифференцированного подхода к выбору подвижного состава. Структурная схема модели представлена на рис. 2.

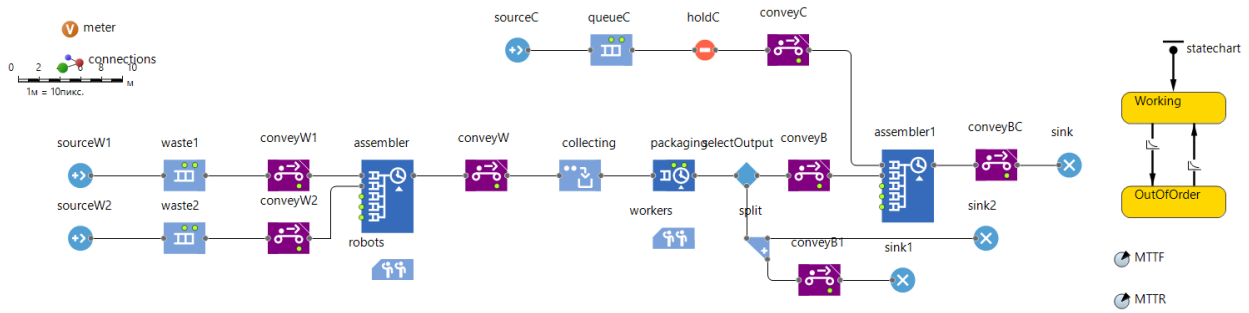


Рисунок 2 – Структура имитационной модели

Верхняя совокупность блоков моделирует генерацию и движение специализированного автотранспорта, используемого для транспортировки отходов. Другая цепочка блоков моделирует логику образования отходов и обращения с ними.

В модели используются следующие типы блоков:

1. Тип Source (sourceC, sourceW1, sourceW2) генерирует автотранспортные средства (АТС) для перевозки отходов, отходы первого и второго источников образования;
2. Тип Queue (queueC, waste1, waste2) генерирует площади (стоянки) для ожидания АТС и площадки временного хранения отходов;
3. Тип Hold (holdC) блокирует выезд АТС из стоянки при отсутствии необходимости транспортировки отходов;
4. Тип Convey (conveyC, conveyW1, conveyW2, convey, conveyB, conveyB1, conveyBC) моделирует движение АТС и транспортировку отходов;
5. Тип Assembler (assembler, assembler1) моделирует операции по обработке и сортировке отходов;
6. Тип Batch (collecting) и тип Service (packaging) моделируют процесс погрузки отходов на АТС;
7. Тип SelectOutput и Split разделяют потоки отходов (утилизируемые отходы транспортируются на переработку/сжигание, не утилизируемые – на полигоны);
8. Тип Sink – конечные блоки для уничтожения агентов (АТС и отходов);
9. Диаграмма состояний (statechart) моделирует работу оборудования и рабочих на объектах обработки и сортировки отходов.

Ключевые входные параметры и переменные модели:

1. Потоки отходов задавались детерминировано (по графику) и стохастически (на основе эмпирических распределений). Учитывалось разделение на утилизируемые и не утилизируемые типы отходов.
2. Парк специализированного транспорта: моделировалось четыре типа мусоровозов с различной вместимостью, назначением (видом перевозимых отходов) и стоимостью эксплуатации.
3. Логистическая сеть включала координаты источников, пункта обработки и сортировочной станции. На данном этапе исследования расстояния и время в пути задавались абстрактно, без привязки к реальной системе.
4. Стратегии управления: реализованы две стратегии вывоза: по расписанию и по событию (при достижении критического уровня накопления для промышленных отходов).

Оптимизационный эксперимент был направлен на подбор количественного и качественного состава парка. Целевой функцией была выбрана минимизация суммарных логистических издержек, включающие прямые транспортные затраты (такие как топливо, амортизация, зарплата), издержки за простой техники или переполнение контейнеров, условную стоимость экологического ущерба.

3 Результаты исследований

Для мониторинга и последующего анализа статистических параметров в структуру модели интегрированы специализированные блоки накопления данных. Визуализация функционирования модели в трехмерном пространстве представлена на рис. 3. Разнотипность парка используемой спецтехники обуславливает вариативность технико-эксплуатационных характеристик и, как следствие, дифференциацию затрат на содержание и эксплуатацию автотранспорта. Кроме того, разные виды отходов требуют применение различных стратегий управления логистическими процессами. Так, транспортировка одних категорий отходов осуществляется детерминировано – по мере достижения критического объема накопления, в то время как логистика других видов реализуется на основе установленного регламента (расписания), который задается лицом, принимающим решения, посредством блока «Schedule» (рис. 4).

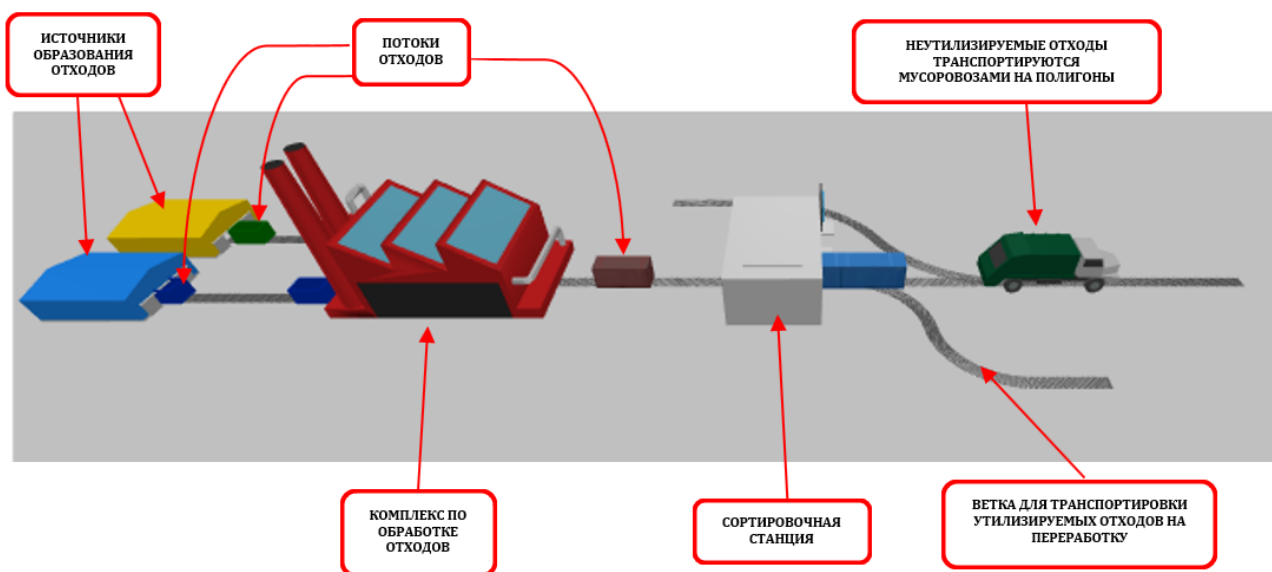


Рисунок 3 – Визуализация выполнения модели

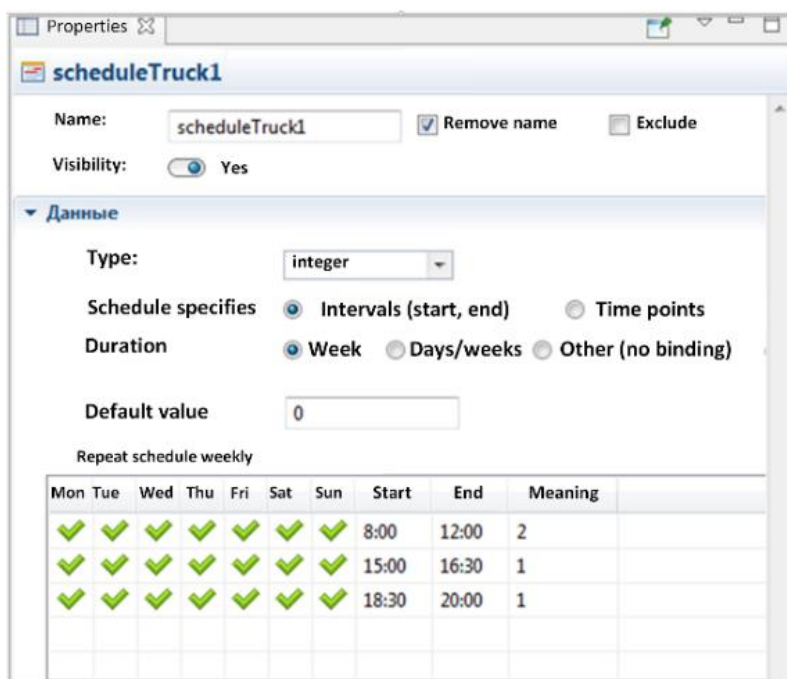


Рисунок 4 – Установление расписания прибытия специализированного автотранспорта

Нами была выдвинута гипотеза о том, что количество и качество используемого специализированного автотранспорта оказывают существенное влияние на эффективность процесса обращения с отходами. Для подтверждения гипотезы был разработан оптимизационный эксперимент, результат выполнения которого представлен на рис. 5.

Waste management - Optimization

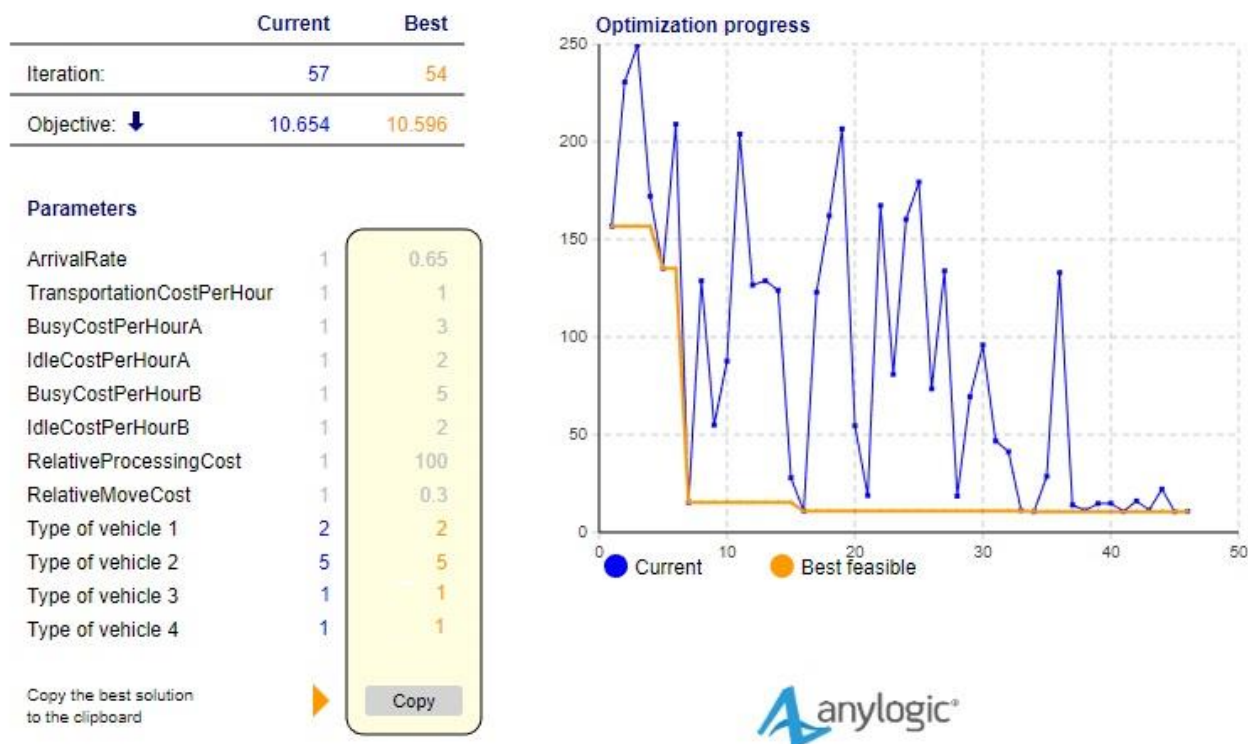


Рисунок 5 – Результаты выполнения оптимизационного эксперимента на модели

Эксперимент по оптимизации проводился с использованием встроенного в AnyLogic оптимизатора OptQuest со следующим критерием остановки: отсутствие улучшения целевой функции в течение 50 последовательных итераций.

Для каждой конфигурации автопарка моделирование проводилось в течение 30 независимых повторений с использованием различных случайных начальных значений для стохастического образования отходов.

В оптимизационном эксперименте количество транспортных средств каждого типа варьировалось в следующих диапазонах:

- Транспортные средства типа А (8 м³) (Type of vehicle 1) – минимум 0, максимум 5;
- Транспортные средства типа В (12 м³) (Type of vehicle 2) – минимум 0, максимум 5;
- Транспортные средства типа С (16 м³) (Type of vehicle 3) – минимум 0, максимум 5;
- Транспортное средство типа D (21 м³) (Type of vehicle 4) – минимум 0, максимум 5.

На рисунке 5 показана сходимость процесса оптимизации (по оси абсцисс – номер эксперимента, по оси ординат – значение целевой функции). Значение целевой функции (общая стоимость логистики) быстро снижалось в течение первых 7 итераций, затем наблюдалось постепенное улучшение, стабилизировавшееся после 16 итераций.

Результаты эксперимента следующие оптимальные значения переменных:

- Количество транспортных средств типа А — 2;
- Количество транспортных средств типа В — 5;
- Количество транспортных средств типа С — 1;
- Количество транспортных средств типа D — 1.

4 Обсуждение и заключение

Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу о том, что количественный и качественный состав специализированного автотранспорта, управляемый на основе данных имитационной модели, оказывает решающее влияние на экономическую и экологическую эффективность системы обращения с отходами.

Предложенная в работе имитационная модель учитывает требования к гетерогенности транспортных потоков и позволяет эффективно решать задачу оптимизации парка специализированного автотранспорта. Модель обеспечивает определение количественного состава каждого вида специализированного автотранспорта, необходимого для минимизации логистических издержек в зависимости от характеристик и объемов образующихся отходов.

Имитационная модель позволяет подобрать оптимальные параметры, изменив текущий вариант использования специализированных автотранспортных средств в лучшую сторону. В качестве целевой функцией была выбрана минимизация затрат на транспортировку отходов.

Результат выполнения эксперимента на модели показал, что расчётный объем затрат на транспортировку отходов при использовании оптимального числа автотранспортных средств может быть снижен относительно базового варианта на 40,64 %.

Таким образом, данное исследование показало, что имитационное моделирование является мощным и эффективным инструментом для получения обоснованных решений, которые позволяют значительно улучшить процессы транспортировки отходов и, как следствие, повысить устойчивость системы обращения с отходами организаций с точки зрения её воздействия на окружающую среду. В итоге это должно привести к повышению эффективности деятельности, что в свою очередь улучшит показатели деятельности организаций в целом.

Данное исследование было посвящено комплексному изучению проблем развития транспортно-логистической системы обращения с отходами, в том числе транспортировки промышленных отходов автомобильным транспортом с учетом экологических факторов. В работе рассматривались теоретические и практические аспекты организации безопасной перевозки отходов, была разработана имитационная модель транспортировки отходов, предложены эффективные методы повышения эффективности транспортных процессов. Исследование направлено на решение актуальной проблемы обеспечения экологической безопасности и повышения экономической эффективности при растущих объемах промышленных отходов в современных условиях.

Цель работы – исследование системы формирования устойчивой транспортно-логистической системы обращения с отходами путем оптимизации процессов транспортировки промышленных отходов автомобильным транспортом с учётом экономической эффективности – достигнута.

Несмотря на положительные результаты, исследование имеет следующие ограничения:

1. Модель предполагает стабильность входных данных, в то время как в реальности могут возникать форс-мажорные обстоятельства (поломки техники, закрытие дорог).
2. Затраты на внедрение и сопровождение самой системы поддержки принятия решений требуют отдельного экономического обоснования.

Исследование может быть продолжено в направлении разработки моделей по оптимизации территориального размещения комплексов по обработке, сортировке, переработке и размещению отходов, а также моделей по оптимизации маршрутов доставки отходов до этих комплексов от мест образования отходов.

Благодарность

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение от 22.12.2025 № 12/2025-ПД-КФУ).

Список литературы

- 1 Федеральный закон от 24 июня 1998 г. N 89-ФЗ "Об отходах производства и потребления" (с изменениями и дополнениями) [Текст] . - М. : [Издат.-АО "Кодекс"], 2025. – 133 с.
- 2 Федеральный закон от 10 января 2022 г. N 7-ФЗ " Об охране окружающей среды" (с изменениями) [Текст] . - М. : [Издат.-АО "Кодекс"], 2025. – 197 с.
- 3 Указ Президента РФ от 07.05.2024 N 309 "О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года" [Текст] . – М. : [Издат.-Официальный интернет-портал правовой информации], 2024. – 13 с.
- 4 Bhattacharyya, S. Risk Modeling Framework for Strategic and Operational Intervention to Enhance the Effectiveness of a Closed-Loop Supply Chain [Электронный ресурс] / S. Bhattacharyya, S. Sarkar, B.D. Sarkar, R. Manatkar // IEEE Trans. Eng. Manag. – 2023. – № 71. – С. 7015–7028.
- 5 Sonar, H. Navigating barriers to reverse logistics adoption in circular economy: An integrated approach for sustainable development / H. Sonar, B. D. Sarkar, P. Joshi, N. Ghag, V. Choubey, S. Jagtap // Sustainable Operations and Computers. – 2024. – Vol. 5. – С. 64–78.
- 6 Ren, R. A Systematic Literature Review of Green and Sustainable Logistics: Bibliometric Analysis, Research Trend and Knowledge Taxonomy / R. Ren, W. Hu, J. Dong, B. Sun, Y. Chen, Z. Chen // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – Vol. 17, № 1. – С. 1-25.
- 7 Agarwal, M.M. A Framework for Adopting a Sustainable Reverse Logistics Service Quality for Reverse Logistics Service Providers: A Systematic Literature Review / M. M. Agarwal, P. K. Agrawal, S. K. Sharma, R. K. Singh // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, № 3. – С. 1-16.
- 8 Мусинова, Н.Н. Актуальные проблемы в сфере обращения с твёрдыми коммунальными отходами / Н.Н. Мусинова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2025. – № 2-2. – С. 233-238.
- 9 Горохова, А.Е. Модель экосистемы обращения с отходами в Российской Федерации / А. Е. Горохова, Н. Ю. Титова, Э. Ю. Чудаев // Фундаментальные исследования. – 2021. – № 12. – С. 105-111.
- 10 Брюханов, А.Ю. Информационная система для мониторинга и управления органическими отходами животноводства / А. Ю. Брюханов, Е. В. Шалавина, Харри Хухта, Э. В. Васильев // АгроЭкоИнженерия. – 2021. – № 4 (109). – С. 94-105.
- 11 Danshyana, S. Information technology for analysis of waste management objects infrastructure / S. Danshyana, A. Nechausov, S. Andrieiev, V. Cheranovskiy // Radioelectronic and Computer Systems. – 2022. – № 2. – P. 97-107.
- 12 Pires, L. M. IoT-Enabled Real-Time Monitoring of Urban Garbage Levels Using Time-of-Flight Sensing Technology / L. M. Pires, J. Figueiredo, R. Martins, J. Martins // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 7. – С. 1-31.
- 13 Lobov, N. Improving the process of transport of solid municipal waste by automobile transport / N. Lobov, D. Maltsev, E. Genson // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 632. – С. 1-6.
- 14 Янковский, Д. И. Мировой опыт логистики в сфере обращения с отходами в условиях экономики замкнутого цикла / Д. И. Янковский // Известия СПбГЭУ. – 2024. – № 4 (148). – С. 187-192.
- 15 Cui, J. Research on optimization of waste sorting and transportation network in smart cities based on garbage volume prediction / J. Cui, Y. Yan, L. Jiang et al. // Discover Computing. – 2025. – Vol. 28. – С. 28-50.
- 16 Alsabt, R. Optimizing waste management strategies through artificial intelligence and machine learning - An economic and environmental impact study / R. Alsabt, W. Alkhaldi, Y. A. Adenle, H. M. Alshuwaikhat // Cleaner Waste Systems. – 2024. – Vol. 8. – С. 1-12.
- 17 Макарова, И. В. Совершенствование логистических операций путем разработки имитационных моделей / И. В. Макарова, В. Г. Маврин, А. Д. Бойко, Л. М. Габсалихова // Воронежский научно-технический вестник. – 2025. – Т. 2, № 2 (52). – С. 46-59.
- 18 Chen, C.-H. The Design and Implementation of a Garbage Truck Fleet Management System / C.-H. Chen, Y.-T. Yang, C.-S. Chang, C.-M. Hsieh, T.-S. Kuan, K.-R. Lo // The South African Journal of Industrial Engineering. – 2016. – Vol. 27, № 1. – P. 32-46.
- 19 Guo, H. System dynamics-based evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal behaviors in low-income urban areas: A Baltimore case study / H. Guo, B. F. Hobbs, M. E. Lasater, C. L. Parker, P. J. Winch // Waste Management. – 2016. – Vol. 56. – P. 547-560.
- 20 Pinha, A. A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis [Электронный ресурс] / A. Pinha, J. Sagawa // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 269. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620323970>.

References

- 1 Federal Law No. 89-FZ of June 24, 1998 "On Production and Consumption Waste" (as amended) [Text]. – Moscow : Kodeks, 2025. – 133 p.
- 2 Federal Law No. 7-FZ of January 10, 2022 "On Environmental Protection" (as amended) [Text]. – Moscow : Kodeks, 2025. – 197 p.
- 3 Decree of the President of the Russian Federation No. 309 of May 07, 2024 "On National Development Goals of the Russian Federation for the Period up to 2030 and for the Future up to 2036" [Text]. – Moscow : Official Internet Portal of Legal Information, 2024. – 13 p.
- 4 Bhattacharyya, S. Risk Modeling Framework for Strategic and Operational Intervention to Enhance the Effectiveness of a Closed-Loop Supply Chain [Electronic resource] / S. Bhattacharyya, S. Sarkar, B.D. Sarkar, R. Manatkar // IEEE Trans. Eng. Manag. – 2023. – Vol. 71. – P. 7015–7028.
- 5 Sonar, H. Navigating barriers to reverse logistics adoption in circular economy: An integrated approach for sustainable development / H. Sonar, B. D. Sarkar, P. Joshi, N. Ghag, V. Choubey, S. Jagtap // Sustainable Operations and Computers. – 2024. – Vol. 5. – P. 64–78.
- 6 Ren, R. A Systematic Literature Review of Green and Sustainable Logistics: Bibliometric Analysis, Research Trend and Knowledge Taxonomy / R. Ren, W. Hu, J. Dong, B. Sun, Y. Chen, Z. Chen // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – Vol. 17, No. 1. – P. 1-25.
- 7 Agarwal, M.M. A Framework for Adopting a Sustainable Reverse Logistics Service Quality for Reverse Logistics Service Providers: A Systematic Literature Review / M. M. Agarwal, P. K. Agrawal, S. K. Sharma, R. K. Singh // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 3. – P. 1-16.
- 8 Musinova, N.N. Current Problems in the Field of Municipal Solid Waste Management / N.N. Musinova // Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law. – 2025. – No. 2-2. – P. 233-238.
- 9 Gorokhova, A.E. Ecosystem Model of Waste Management in the Russian Federation / A. E. Gorokhova, N. Yu. Titova, E. Yu. Chudaev // Fundamental Research. – 2021. – No. 12. – P. 105-111.
- 10 Bryukhanov, A.Yu. Information System for Monitoring and Management of Organic Livestock Waste / A. Yu. Bryukhanov, E. V. Shalavina, Harry Huhhta, E. V. Vasiliev // AgroEcoEngineering. – 2021. – No. 4 (109). – P. 94-105.
- 11 Danshyna, S. Information technology for analysis of waste management objects infrastructure / S. Danshyna, A. Nechausov, S. Andrieiev, V. Cheranovskiy // Radioelectronic and Computer Systems. – 2022. – No. 2. – P. 97-107.
- 12 Pires, L. M. IoT-Enabled Real-Time Monitoring of Urban Garbage Levels Using Time-of-Flight Sensing Technology / L. M. Pires, J. Figueiredo, R. Martins, J. Martins // Sensors. – 2025. – Vol. 25, No. 7. – P. 1-31.
- 13 Lobov, N. Improving the process of transport of solid municipal waste by automobile transport / N. Lobov, D. Maltsev, E. Genson // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 632. – P. 1-6.
- 14 Yankovskiy, D. I. World Experience of Logistics in the Field of Waste Management in the Conditions of Circular Economy / D. I. Yankovskiy // Bulletin of Saint Petersburg State University of Economics. – 2024. – No. 4 (148). – P. 187-192.
- 15 Cui, J. Research on optimization of waste sorting and transportation network in smart cities based on garbage volume prediction / J. Cui, Y. Yan, L. Jiang et al. // Discover Computing. – 2025. – Vol. 28. – P. 28-50.
- 16 Alsabt, R. Optimizing waste management strategies through artificial intelligence and machine learning - An economic and environmental impact study / R. Alsabt, W. Alkhaldi, Y. A. Adenle, H. M. Alshuwaikhat // Cleaner Waste Systems. – 2024. – Vol. 8. – P. 1-12.
- 17 Makarova, I. V. Improvement of logistics operations through the development of simulation models / I. V. Makarova, V. G. Mavrin, A. D. Boyko, L. M. Gabsalikhova // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2025. – Vol. 2, No. 2 (52). – P. 46-59.
- 18 Chen, C.-H. The Design and Implementation of a Garbage Truck Fleet Management System / C.-H. Chen, Y.-T. Yang, C.-S. Chang, C.-M. Hsieh, T.-S. Kuan, K.-R. Lo // The South African Journal of Industrial Engineering. – 2016. – Vol. 27, No. 1. – P. 32-46.
- 19 Guo, H. System dynamics-based evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal behaviors in low-income urban areas: A Baltimore case study / H. Guo, B. F. Hobbs, M. E. Lasater, C. L. Parker, P. J. Winch // Waste Management. – 2016. – Vol. 56. – P. 547-560.
- 20 Pinha, A. A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis [Electronic resource] / A. Pinha, J. Sagawa // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 269. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620323970> (accessed: 14.01.2026).