

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» / Russian journal of resources, conservation and recycling <https://resources.today>

2017, №4, Том 4 / 2017, N4, Vol 4 <https://resources.today/issues/vol4-no4.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/12RRO417.pdf>

DOI: 10.15862/12RRO417 (<http://dx.doi.org/10.15862/12RRO417>)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Апталаев М.Н., Жалко М.Е., Балабанов Д.С., Калинина К.А. Применимость методов имитационного моделирования при решении задачи оптимизации специализированного автомобильного парка для сбора и вывоза твердых коммунальных отходов // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». 2017 №4. <https://resources.today/PDF/12RRO417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12RRO417

**For citation:**

Aptalaev M.N., Zhalko M.E., Balabanov D.S., Kalinina K.A. (2017). Applicability of simulation methods for solving the optimization problem of a specialized automotive fleet for solid municipal waste collection and removal. *Russian journal of resources, conservation and recycling*, [online] 4(4). Available at: <https://resources.today/PDF/12RRO417.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/12RRO417

УДК 656.025.4

**Апталаев Марат Назимович**

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»  
Филиал в г. Лысьва, Россия, Лысьва<sup>1</sup>  
Старший преподаватель  
E-mail: [aptalaev\\_lfpstu@mail.ru](mailto:aptalaev_lfpstu@mail.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=890816](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=890816)

**Жалко Михаил Евгеньевич**

ФГБОУ ВО «Пермский гуманитарно-педагогический университет»  
Филиал в г. Лысьва, Россия, Лысьва  
Магистрант  
E-mail: [Mihailz-49@mail.ru](mailto:Mihailz-49@mail.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=806450](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=806450)

**Балабанов Денис Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»  
Филиал в г. Лысьва, Россия, Лысьва  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [denis\\_balabanov@inbox.ru](mailto:denis_balabanov@inbox.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=666141](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=666141)

**Калинина Ксения Андреевна**

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»  
Филиал в г. Лысьва, Россия, Лысьва  
Студент  
E-mail: [ksechakali98@mail.ru](mailto:ksechakali98@mail.ru)

<sup>1</sup> 618900, Россия, Пермский край, г. Лысьва, ул. Ленина 2а

## Применимость методов имитационного моделирования при решении задачи оптимизации специализированного автомобильного парка для сбора и вывоза твердых коммунальных отходов

**Аннотация.** В статье дается общая характеристика системы сбора и вывоза твердых коммунальных отходов. Дано определение твердых коммунальных (бытовых) отходов, перечислены основные их источники. Рассмотрены элементы, входящие в систему сбора отходов. Рассмотрены подходы к определению оптимальности процесса сбора твердых бытовых отходов. Представлена целевая функция критерия оптимальности рассматриваемой системы. Представлены основные элементы имитационной модели, разработанной в среде моделирования AnyLogic, предназначенной для решения задачи оптимальности процесса сбора и вывоза твердых бытовых отходов. Представлены некоторые полученные результаты. Сделаны выводы о целесообразности и применимости имитационных моделей при решении задач оптимизации.

**Ключевые слова:** твердые бытовые отходы; твердые коммунальные отходы; задача оптимизации; логистика; транспортный процесс; имитационное моделирование; среда AnyLogic

Функционирование любого населенного пункта сопряжено с образованием твердых коммунальных отходов (ТКО) – результата жизнедеятельности населения, предприятий и организаций. Вопросы организации сбора и вывоза ТКО регламентируются актами нормативно-правового характера на всех уровнях исполнительной власти. Предприятия, осуществляющие процесс сбора и вывоза ТКО обязаны обеспечить выполнение указанных нормативно-правовых актов.

Твердые коммунальные (бытовые) отходы – искусственные или естественные материалы, непригодные для дальнейшего использования по причине потери своих потребительских свойств. К ТКО относятся отходы, которые образуются в жилищном секторе; учреждениях финансов, юстиции и управления; предприятиях торговли и общественного питания; предприятиях коммунально-бытового назначения; социально-культурных учреждениях; зрелищных учреждениях; спортивных сооружениях; комплексных учреждениях; учреждениях просвещения; учреждениях здравоохранения; объектах коммунального хозяйства [1].

Количество образующихся твердых коммунальных отходов определяется совокупностью факторов – численностью и плотностью населения, сезонными факторами, определяющими интенсивность образования отходов, количеством и режимом работы предприятий и организаций. Постоянное изменение потребности в услугах по сбору и вывозу твердых коммунальных отходов обуславливает необходимость соразмерной адаптации количества и типа подвижного состава, параметров его работы к изменяющимся условиям внешней среды, к которым относятся: интенсивность образования отходов, температура окружающей среды, свойства отходов. При этом весомыми факторами являются также

состояние производственно-технической базы, стоимость топлива и эксплуатационных материалов, автотранспортных средств и технологического оборудования<sup>2</sup>.

Различные объемы сбора и вывоза твердых бытовых отходов требуют применение соответствующих типов, количества специализированного подвижного состава и способов организации маршрутно-логистической схемы сбора и вывоза отходов, обеспечивающих нормальное функционирование населенного пункта, а именно: санитарно-гигиеническую обстановку, экологическую обстановку, социально-экономическую обстановку, эстетику населенного в существующих условиях эксплуатации с учетом минимизации трудовых и материальных затрат.

Для целей оптимизации системы сбора и вывоза твердых бытовых отходов муниципальных образований в настоящее время необходимо применение передовых методов и средств, базирующихся на достижениях российских и иностранных ученых, обобщающих передовой мировой опыт совершенствования транспортных процессов. Применяемые в настоящее время методы формирования инфраструктуры сбора и вывоза твердых бытовых отходов не в полной мере совершенны и соответствуют современным требованиям.

В связи с этим, проблема совершенствования системы сбора и вывоза твердых коммунальных отходов с территории населенного пункта является актуальной.

Одним из основных элементов системы сбора и вывоза твердых коммунальных отходов является парк специализированного подвижного состава, осуществляющего перемещение отходов к местам сортировки, хранения и утилизации, а также маршруты движения транспортных средств (ТС) в процессе сбора и вывоза отходов [2].

Для решения озвученной проблемы требуется поставить и решить задачу оптимизации системы «специализированное ТС – маршрутная сеть движения ТС – источники ТКО – полигон ТКО».

Профессор С.Н. Трунин отмечает, что при прочих равных условиях, чем меньше количество отходов хранится в пунктах сбора ТКО, тем ниже затраты на их хранение, но выше транспортные затраты на вывоз ТКО, и наоборот, чем большее количество ТКО хранится в пунктах сбора ТКО, тем выше затраты на их хранение, но ниже транспортные затраты [3].

При постановке задачи оптимизации требуется задать целевую функцию оптимизации. В случае оптимизации процессов сбора и вывоза твердых отходов такой функцией может служить минимизация длины маршрутов движения мусоровозов [4]. Также в качестве критерия оптимальности системы обоснован выбор стоимости перевозки 1 т·км ТКО.

Таким образом, критерий оптимальности можно записать следующим образом (1):

$$F \rightarrow \min, \quad (1)$$

где:  $F$  – критерий оптимальности.

Значение функции  $F$  напрямую зависит от ряда параметров, влияющих на стоимость перевозки ТКО, к данным параметрам относятся:

- количество ТС, участвующих в процессе сбора и перевозки ТКО;
- типы и характеристики ТС, участвующих в процессе сбора и перевозки ТКО;

---

<sup>2</sup> Методика расчета количества образующихся твердых отходов на промышленных предприятиях и в учреждениях Республики Татарстан (утв. приказом Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов РТ от 6 марта 1998 г. N 152), 1998.

- характеристики маршрутов сбора ТКО (протяженность, состояние улично-дорожной сети на маршруте и пр.);
- основные параметры транспортного процесса (количество ездов, продолжительность одной ездки, коэффициент использования подвижного состава и пр.);
- объем образования ТКО в местах их сбора;
- количество и тип контейнеров в местах сбора ТКО.

К.И. Манаев совместно с А.Н. Мельниковым предлагают следующий вид целевой функции  $F$  (2), являющейся критерием оптимальности для исследуемой системы, с учетом переменных названных параметров [5]:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot a_i + \sum_{j=1}^u K_j \cdot b_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^u \frac{T_u \cdot q_i \cdot N_i \cdot D_{prj}}{\beta \cdot V_m + t_{1kj} \cdot N_{kj}}}, \quad (2)$$

где:

$q_i$  – вместимость  $i$ -го контейнера,  $m^3$ ;

$l_{er}$  – длина одной ездки с грузом, км;

$\beta$  – коэффициент использования пробега;

$V_m$  – техническая скорость транспортного средства, км/ч;

$t_{1kj}$  – продолжительность разгрузки одного контейнера, ч;

$N_j$  – количество контейнеров, ед.;

$D_{prj}$  – количество рабочих дней в году;

$a_i$  – затраты на содержание  $i$ -ой группы ТС;

$b_j$  – время в наряде, ч.

Авторы отмечают, что прямое решение задачи оптимизации весьма затруднительно, по причине большой размерности данных, и предлагают метод оптимизации по чувствительности.

В рамках данного исследования требуется установить применимость методов имитационного моделирования для решения поставленной задачи оптимизации.

Имитационная модель – это компьютерная программа, которая описывает структуру и воспроизводит поведение реальной системы во времени. Достоинствами имитационного моделирования являются: стоимость, повторяемость, наглядность, универсальность, точность и время. Существует три основные парадигмы имитационного моделирования: дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование и системная динамика.

Каждый из этих методов позволяет описать лишь часть процессов в рассматриваемой системе, а их совместное использование, в рамках многоподходного имитационного моделирования, позволит изучить как систему в целом, так и процессы, происходящие в отдельные ее элементах [6].

Разработка модели ведется с использованием средств среды имитационного моделирования AnyLogic, важным достоинством данного инструмента имитационного моделирования является поддержка всех основных подходов к созданию имитационных моделей: дискретно-событийный, системно-динамический и агентный, а также любую их комбинацию<sup>3</sup>.

На данный момент AnyLogic предлагает наиболее удобные и эффективные инструменты для имитационного моделирования в области логистики [7].

Для построения высокоточной имитационной модели необходимо собрать и подготовить исходные данные. При создании модели вывоза твердых коммунальных отходов такими параметрами будут являться: количество и мощность источников ТКО; количество и типы специализированного подвижного состава, занимающегося перевозкой ТКО; количество полигонов для ТКО; количество сортировочных станций (при наличии); количество и объемы контейнеров для сбора ТКО; пространственное расположение источников ТКО, полигонов, сортировочных станций и контейнеров для сбора ТКО; планировочная структура улично-дорожной сети населенного пункта.

Исходные данные для построения модели были получены в ходе обследования существующей системы вывоза ТКО в г. Лысьва Пермского края, проведенного в рамках выполнения работы по теме «Разработка нормативов накопления твердых коммунальных отходов». Данные работы проводились совместно сотрудниками и студентами кафедры Технических дисциплин ЛФ ПНИПУ в 2017 году.

Были получены следующие исходные данные: число задействованных в процессе сбора и вывоза отходов специализированных ТС, количество и расположение мест сбора ТКО, количество и тип контейнеров в каждом месте сбора отходов, среднесуточный объем образования ТКО в каждом месте сбора, расположение полигона для хранения ТКО.

На основании собранных данных была построена модель, имитирующая процессы сбора и перевозки ТКО специализированным автотранспортом по территории города. Также были разработаны инструменты для сбора статистических данных о процессе вывоза ТКО. В имитационной модели использованы библиотеки имитации потоков и библиотеки имитации процессов. Основные элементы модели представлены на рисунках 1 и 2 [8].

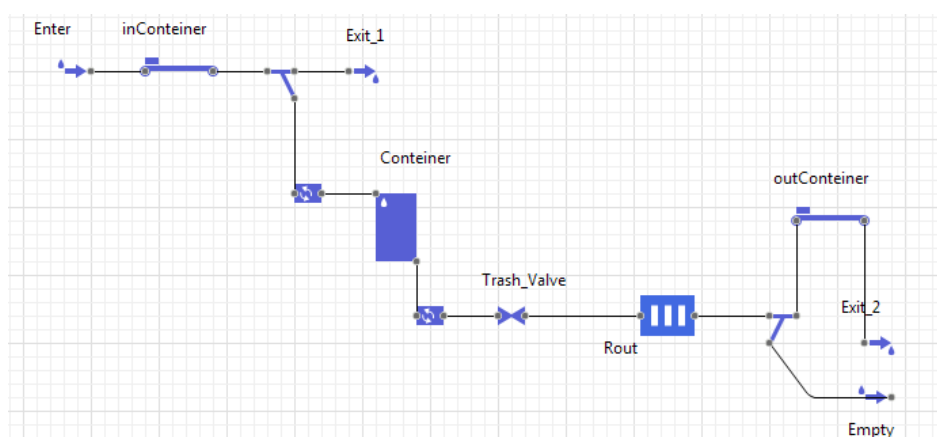
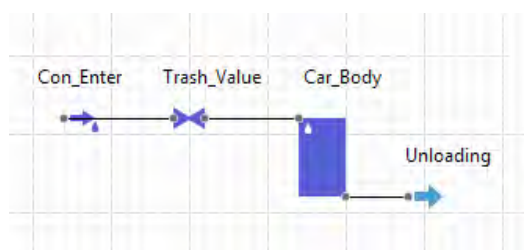


Рисунок 1. Агент типа «Контейнер» (составлено/разработано автором)

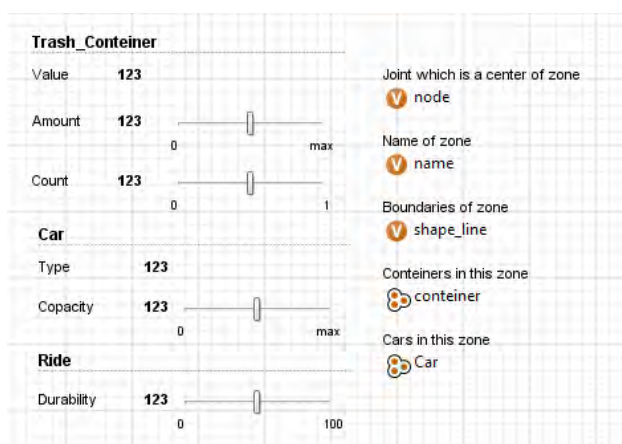
<sup>3</sup> Возможности AnyLogic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/features>.



**Рисунок 2.** Агент типа «Автомобиль» (составлено/разработано автором)

Рисунки демонстрируют логику работы «контейнеров» и автомобилей, участвующих в процессе сбора и вывоза отходов.

В модели предусмотрена возможность изменения основных параметров, определяющих значение целевой функции, этого удалось добиться при помощи использования инструментов системной динамики, активные агенты, задействованные в модели, представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Активные агенты (составлено/разработано автором)

С использованием разработанной имитационной модели был проведен ряд экспериментов, целью которых был подбор оптимальных параметров для системы «специализированное ТС – маршрутная сеть движения ТС – источники ТКО – полигон ТКО». Потребовалось не менее 14 итераций поиска оптимальных значений параметров целевой функции, прежде чем ее значение было признано удовлетворительным.

Установлено, что минимальная стоимость перевозки 1т·км отходов достигается при установлении вместимости точки сбора ТКО равной вместимости мусоровоза. Необходимым условием оптимизации целевой функции является полная загрузка мусоровоза на точке сбора ТКО.

В результате можно сделать следующие выводы:

1. имитационное моделирование – мощный инструмент, позволяющий решать широкий спектр задач в самых разных областях науки и техники;
2. решение задачи оптимизации с помощью имитационных моделей возможно, но требует дополнительной разработки инструментов, позволяющих автоматизировать подбор параметров целевой функции;
3. применение методов имитационного моделирования будет являться целесообразным в тех случаях, когда объект исследования отличается высокой сложностью, и использование традиционных методов потребует неоправданно больших временных затрат;

4. инструменты имитационного моделирования отличаются высокой гибкостью, и одна и та же модель может использоваться в решении принципиально разных задач при внесении минимальных изменений;
5. использование средств имитационного моделирования, предлагаемых программным обеспечением AnyLogic, будет являться целесообразным в тех случаях, когда требуется визуализация исследуемых процессов или объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Минаков, Е.И. Утилизация твердых бытовых отходов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pandia.ru/text/80/050/5490>.
2. Любимов, И.И. К вопросу формирования рациональной структуры городского пассажирского транспорта в городе Оренбурге / И.И. Любимов, Н.З. Султанов, Е.В. Бондаренко // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета). – 2009. – № 3. – С. 21-25.
3. Кузнецов, П.И. Вывоз отходов: оптимальная транспортная партия / Кузнецов, П.И., Кузнецов А.И., Романишкин А.С., Трунин С.Н. // Твердые бытовые отходы. – 2007. № 12. – С. 24-30.
4. Ванюшина, Н.А. Решение некоторых вопросов управления ЖКХ с применением экономико-математических методов / Ванюшина Н.А., Губарь Е.В., Мелихова С.Д., Осипова А.О., Умнова Д.И., Черновой М.А. // Новый взгляд. Международный научный вестник. – 2016. – № 13. – С. 82-91.
5. Манаев, К.И. Оптимизация автомобильного и контейнерного парка при сборе и вывозе твердых бытовых отходов / Манаев К.И., Мельников А.Н. // Вестник ОГУ. – 2014. – №10 (171). С. 130-134.
6. Borshchev A., The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6, 2013.
7. Тихонова, Н.В. Имитационное моделирование с Anylogic в логистике / Тихонова Н.В., Минкова Е.С. // Транспорт и сервис. – 2016. – № 4. – С. 32-41.
8. Ivanov D. (2017). Operations and supply chain simulation with AnyLogic: Decision-oriented introductory notes for master students. 2nd Edition, E-Textbook, Berlin School of Economics and Law (preprint).

**Aptalaev Marat Nazimovich**

Perm national research polytechnic university  
Lysva branch, Russia, Lysva  
E-mail: aptalaev\_lfpstu@mail.ru

**Zhalko Mikhail Evgen'evich**

Perm state humanitarian pedagogical university  
Lysva branch, Russia, Lysva  
E-mail: Mihailz-49@mail.ru

**Balabanov Denis Sergeevich**

Perm national research polytechnic university  
Lysva branch, Russia, Lysva  
E-mail: denis\_balabanov@inbox.ru

**Kalinina Kseniya Andreevna**

Perm national research polytechnic university  
Lysva branch, Russia, Lysva  
E-mail: ksechakali98@mail.ru

## **Applicability of simulation methods for solving the optimization problem of a specialized automotive fleet for solid municipal waste collection and removal**

**Abstract.** The article gives a general description of the solid municipal waste collecting and exporting system. The definition of solid municipal (household) wastes is given, main waste sources are listed. The elements included in the waste collection system are considered. Approaches to determining the optimality of the collecting solid domestic wastes process are considered. The objective function of the criterion of optimality is presented. The basic elements of the simulation model developed in the AnyLogic modeling environment designed to solve the problem of optimality of the solid municipal waste collection and removal process are presented. Some results are presented. Conclusions are made about the feasibility and applicability of simulation models for solving optimization problems.

**Keywords:** solid household waste; solid municipal waste; optimization problem; logistics; transport process; simulation simulation; AnyLogic IDE



## REFERENCES

1. Pandia. (n.d.). Minakov E.I. *Utilization of solid household waste*. [online] Available at: <http://pandia.ru/text/80/050/5490> (in Russian).
2. Lyubimov I.I., Sultanov N.Z., Bondarenko E.V. (2009). To a question of formation of rational structure of city passenger transport in the city of Orenburg. *Vestnik Moscow road-road institute (state technical university)*, 3, pp. 21-25. (in Russian).
3. Kuznetsov P.I., Kuznetsov A.I., Romanishkin A.S., Trunin S.N. (2007). Waste transport: optimal transport. *Tverdye bytovye otkhody*, 12, pp. 24-30. (in Russian).
4. Vanyushina N.A., Gubar' E.V., Melikhova S.D., Osipova A.O., Umnova D.I., Chernovoi M.A. (2016). Solution of some issues of housing and communal services management using economic and mathematical methods. *Novyi vzglyad. Mezhdunarodnyi nauchnyi vestnik*, 13, pp. 82-91. (in Russian).
5. Manaev K.I., Melnikov A.N. (2014). Optimization of road and container fleet in the collection and disposal of solid waste. *Bulletin of the OGU*, 10 (171), pp. 130-134. (in Russian).
6. Borshchev A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6*.
7. Tikhonova N.V., Minkova E.S. (2016). Simulation modeling with Anylogic in logistics. *Transport and service*, 4, pp. 32-41.
8. Ivanov D. (2017). *Operations and supply chain simulation with AnyLogic: Decision-oriented introductory notes for master students*. Berlin: Berlin School of Economics and Law.