

№1

ISSN 2222-9396

Современные проблемы транспортного комплекса России

**Международный
научный журнал**

- выбор зелёных технологий в складской логистике – многокритериальный подход
- исследование эффективности перевозочной работы тепловозов *UZTE16M3*
- особенности построения агентной имитационной модели железнодорожной станции
- методика расчёта рациональных параметров контейнерного депо

• инфраструктура • логистика • технология • организация
• управление • экономика • техника • методология



www.transcience.ru

**2021
том 11**

International Scientific Journal

**Modern Problems of Russian
Transport Complex**

2021, Vol.11, No.1

Современные проблемы транспортного комплекса России

2021. Т. 11, №1

Журнал индексируется: РИНЦ, Crossref, BASE, CiteFactor, ERIH PLUS, ESJI, EZB, Google Scholar, OAI, OpenAIRE, PKP Index, ResearchBib, ROARMAP, Scilit, WorldCat, ВИНТИ РАН, Киберленинка

Электронная версия журнала размещается:

- Научная Электронная Библиотека (НЭБ) – <https://elibrary.ru/>
- сайт журнала – <https://transcience.ru>
- сайт научной электронной библиотеки «Киберленинка» – <https://cyberleninka.ru>

Издается с 2011 года

Редакционный совет

Б. Абрамович – Загребский университет, Хорватия
А.И. Адилходжаев – Ташкентский институт инженеров
железнодорожного транспорта, Узбекистан
Э. Бабулак – Национальный научный фонд,
Александрия, Виргиния, США
В.В. Багинова – Российский университет транспорта,
Москва, Россия
Т.П. Воскресенская – Сибирский государственный
индустриальный университет, Новокузнецк, Россия
М. Вохоска – Институт технологий и бизнеса
в Ческе-Будеёвице, Чехия
Е.П. Дудкин – Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора Александра-I,
Россия
С.Н. Корнилов – Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова, Россия
П. Митра – Индийский технологический институт
в Харагпуре, Индия
А.Т. Попов – Липецкий государственный технический
университет, Россия
В. Росо – Технический университет Чалмерс, Швеция
В.М. Сай – Уральский государственный университет
путей сообщения, Екатеринбург, Россия
А.В. Сладковский – Силезский технический
университет, Катовице, Республика Польша

Ж. Стевич – Восточно-Сараевский университет,
Добой, Босния и Герцеговина
М. Страка – Технический университет в Кошице,
Словакия
Ш. Фенг – Даляньский университет информатики
Neusoft, КНР
К.Ш. Шункеев – Актыбинский региональный
государственный университет им.К.Жубанова, Ка-
захстан
Х. Ху – Шанхайский университет транспорта, КНР

Главный редактор
А.Н. Рахмангулов

Зам. главного редактора
Н.А. Осинцев

Редакционная коллегия
М.А. Зайцева

О.А. Копылова

П.Н. Мишуров

В.А. Пикалов

О.В. Фридрихсон

А.В. Цыганов

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2021

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

16+, в соответствии с Федеральным Законом от 29.12.10. №436-ФЗ.

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Тел.: (3519) 29-85-16
URL: <https://transcience.ru>
E-mail: editor@transcience.ru

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова
Выход в свет 30.12.2021.
Заказ 305. Тираж 500 экз. Цена свободная.

Modern Problems of Russian Transport Complex

2021, Vol. 11, No. 1

Indexing: Russian Science Citation Index, Crossref, BASE, CiteFactor, ERIH PLUS, ESJI, EZB, Google Scholar, OAI, OpenAIRE, PKP Index, ResearchBib, ROARMAP, Scilit, WorldCat, Russian VINITI RAS, CyberLeninka

Online versions of the journal can be found in the:

- Scientific Electronic Library – <https://elibrary.ru>
- Journal web-site – <http://transience.org>
- Scientific Electronic Library «CyberLeninka» – <https://cyberleninka.ru>

PUBLISHED SINCE 2011

Editorial Board Members

B. Abramovic – University of Zagreb, Croatia
A.I. Adilhodzaev – Tashkent Railway Engineering institute, Uzbekistan
E. Babulak – National Science Foundation, Alexandria, Virginia, United States
V.V. Baginova – Russian University of Transport, Moscow, Russia
T.P. Voskresenskaya – Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia
M. Vochozka – Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, Czech Republic
E.P. Dudkin – Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia
S.N. Kornilov – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
P. Mitra – Indian Institute of Technology Kharagpur, India
A.T. Popov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia
V. Roso – Chalmers University of Technology, Sweden
V.M. Say – Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia
A.V. Sladkowski – Silesian University of Technology, Katowice, Poland

Z. Stević – University of East Sarajevo, Dobo, Bosnia and Herzegovina
M. Straka – Technical university of Kosice, Slovakia
S. Feng – Dalian Neusoft University of Information, China
K.S. Shunkeyev – K. Zhubanov Aktobe Regional State University, Kazakhstan
H. Hu – Shanghai Jiao Tong University, China

Editor-in-chief

A.N. Rakhmangulov

First deputy chief editor

N.A. Osintsev

Executive editors

M.A. Zaitseva
O.A. Kopylova
P.N. Mishkurov
V.A. Pikalov
O.V. Fridrikhson
A.V. TSyganov

© Federal state budgetary institution of higher education
«Nosov Magnitogorsk State Technical University», 2021

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University
(455000, Chelyabinsk Region, Magnitogorsk, Lenin prospect, 38)
16+ in accordance with the Federal Law 29.12.10. №436-FL

Editorship address:

455000, Russia, Magnitogorsk, Lenin prospect, 38
Phone number: +7(3519) 29-85-16.
URL: <http://transience.org>
E-mail: editor@transience.ru

Printed in the Printing NMSTU Area
Signed for press 2021.12.30.
Order 305. Circulation – 500 items. Free of charge.

СОДЕРЖАНИЕ

Логистика

Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н. Выбор зелёных технологий в складской логистике – многокритериальный подход....4

Техника транспорта

Аблялимов О.С. Исследование эффективности перевозочной работы тепловозов *UZTE16M3* и тяговые качества профиля пути участка мароканд – навои узбекской железной дороги 18

Методология транспортной науки

Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н. Особенности построения агентной имитационной модели железнодорожной станции..... 32

Транспортная инфраструктура

Азимов Ф.К., Илесалиев Д.И., Цыганов А.В. Методика расчёта рациональных параметров контейнерного депо.....41

CONTENTS

Logistics

Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N. Green technologies' selection for the warehouse logistics – multi-criteria approach 4

Transport Equipment

Abliatimov O.S. Research of the efficiency of locomotive *UZTE16M3* operation and tractive qualities of the rail track profile Marokand – Navoi line of Uzbek railway..... 18

Transport Science Methodology

Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. Construction features of railway station agent-based simulation model 32

Transport Infrastructure

Azimov F.K., Ilesaliev D.I., Tsyganov A.V. Methodology for calculating the rational parameters of a container depot 41

ISSN 2222-9396 (Print)
УДК 656.07:004.896
<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-4-17>



ВЫБОР ЗЕЛЁНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКЕ – МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Осинцев Н.А.^{1*}, Рахмангулов А.Н.¹

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

* E-mail: osintsev@magtu.ru

Аннотация. В статье представлен новый подход к выбору зелёных технологий в складской логистике. Предлагается использование многокритериальных методов принятия решений (MCDM). Разработана MCDM модель ранжирования и выбора зелёных технологий, основу которой составляют 15 показателей логистических потоков и 17 инструментов зелёной логистики. Представлен расчётный пример реализации разработанной MCDM модели с использованием 13 методов: DEMATEL, ANP, SAW, TOPSIS, COPRAS, MOORA, ARAS, WASPAS, MAIRCA, EDAS, MABAC, CODAS, MARCOS. Сравнение результатов применения различных MCDM методов показало их высокую сходимость – коэффициент ранговой корреляции Спирмена составил 0.88.

Ключевые слова: складская логистика, склад, зелёная логистика, зелёные технологии, многокритериальные методы принятия решений, MCDM, управление цепями поставок, устойчивое развитие

© Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н., 2021

Поступила: 05 октября 2021 г.; Принята к публикации: 06 ноября 2021 г.; Опубликовано: 30 декабря 2021 г.

Для цитирования:

Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н. Выбор зелёных технологий в складской логистике – многокритериальный подход // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2021. Т.11. №1. С. 4-17.
<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-4-17>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ISSN 2222-9396 (Print)

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-4-17>

GREEN TECHNOLOGIES' SELECTION FOR THE WAREHOUSE LOGISTICS – MULTI-CRITERIA APPROACH

Osintsev N.A.^{1*}, Rakhmangulov A.N.¹

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

* E-mail: osintsev@magtu.ru

Abstract. The article presents a new approach to the green technologies' selection in warehouse logistics. The use of multi-criteria decision-making methods (MCDM) is proposed. The authors have developed an MCDM model, which is based on 15 indicators of logistics flows and 17 green logistics instruments. A computational example of the implementation of the developed MCDM model using 13 methods is presented: DEMATEL, ANP, SAW, TOPSIS, COPRAS, MOORA, ARAS, WASPAS, MAIRCA, EDAS, MABAC, CODAS, MARCOS. Comparison of the results of using various MCDM methods showed their high convergence – Spearman's rank correlation coefficient was 0.88.

Keywords: warehouse logistics, warehouse, green logistics, green technologies, multi-criteria decision-making, MCDM, supply chain management, sustainable development

© Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N., 2021

Received: October 05, 2021; Accepted: November 06, 2021; Published: December 30, 2021

For citation:

Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N. Green Technologies' Selection for the Warehouse Logistics – Multi-Criteria Approach // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2021, vol.11, no.1, pp. 4-17. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-4-17>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

Увеличение объёмов потребления в мировой экономической системе привели к растущей потребности в складских площадях и зданиях. Например, с 2007 по 2017 годы численность вновь построенных складов в США увеличилась на 143% [1]. В России и Европейских странах, по оценке агентства Knight Frank [2], на рынке складской недвижимости наблюдается рост объёмов строительства и прогнозируется увеличение спроса в 2022 году. Интерес инвесторов к логистическому сектору остаётся высоким, наблюдается рост цен на аренду складских помещений и увеличение спроса на склады «последней мили». Требования к складским площадям варьируются от больших складов в крупных региональных логистических центрах до небольших складских помещений городских логистических операторов, обеспечивающих минимальное время доставки товаров конечному потребителю.

Рыночные изменения в складских и логистических системах вынуждают адаптировать и трансформировать существующие бизнес-модели в модели, основанные на принципах современных концепций «Индустрия 4.0» [3, 4] и «Устойчивое развитие» [1]. Как элементы цепей поставок, склады вносят значительный вклад в рост выбросов парниковых газов, являются основными потребителями электрической и тепловой энергии [1, 5]. На складские услуги приходится примерно 11% общих выбросов парниковых газов, производимых логистическим сектором во всем мире [1].

Логистические компании сталкиваются с проблемой выбора наиболее эффективных зелёных решений в своей деятельности из-за множества факторов, влияющих на принятие решения. Многокритериальные методы принятия решений (MCDM) являются эффективным инструментом решения этих проблем. Их использование направлено на качественную и количественную оценку возможных управленческих решений (альтернатив) по множеству противоречивых экономических, социальных и экологических критериев логистической деятельности [6]. Основная задача их использования – не предложить лучшее решение, а поддержать лиц, принимающих решения, в выборе альтернативных вариантов, соответствующих их целям и предпочтениям [7].

Целью настоящей работы является разработка методики ранжирования и выбора зелёных решений в складской логистике, обеспечивающих достижение целей устойчивого развития в цепи поставок. Статья содержит краткий обзор литературы по использованию зелёных решений и MCDM методов в складской логистике, описание разработанной методики ранжирования и выбора инструментов зелёной логистики для накопительного (складского) элемента цепи поставок, а также результаты тематического исследования по применению комбинированной MCDM модели ранжирования инструментов зелёной логистики в складской деятельности.

2. Литературный обзор

Несмотря на то, что концепция управления зелёными цепями поставок все больше привлекает внимание научного сообщества и практиков, исследований в области зелёного складирования (Green Warehousing) до сих пор недостаточно [1]. В литературном обзоре [1] авторы выделяют три ключевые области в научных исследованиях по зелёным складам:

- зелёное управление складом (экологические принципы и инициативы, системы экологической сертификации складских помещений, оказывающие влияние на эффективность работы склада);
- исследование воздействия складских зданий на окружающую среду (параметры и конструкция склада, такие как вид и размер склада, использование пространства, а также складские процессы, такие как освещение, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха, влияющие на выбросы в окружающую среду и потребление энергии);
- энергоэффективность на складе (инициативы, направленные на экономию энергии на складе – погрузочно-разгрузочное оборудование, уровень механизации и автоматизации основных складских процессов, системы хранения и поиска товара).

Проблемы устойчивого инжиниринга при управлении складскими системами рассмотрены в [8, 9]. В [8] предложена модель рационального планирования рабочей силы на складе с учётом социальных аспектов устойчивого развития. Авторы [9] на основе комбинации теории заинтересованных сторон и институциональной теории выполнили анализ и систематизировали факторы реализации зелёных практик на складах. Ими рассмотрены вопросы заинтересованности различных стейкхолдеров (государства, владельцев складской инфраструктуры, сотрудников складов, поставщиков и потребителей) к проблемам зелёного складирования.

Важной областью исследований зелёного складирования являются проблемы энергопотребления при проектировании и эксплуатации складских систем на промышленных или распределительных складах [10, 11, 1]. Ряд исследований посвящены проблемам энергоэффективности как одному из основных параметров зелёного склада. По мнению [12] основной драйвер стратегии зелёного склада основан на сокращении потребления энергии. В исследованиях [13] представлена модель оценки энергоёмкости логистической системы управления складом. В [14] представлена оптимизационная модель экономии энергии и снижения выбросов CO₂ в логистических центрах. В работе [15] выполнено сравнение шести различных складских технологий, различающихся по уровню энергопотребления. В [16] предложено использование литий-ионных аккумуляторов для снижения воздействия погрузочно-разгрузочного оборудования на окружающую среду.

Значительная часть исследований посвящена вопросам зелёного строительства (Green Building) [17–19] в складской деятельности. В работе [20] выполнен

анализ международных стандартов оценки экологической и энергетической устойчивости зданий LEED (США), BREEAM (Великобритания), DGNB (Германия), Green Globes (США, Канада), CASBEE (Япония), BEAM (Гонконг), BCA Green Mark Scheme (Сингапур), Living Building Challenge (США) и др. По результатам анализа сформулированы основные задачи зелёного строительства и зелёного складирования, обоснованы преимущества применения «зелёных» стандартов для окружающей среды и общества, выявлены экономические выгоды при строительстве «зелёных» зданий по сравнению с традиционными

сооружениями.

Множество аспектов устойчивости зелёных цепей поставок требуют реализации сложных моделей поддержки принятия решений с использованием многокритериальных методов MCDM. В настоящее время MCDM активно используются в области устойчивой инженерии [21], управления цепями поставок [22], на транспорте [23], в зелёной логистике [24]. В **табл. 1** представлены результаты анализа применения многокритериальных методов принятия решений в складской деятельности.

Таблица 1. Анализ использования MCDM методов в складской логистике

Table 1. MCDM methods in warehouse logistics

Область исследований	MCDM метод	Источник
Выбор месторасположения склада	AHP, TOPSIS, ELECTRE	[25]
Выбор месторасположения склада	fuzzy AHP, fuzzy TOPSIS	[26]
Выбор месторасположения склада	AHP, fuzzy VIKOR	[27]
Выбора месторасположения склада в цепи поставок	fuzzy, SAW, TOPSIS	[28]
Оценка производительности распределительного центра	DEA, PROMETHEE II	[29]
Выбор погрузочно-разгрузочного оборудования для складов	fuzzy AHP, fuzzy TOPSIS	[30]
Выбор погрузочно-разгрузочного оборудования для складов	MARCOS	[31]
Оценка и выбор автоматически управляемых транспортных средств для складов	FUCOM, EDAS	[32]
Оценка и выбор технологии штрих-кодирования в складской системе	fuzzy PIPRECIA	[33]

Основным недостатком рассмотренных примеров использования MCDM в складской логистике является акцент на технические, технологические, организационные и экономические аспекты складской деятельности, слабо учитывающий влияние работы склада на окружающую среду. Это делает актуальным научные исследования в области выбора и использования зелёных технологий применительно к складским системам в цепях поставок для достижения целей концепции устойчивого развития.

3. Методика выбора инструментов зелёной логистики с использованием MCDM модели

На **рис. 1** представлена принципиальная схема предлагаемой методики выбора инструментов зелёной логистики для накопительного элемента цепи поставок с использованием MCDM методов. Основные этапы методики включают:

Этап 1. Формируется многокритериальная модель накопительного элемента зелёной цепи поставок. Основу модели составляют система параметров и показателей логистических потоков и комплекс зелёных решений (**рис. 1**). В настоящей работе предлагается разработанная авторами система, включающая 5 групп параметров и 15 показателей [34]. В качестве зелёных решений используются инструменты зелёной логистики накопительного элемента логистической системы [35].

Этап 2. Использование комбинации методов DEMATEL (Лаборатория оценки и испытаний принятия решений) [36] и ANP (Аналитический сетевой процесс) [37] для определения взаимосвязей между

параметрами и показателями логистических потоков и установления весовых коэффициентов показателей логистических потоков. Авторами настоящей статьи разработана методика ранжирования показателей логистических потоков на основе комбинированного метода DEMATEL-ANP [34]. Метод DEMATEL позволяет структурировать сложные причинно-следственные связи с помощью матриц и орграфов, которые отображают взаимосвязи между параметрами и показателями логистических потоков и показывают силу влияния показателей друг на друга. Результатом выполнения DEMATEL является построение карты сетевых отношений показателей логистических потоков. Метод ANP является обобщением метода AHP (Аналитический иерархический процесс) и позволяет учитывать зависимости и обратные связи между показателями, рассматривая их структуру как сеть. С использованием ANP выполняется ранжирование показателей логистических потоков и определяются их весовые коэффициенты.

Этап 3. Ранжирование и выбор инструментов зелёной логистики различными методами MCDM с использованием рассчитанных значений весовых коэффициентов показателей логистических потоков. В настоящей работе авторы, помимо основных методов DEMATEL и ANP, использовали 11 дополнительных методов для оценки адекватности используемой MCDM модели. В **табл. 2** представлена краткая характеристика используемых в работе MCDM методов. С алгоритмами реализации каждого метода можно ознакомиться в научной литературе [38-48].

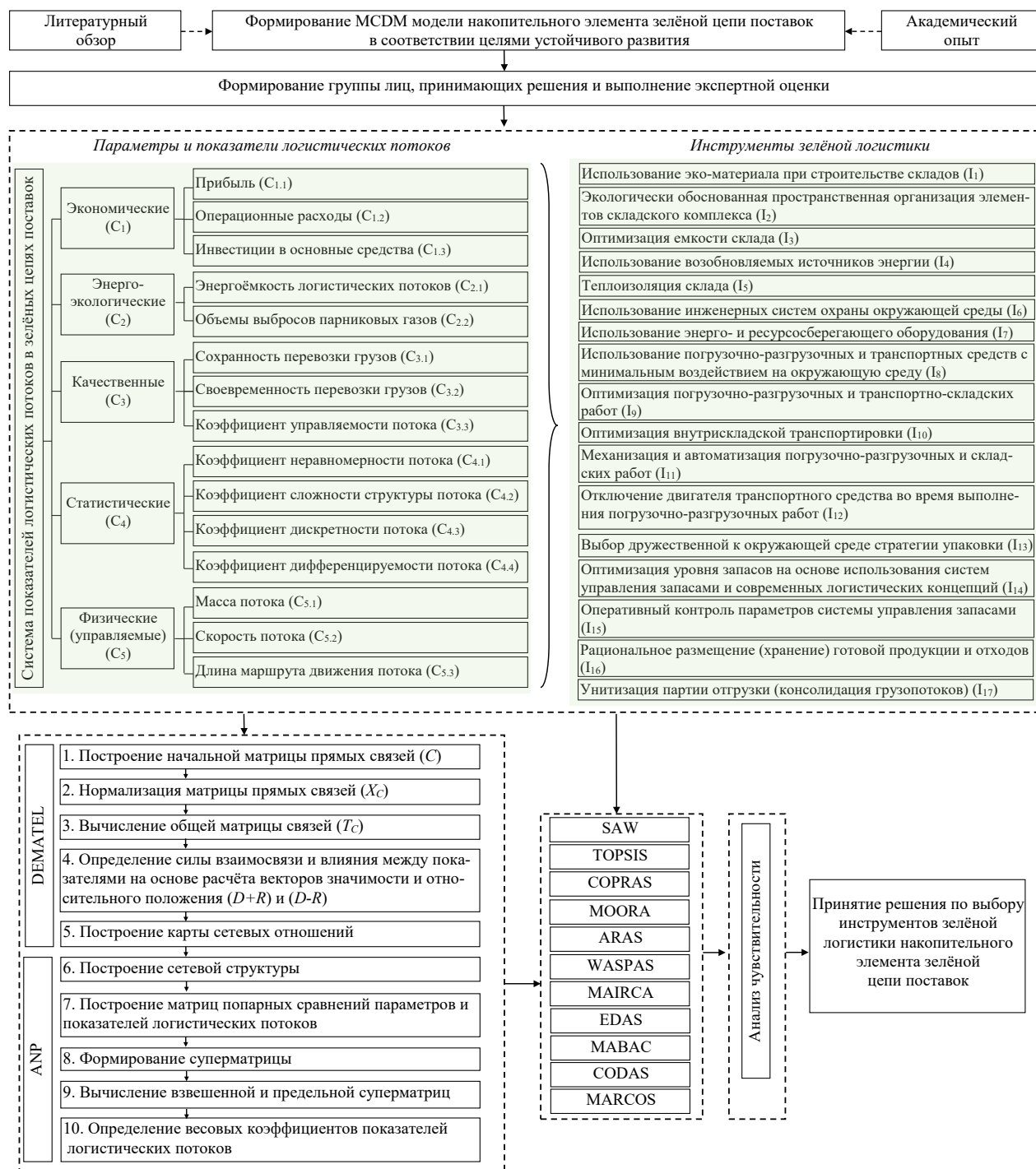


Рис. 1. Общая схема MCDM модели по выбору инструментов зелёной логистики для накопительного элемента цепей поставок

Fig. 1. MCDM model of the green logistics instrument selection for a supply chains' stocks element

Таблица 2. Характеристика используемых многокритериальных методов принятия решений
 Table 2. Characteristics of the used multicriteria decision-making methods

№	Акроним метода	Название MCMD метода	Краткая характеристика (основная идея метода)	Сложность расчётов
1	SAW	Метод простого аддитивного взвешивания (Simple Additive Weighting) [38]	Оценка каждой альтернативы по каждому критерию с использованием взвешенной суммы оценок.	Низкая
2	TOPSIS	Метод расстановки приоритетов по сходству с идеальным решением (Technique for the Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) [39]	Выбор альтернативы, наиболее близкой к положительному идеальному решению и наиболее далёкой от отрицательного идеального решения.	Средняя
3	COPRAS	Метод комплексной пропорциональной оценки (Complex Proportional Assessment) [40]	Выбор лучшей альтернативы с учётом как наилучшего, так и наихудшего решений.	Низкая
4	MOORA	Метод многоцелевой оптимизации на основе анализа соотношений (Multi-Objective Optimization On The Basis of Ratio Analysis) [41]	Оценка каждой альтернативы сравнивается с квадратным корнем из суммы квадратов оценок каждой альтернативы для каждой цели. Ранжирование альтернатив основано на определении индекса ранжирования как разности между его суммами взвешенных нормализованных степеней эффективности критериев «выгода» и «затраты».	Низкая
5	ARAS	Метод оценки аддитивного отношения (Additive Ratio Assessment) [42]	Сравнение значения функции полезности каждой альтернативы со значением функции полезности оптимальной альтернативы.	Средняя
6	WASPAS	Метод совокупной взвешенной суммы (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) [43]	Сочетание модели взвешенной суммы (WSM) и модели взвешенного продукта (WPM) для определения совместного обобщённого критерия взвешенной агрегации аддитивных и мультипликативных методов для каждой альтернативы.	Низкая
7	MAIRCA	Метод сравнительного анализа идеального и реального с множеством атрибутов (Multi-Attributive Ideal-Real Comparative Analysis) [44]	Оценка разницы («разрыва») между идеальными и эмпирическими оценками. Наилучшей является альтернатива наиболее близкая к идеальным оценкам по большинству критериев, т.е. альтернатива с наименьшим значением общего «разрыва».	Средняя
8	EDAS	Метод оценки отклонения от среднего решения (The Evaluation based on Distance from Average Solution) [45]	Оценка и ранжирование альтернатив на основе расчёта положительных и отрицательных расстояний от среднего значения.	Средняя
9	MABAC	Метод сравнения многокритериальных разграниченных областей (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison) [46]	Оценка и ранжирование альтернатив на основе расчёта расстояний между альтернативами и границами области аппроксимации.	Низкая
10	CODAS	Метод комбинированной дистанционной оценки (Combinative Distance-based Assessment) [47]	Расчёт евклидова расстояния и расстояния такси для выбора лучшей альтернативы. Если две альтернативы имеют одинаковое значение евклидова расстояния, то расстояние такси используется для выбора лучшей альтернативы.	Средняя
11	MARCOS	Метод оценки альтернатив и ранжирование в соответствии с компромиссным решением (Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution) [48]	Расчёт отношения между альтернативами и эталонными значениями (идеальные и анти-идеальные альтернативы) и определения функций полезности в отношении идеальной и анти-идеальной альтернативы.	Средняя

4. Пример выбора зелёных технологий в складской логистике

Исходная MCDM модель включает пятнадцать критериев $C_{1.1}...C_{5.3}$ [34] и семнадцать альтернатив $I_1...I_{17}$ [35] (см. рис. 1). Вес показателей логистических потоков принят на основании исследований, представленных в работе [34] (рис. 2).

Оценка инструментов зелёной логистики накопи-

тельного элемента цепей поставок выполнялась с привлечением четырёх академических экспертов (два доктора и два кандидата технических наук, средний стаж работы более 25 лет). Результаты экспертной оценки представлены в табл. 3.

Результаты ранжирования инструментов зелёной логистики для накопительного элемента цепи поставок представлены на рис. 3 и в табл. 4–5.

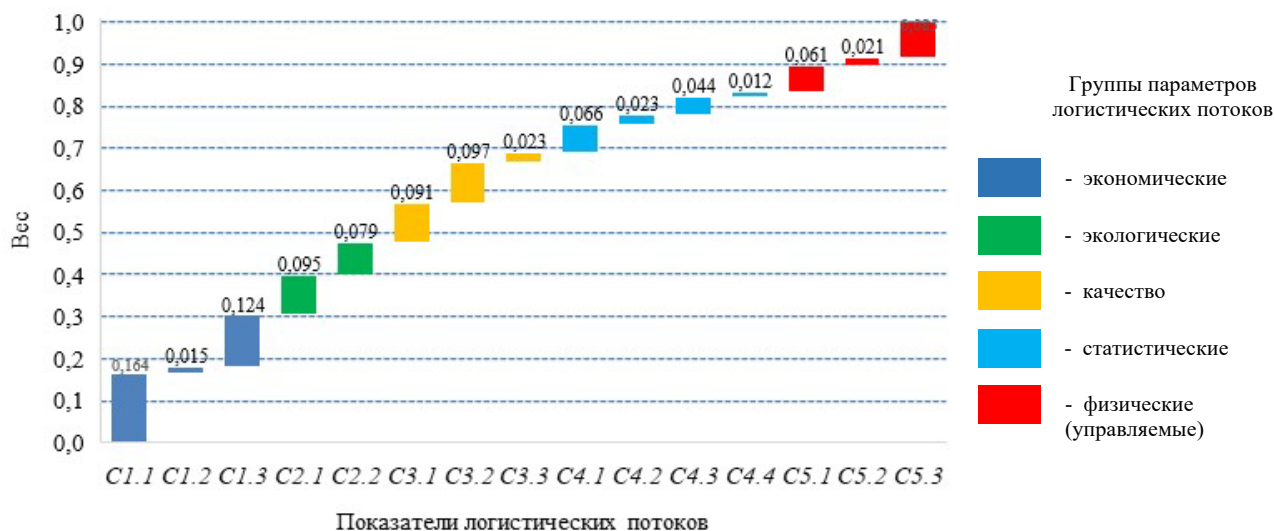


Рис. 2. Весовые коэффициенты показателей логистических потоков в зелёных цепях поставок (метод DEMATEL-ANP) [34]

Fig. 2. Weight of logistic flows indicators in green supply chains using the DEMATEL-ANP method [34]

Таблица 3. Результаты экспертной оценки инструментов зелёной логистики (начальная матрица принятия решений)

Table 3. The results of the green logistics instruments assessment (initial decision-making matrix)

I_i/C_j	$C_{1.1}$ (max)	$C_{1.2}$ (min)	$C_{1.3}$ (max)	$C_{2.1}$ (min)	$C_{2.2}$ (min)	$C_{3.1}$ (max)	$C_{3.2}$ (max)	$C_{3.3}$ (max)	$C_{4.1}$ (min)	$C_{4.2}$ (min)	$C_{4.3}$ (min)	$C_{4.4}$ (min)	$C_{5.1}$ (max)	$C_{5.2}$ (max)	$C_{5.3}$ (min)
I_1	1.75	3	4.25	2.5	2.5	1.25	1	1	1	1	1	1	1	1	1
I_2	1.75	2.75	4.25	2.75	3.25	1.75	2	2	1.75	1.75	1.75	1.75	2	2	1.5
I_3	3	3	4.25	2.75	2.5	2.25	3	3.75	3.25	3.25	3	2.75	3	3.5	2.75
I_4	3.75	3.75	4	4.25	4.75	1.25	1.25	1	1	1	1	1	1	1	1
I_5	2.75	4	3.5	4.25	4	3.5	1.5	1.25	1.5	1.25	1	1	1.25	1.5	1
I_6	2.25	3.25	4	3.5	4.25	2.5	1.75	2.5	1.5	1.25	1	1	1	1	1
I_7	3.75	4.5	4.5	4.5	4.75	2	1.5	1.5	1.5	1	1	1	1.5	1.25	1
I_8	2.25	3.25	4	4	5	2.25	1.75	1.75	1.5	1.75	1.25	1.25	1.5	1.5	1.25
I_9	3.5	4.5	2.75	3.75	3.75	3	3.75	3.5	4.25	3.5	4	3.75	2.75	3.75	2.5
I_{10}	3	4	2	3.5	3.25	2.5	3.25	3.5	3.25	3	3	2.5	2.25	3.5	2.5
I_{11}	4	4.25	4.75	3.25	3	3	3.5	3.25	3	2.25	2.5	2.5	2.25	3.75	2.5
I_{12}	3	4.25	1.5	3.75	4.75	1.25	1.25	1.25	1	1	1.25	1.25	1.25	1.5	1.25
I_{13}	2.75	3.5	2	3	4.25	1.75	2.25	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1
I_{14}	4.25	4.25	2.75	4.5	4	3.5	3.75	3.75	4	3.25	3.25	3.25	3.5	4.25	2.5
I_{15}	4.25	3.75	1.75	3.25	3	3.25	3.75	4	3.75	3.75	3.25	3.25	3.25	3.75	2.5
I_{16}	3	3.25	2.5	2.5	3	3	2.25	2	2.5	3	2.5	3	3	3	3
I_{17}	3.5	4.25	1.75	3.75	3.25	3.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.5	4.25	3.75	4.5	3

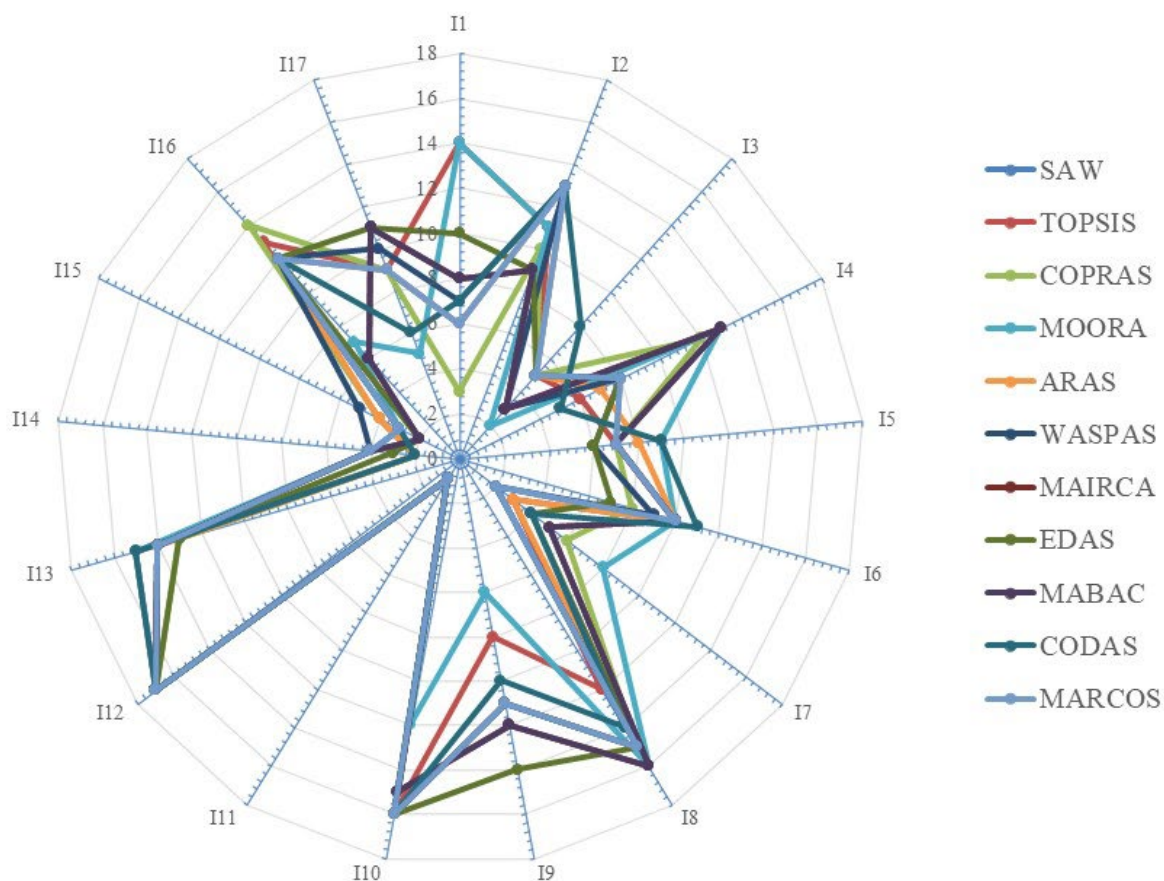


Рис. 3. Результаты ранжирования инструментов зелёной логистики различными MCDM методами
 Fig 3. Results of ranking green logistics instruments by various MCDM

Таблица 4. Результаты оценки инструментов зелёной логистики методами SAW, TOPSIS, COPRAS, MOORA, ARAS

Table 4. Results of assessing green logistics instruments using SAW, TOPSIS, COPRAS, MOORA, ARAS methods

Инструмент	SAW	TOPSIS	COPRAS	MOORA	ARAS
I ₁	6	0.6779	14	0.0537	3
I ₂	13	0.6240	11	0.0550	10
I ₃	5	0.6957	5	0.0637	5
I ₄	8	0.6749	6	0.0601	12
I ₅	7	0.6757	7	0.0597	7
I ₆	10	0.6611	10	0.0574	8
I ₇	2	0.6983	3	0.0650	6
I ₈	15	0.6120	12	0.0547	15
I ₉	11	0.6472	8	0.0596	11
I ₁₀	16	0.5995	16	0.0515	16
I ₁₁	1	0.7454	1	0.0773	1
I ₁₂	17	0.5663	17	0.0464	17
I ₁₃	14	0.6193	15	0.0528	13
I ₁₄	4	0.6962	2	0.0667	2
I ₁₅	3	0.6967	4	0.0643	4
I ₁₆	12	0.6414	13	0.0543	14
I ₁₇	9	0.6630	9	0.0579	9

Таблица 5. Результаты оценки инструментов зелёной логистики методами WASPAS, MAIRCA, EDAS, MABAC, CODAS, MARCOS

Table 5. Results of assessing green logistics instruments using SAW, TOPSIS, COPRAS, MOORA, ARAS

Инструмент	WASPAS		MAIRCA		EDAS		MABAC		CODAS		MARCOS	
I ₁	7	0.3631	8	0.0307	10	0.5221	8	0.0394	7	0.1804	6	0.6210
I ₂	13	0.3368	9	0.0306	9	0.5240	9	0.0373	13	-0.3125	13	0.5717
I ₃	3	0.3749	3	0.0355	5	0.6348	3	0.1210	8	0.0822	5	0.6374
I ₄	8	0.3625	13	0.0288	8	0.5314	13	0.0079	5	0.2950	8	0.6183
I ₅	6	0.3642	7	0.0308	6	0.5918	7	0.0416	9	0.0037	7	0.6191
I ₆	9	0.3563	10	0.0301	7	0.5548	10	0.0295	11	-0.1141	10	0.6057
I ₇	2	0.3762	5	0.0315	4	0.6425	5	0.0526	4	0.3388	2	0.6398
I ₈	15	0.3306	16	0.0262	15	0.4479	16	-0.0377	14	-0.3572	15	0.5607
I ₉	11	0.3485	12	0.0293	14	0.4588	12	0.0161	10	-0.0146	11	0.5930
I ₁₀	16	0.3234	15	0.0272	16	0.3803	15	-0.0204	16	-0.4699	16	0.5492
I ₁₁	1	0.4019	1	0.0408	1	0.8629	1	0.2121	1	0.5664	1	0.6829
I ₁₂	17	0.3046	17	0.0212	17	0.2527	17	-0.1218	17	-0.4767	17	0.5188
I ₁₃	14	0.3344	14	0.0281	13	0.4589	14	-0.0038	15	-0.4326	14	0.5674
I ₁₄	4	0.3745	4	0.0333	3	0.6584	4	0.0835	2	0.4422	4	0.6378
I ₁₅	5	0.3745	2	0.0357	2	0.6623	2	0.1252	3	0.3772	3	0.6383
I ₁₆	12	0.3458	6	0.0314	12	0.4720	6	0.0520	12	-0.2841	12	0.5876
I ₁₇	10	0.3558	11	0.0294	11	0.4788	11	0.0181	6	0.1850	9	0.6074

Таблица 6. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена

Table 6. Spearman's rank correlation coefficient

Методы	SAW	TOPSIS	COPRAS	MOORA	ARAS	WASPAS	MAIRCA	EDAS	MABAC	CODAS	MARCOS	Среднее
SAW	1.000	0.880	0.922	0.723	0.990	0.985	0.875	0.924	0.875	0.946	1.000	0.9200
TOPSIS	0.880	1.000	0.762	0.779	0.890	0.890	0.765	0.885	0.765	0.892	0.880	0.8534
COPRAS	0.922	0.762	1.000	0.681	0.924	0.909	0.858	0.885	0.858	0.853	0.922	0.8703
MOORA	0.723	0.779	0.681	1.000	0.721	0.728	0.831	0.711	0.831	0.711	0.723	0.7672
ARAS	0.990	0.890	0.924	0.721	1.000	0.978	0.858	0.919	0.858	0.963	0.990	0.9173
WASPAS	0.985	0.890	0.909	0.728	0.978	1.000	0.875	0.929	0.875	0.904	0.985	0.9144
MAIRCA	0.875	0.765	0.858	0.831	0.858	0.875	1.000	0.892	1.000	0.770	0.875	0.8725
EDAS	0.924	0.885	0.885	0.711	0.919	0.929	0.892	1.000	0.892	0.858	0.924	0.8926
MABAC	0.875	0.765	0.858	0.831	0.858	0.875	1.000	0.892	1.000	0.770	0.875	0.8725
CODAS	0.946	0.892	0.853	0.711	0.963	0.904	0.770	0.858	0.770	1.000	0.946	0.8739
MARCOS	1.000	0.880	0.922	0.723	0.990	0.985	0.875	0.924	0.875	0.946	1.000	0.9200

Анализ табл. 4 и 5 показывает, что наиболее предпочтительной альтернативой является инструмент I₁₁ – «Механизация и автоматизация погрузочно-разгрузочных и складских работ» (первый ранг во всех 11 методах), наименее предпочтительной альтернативой I₁₂ – инструмент «Отключение двигателя транспортного средства во время выполнения погрузочно-разгрузочных работ» (семинадцатый ранг во всех 11 методах). Среди альтернатив с высоким рангом выделяется инструмент I₁₄ – «Оптимизация уровня запасов на основе использования систем управления запасами и современных логистических

концепций», I₁₅ – «Оперативный контроль параметров системы управления запасами» и I₇ – «Использование энерго- и ресурсосберегающего оборудования».

Несмотря на то, что в рассмотренных MCDM методах используются разные способы нормализации и агрегации данных, при ранжировании альтернатив была достигнута высокая согласованность результатов. Средний коэффициент ранговой корреляции Спирмена составил 0.88. Наиболее согласованы результаты методов SAW, ARAS, WASPAS и MARCOS (коэффициент ранговой корреляции Спирмена более 0.9). Наименее согласованным по сравне-

нию с другими методами является метод MOORA (коэффициент ранговой корреляции составил 0.76).

5. Заключение

В статье исследованы вопросы применения многокритериальных методов принятия решений в складской деятельности при управлении зелёными цепями поставок. Разработанная комбинированная MCDM модель оценки и выбора инструментов зелёной логистики включает 17 альтернатив (инструменты зелёной логистики). Оценка и выбор альтернатив производилась по 15-и критериям – показатели логистических потоков. Вес критериев определялся комбинированным DEMATEL-ANP методом, ранжирование альтернатив осуществлялось с использованием

одиннадцати методов – SAW, TOPSIS, COPRAS, MOORA, ARAS, WASPAS, MAIRCA, EDAS, MABAC, CODAS и MARCOS.

Расчётный пример реализации разработанной методики показал высокую корреляцию результатов (коэффициент ранговой корреляции 0.88). Наиболее согласованными методами являются SAW, ARAS, WASPAS и MARCOS, наименее согласованным методом MOORA. Наиболее предпочтительной альтернативой является инструмент «Механизация и автоматизация погрузочно-разгрузочных и складских работ» (I_{11}), наименее предпочтительной альтернатива «Отключение двигателя транспортного средства во время выполнения погрузочно-разгрузочных работ» (I_{12}).

Список литературы

1. Bartolini M., Bottani E., Grosse E. H. Green warehousing: Systematic literature review and bibliometric analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Т. 226. С. 242-258. <https://www.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.055>.
2. European Outlook 2022: Brought to you by our local experts, the European Outlook provides a high-level summary of our view on the European real estate markets in 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.knightfrank.com/research/article/2021-12-16-european-outlook-2022>.
3. Buntak K., Kovačić M., Mutavdžija M. Internet of things and smart warehouses as the future of logistics // *Tehnički glasnik*. 2019. Т. 13. № 3. С. 248-253. <https://www.doi.org/10.31803/tg-20190215200430>.
4. Kamali A. Smart warehouse vs. traditional warehouse: Review // *CiiT International Journal of Automation and Autonomous System*. 2019. Т. 11. № 1. С. 9-16.
5. Osintsev N., Kazarmshchikova E. Factors of sustainable development of transport and logistics systems // *Modern Problems of Russian Transport Complex*. 2017. Т. 7. № 1. С. 13-21. <https://www.doi.org/10.18503/2222-9396-2017-7-1-13-21>.
6. Osintsev N., Rakhmangulov A., Śladkowski A., Dyorina N. Logistic Flow Control System in Green Supply Chains. // *Ecology in Transport: Problems and Solutions* / A. Śladkowski. Cham: Springer International Publishing, 2020. С. 311-380. https://www.doi.org/10.1007/978-3-030-42323-0_6.
7. Wu K.-J., Tseng M.-L., Vy T. Evaluation the drivers of green supply chain management practices in uncertainty // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2011. Т. 25. С. 384-397. <https://www.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.02.049>.
8. Popović V., Kilibarda M., Andrejić M., Jereb B., Dragan D. A new sustainable warehouse management approach for workforce and activities scheduling // *Sustainability*. 2021. Т. 13. № 4. С. 2021. <https://www.doi.org/10.3390/su13042021>.
9. Wahab S. N., Sayuti N. M., Ab Talib M. S. Antecedents of green warehousing: A theoretical framework and future direction // *International Journal of Supply Chain Management*. 2018. Т. 7. № 6. С. 382-388.
10. Yener F., Yazgan H. R. Optimal warehouse design: Literature review and case study application // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Т. 129. № 8. С. 1-13. <https://www.doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.006>.
11. Gu J., Goetschalckx M., McGinnis L. F. Research on warehouse operation: A comprehensive review // *European Journal of Operational Research*. 2007. Т. 177. № 1. С. 1-21. <https://www.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.025>.
12. Carli R., Digiesi S., Dotoli M., Facchini F. A control strategy for smart energy charging of warehouse material handling equipment // *Procedia Manufacturing*. 2020. Т. 42. С. 503-510.
13. Zajac P. Evaluation Method of Energy Consumption in Logistic Warehouse Systems. Cham: Springer International Publishing, 2015. 158 c. <https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-22044-4>.
14. Freis J., Vohlidka P., Günthner W. Low-Carbon Warehousing: Examining Impacts of Building and Intra-Logistics Design Options on Energy Demand and the CO2 Emissions of Logistics Centers // *Sustainability*. 2016. Т. 8. № 5. С. 448. <https://www.doi.org/10.3390/su8050448>.
15. Lewczuk K., Kłodawski M., Gepner P. Energy consumption in a distributional warehouse: A practical case study for different warehouse technologies // *Energies*. 2021. Т. 14. № 9. С. 2709. <https://www.doi.org/10.3390/en14092709>.
16. Modica T., Perotti S., Melacini M. Green warehousing: Exploration of organisational variables fostering the adoption of energy-efficient material handling equipment // *Sustainability*. 2021. Т. 13. № 23. С. 13237. <https://www.doi.org/10.3390/su132313237>.

17. Darko A., Zhang C., Chan A. P. Drivers for green building: A review of empirical studies // *Habitat International*. 2017. T. 60. C. 34-49. <https://www.doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.12.007>.
18. Doan D. T., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Zhang T., Ghaffarianhoseini A., Tookey J. A critical comparison of green building rating systems // *Building and Environment*. 2017. T. 123. C. 243-260.
19. Illankoon I. M. C. S., Tam V. W. Y., Le K. N., Tran C. N. N., Ma M. Review on green building rating tools worldwide: recommendations for Australia // *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*. 2019. T. 25. № 8. C. 831-847. <https://www.doi.org/10.3846/jcem.2019.10928>.
20. Гнедкова А., Осинцев Н. Выбор "зелёных" стандартов при проектировании складов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 78 междунар. науч. техн. конф.* 2020. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. С. 20.
21. Stojčić M., Zavadskas E., Pamučar D., Stević Ž., Mardani A. Application of MCDM Methods in Sustainability Engineering: A Literature Review 2008–2018 // *Symmetry*. 2019. T. 11. № 3. C. 350. <https://www.doi.org/10.3390/sym11030350>.
22. Khan S. A., Chaabane A., Dweiri F. T. Multi-criteria decision-making methods application in supply chain management: A systematic literature review. // *Multi-Criteria Methods and Techniques Applied to Supply Chain Management* / V. A. P. Salomon. InTech, 2018. <https://www.doi.org/10.5772/intechopen.74067>.
23. Mardani A., Zavadskas E. K., Khalifah Z., Jusoh A., Nor K. M. D. Multiple criteria decision-making techniques in transportation systems: A systematic review of the state of the art literature // *Transport*. 2016. T. 31. № 3. C. 359-385. <https://www.doi.org/10.3846/16484142.2015.1121517>.
24. Wątróbski J. Outline of multicriteria decision-making in green logistics // *Transportation Research Procedia*. 2016. T. 16. C. 537-552. <https://www.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.051>.
25. Özcan T., Çelebi N., Esnaf Ş. Comparative analysis of multi-criteria decision making methodologies and implementation of a warehouse location selection problem // *Expert Systems with Applications*. 2011. T. 38. № 8. C. 9773-9779. <https://www.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.022>.
26. Karmakera C. L., and M. Saha M. Optimization of warehouse location through fuzzy multi-criteria decision making methods // *Decision Science Letters*. 2015. № 4. C. 315-334.
27. Emeç Ş., Akkaya G. Stochastic AHP and fuzzy VIKOR approach for warehouse location selection problem // *Journal of Enterprise Information Management*. 2018. T. 31. № 6. C. 950-962. <https://www.doi.org/10.1108/JEIM-12-2016-0195>.
28. Dey B., Bairagi B., Sarkar B., Sanyal S. K. A hybrid fuzzy technique for the selection of warehouse location in a supply chain under a utopian environment // *International Journal of Management Science and Engineering Management*. 2013. T. 8. № 4. C. 250-261. <https://www.doi.org/10.1080/17509653.2013.825075>.
29. Alidrisi H. DEA-Based PROMETHEE II Distribution-Center Productivity Model: Evaluation and Location Strategies Formulation // *Applied Sciences*. 2021. T. 11. № 20. C. 9567. <https://www.doi.org/10.3390/app11209567>.
30. Eko Saputro T., Daneshvar Rouyendegh A hybrid approach for selecting material handling equipment in a warehouse // *International Journal of Management Science and Engineering Management*. 2014. T. 11. № 1. C. 34-48. <https://www.doi.org/10.1080/17509653.2015.1042535>.
31. Ulutaş A., Karabasevic D., Popovic G., Stanujkic D., Nguyen P. T., Karaköy Ç. Development of a Novel Integrated CCSD-ITARA-MARCOS Decision-Making Approach for Stackers Selection in a Logistics System // *Mathematics*. 2020. T. 8. № 10. C. 1672. <https://www.doi.org/10.3390/math8101672>.
32. Stojčić M., Stević Ž., Nikolić A., Božićković Z. A multi-criteria model for evaluation and selection of AGV's in a warehouse // *Modern Problems of Russian Transport Complex*. 2019. T. 9. № 1. C. 4-20. <https://www.doi.org/10.18503/2222-9396-2019-9-1-4-20>.
33. Stević Ž., Stjepanović Ž., Božićković Z., Das D., Stanujkić D. Assessment of conditions for implementing information technology in a warehouse system: A novel fuzzy PIPRECIA method // *Symmetry*. 2018. T. 10. № 11. C. 586. <https://www.doi.org/10.3390/sym10110586>.
34. Osintsev N., Rakhmangulov A., Baginova V. Evaluation of logistic flows in green supply chains based on the combined DEMATEL-ANP method // *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. 2021. T. 19. № 3. C. 473-498. <https://www.doi.org/10.22190/FUME210505061O>.
35. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green logistics: a system of methods and instruments - part 2 // *Naše more*. 2018. T. 65. № 1. C. 49-55. <https://www.doi.org/10.17818/NM/2018/1.7>.
36. A. Gabus, E. Fontela *World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL*. Geneva, Switzerland: Battelle Geneva Research Centre: Battelle Geneva Research Centre, 1972.
37. Saaty T. L., Vargas L. G. *Decision making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. New York, N.Y.: Springer, 2006. МПКТ.95. 278 с.

38. Churchman C. W., Ackoff R. L. An Approximate Measure of Value // Journal of the Operations Research Society of America. 1954. T. 2. № 2. C. 172-187. <https://www.doi.org/10.1287/opre.2.2.172>.
39. Hwang C.-L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. МПКТ.186. 1 Online-Ressource (XII, 270 Seiten 1 Illustration).
40. Zavadskas E. K., Kaklauskas A., Sarka V. The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects // Technological and Economic Development of Economy. 1994. T. 1. № 3. C. 131-139.
41. Brauers, W.K.M.; Zavadskas, E.K.: The MOORA method and its application to privatization in a transition economy // Control and Cybernetics. 2006. T. 35. № 2. 445–469.
42. Zavadskas E. K., Turskis Z. A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making // Technological and Economic Development of Economy. 2010. T. 16. № 2. C. 159-172. <https://www.doi.org/10.3846/tede.2010.10>.
43. Zavadskas E. K., Turskis Z., Antucheviciene J. Optimization of weighted aggregated sum product assessment // Electronics and Electrical Engineering. 2012. T. 122. № 6. <https://www.doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810>.
44. Pamučar D., Vasin L., & Lukovac V. Selection of railway level crossing for investing in security equipment using hybrid DEMATEL-MAIRCA. / Под ред. Dušan Stamenković, Miloš Milošević, Bane. Faculty of Mechanical Engineering. C. 89-92.
45. Keshavarz Ghorabae M., Zavadskas E. K., OLFAT L., Turskis Z. Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS) // Informatica. 2015. T. 26. № 3. C. 435-451. <https://www.doi.org/10.15388/Informatica.2015.57>.
46. Pamučar D., Čirović G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attributive border approximation area comparison (MABAC) // Expert Systems with Applications. 2015. T. 42. № 6. C. 3016-3028. <https://www.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.057>.
47. Keshavarz Ghorabae M., Zavadskas E. K., Turskis Z., Antucheviciene J. A new combinative distance-based assessment (CODAS) method for multi-criteria decision-making // Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research. 2016. T. 50. № 3. C. 25-44.
48. Stević Ž., Pamučar D., Puška A., Chatterjee P. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COMpromise solution (MARCOS) // Computers & Industrial Engineering. 2020. T. 140. C. 106231. <https://www.doi.org/10.1016/j.cie.2019.106231>.

References

1. Bartolini M., Bottani E., Grosse E. H. *Green warehousing: Systematic literature review and bibliometric analysis* // Journal of Cleaner Production. 2019, vol. 226, pp. 242–258. <https://www.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.055>.
2. European Outlook 2022: Brought to you by our local experts, the European Outlook provides a high-level summary of our view on the European real estate markets in 2022. Available at: <https://www.knightfrank.com/research/article/2021-12-16-european-outlook-2022>.
3. Buntak K., Kovačić M., Mutavdžija M. *Internet of things and smart warehouses as the future of logistics* // Tehnički glasnik. 2019, vol. 13, no. 3, pp. 248–253. <https://www.doi.org/10.31803/tg-20190215200430>.
4. Kamali A. *Smart warehouse vs. traditional warehouse* // CiiT International Journal of Automation and Autonomous System. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 9–16.
5. Osintsev N., Kazarmshchikova E. *Factors of sustainable development of transport and logistics systems* // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 13–21. <https://www.doi.org/10.18503/2222-9396-2017-7-1-13-21>.
6. Osintsev N., Rakhmangulov A., Śladkowski A., Dyorina N. *Logistic Flow Control System in Green Supply Chains* // Ecology in Transport: Problems and Solutions: Lecture Notes in Networks and Systems]. 2020. vol. 124, Cham: Springer International Publishing, pp. 311–380.
7. Wu K.-J., Tseng M.-L., Vy T. *Evaluation the drivers of green supply chain management practices in uncertainty* // Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2011, vol. 25, pp. 384–397. <https://www.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.02.049>.
8. Popović V., Kilibarda M., Andrejić M., Jereb B., Dragan D. *A new sustainable warehouse management approach for workforce and activities scheduling* // Sustainability. 2021, vol. 13, no. 4, p. 2021. <https://www.doi.org/10.3390/su13042021>.
9. Wahab S. N., Sayuti N. M., Ab Talib M. S. *Antecedents of green warehousing* // International Journal of Supply Chain Management. 2018, vol. 7, no. 6, pp. 382–388.
10. Yener F., Yazgan H. R. *Optimal warehouse design* // Computers & Industrial Engineering. 2019, vol. 129, no. 8, pp. 1–13. <https://www.doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.006>.

11. Gu J., Goetschalckx M., McGinnis L. F. *Research on warehouse operation* // European Journal of Operational Research. 2007, vol. 177, no. 1, pp. 1–21. <https://www.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.025>.
12. Carli R., Digiesi S., Dotoli M., Facchini F. *A control strategy for smart energy charging of warehouse material handling equipment* // Procedia Manufacturing. 2020, vol. 42, pp. 503–510.
13. Zajac P. *Evaluation Method of Energy Consumption in Logistic Warehouse Systems*. Cham: Springer International Publishing. 2015. 158 p.
14. Freis J., Vohlidka P., Günthner W. *Low-Carbon Warehousing* // Sustainability. 2016, vol. 8, no. 5, p. 448. <https://www.doi.org/10.3390/su8050448>.
15. Lewczuk K., Kłodawski M., Gepner P. *Energy consumption in a distributional warehouse* // Energies. 2021, vol. 14, no. 9, p. 2709. <https://www.doi.org/10.3390/en14092709>.
16. Modica T., Perotti S., Melacini M. *Green warehousing* // Sustainability. 2021, vol. 13, no. 23, p. 13237. <https://www.doi.org/10.3390/su132313237>.
17. Darko A., Zhang C., Chan A. P. *Drivers for green building* // Habitat International. 2017, vol. 60, pp. 34–49. <https://www.doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.12.007>.
18. Doan D. T., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Zhang T., Ghaffarianhoseini A., Tookey J. *A critical comparison of green building rating systems* // Building and Environment. 2017, vol. 123, pp. 243–260.
19. Illankoon I. M. C. S., Tam V. W. Y., Le K. N., Tran C. N. N., Ma M. *Review on green building rating tools worldwide* // JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT. 2019, vol. 25, no. 8, pp. 831–847. <https://www.doi.org/10.3846/jcem.2019.10928>.
20. Gnedkova A., Osintsev N. *The choice of "green" standards in the design of warehouses* // Actual problems of modern science, technology, and education: International scientific conference 2020, Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publishing House, p. 20.
21. Stojčić M., Zavadskas E., Pamučar D., Stević Ž., Mardani A. *Application of MCDM Methods in Sustainability Engineering: A Literature Review 2008–2018* // Symmetry. 2019, vol. 11, no. 3, p. 350. <https://www.doi.org/10.3390/sym11030350>.
22. Khan S. A., Chaabane A., Dweiri F. T. *Multi-criteria decision-making methods application in supply chain management: A systematic literature review* // Multi-Criteria Methods and Techniques Applied to Supply Chain Management. 2018, : InTech.
23. Mardani A., Zavadskas E. K., Khalifah Z., Jusoh A., Nor K. M. D. *Multiple criteria decision-making techniques in transportation systems* // Transport. 2016, vol. 31, no. 3, pp. 359–385. <https://www.doi.org/10.3846/16484142.2015.1121517>.
24. Wątróbski J. *Outline of multicriteria decision-making in green logistics* // Transportation Research Procedia. 2016, vol. 16, pp. 537–552. <https://www.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.051>.
25. Özcan T., Çelebi N., Esnaf Ş. *Comparative analysis of multi-criteria decision making methodologies and implementation of a warehouse location selection problem* // Expert Systems with Applications. 2011, vol. 38, no. 8, pp. 9773–9779. <https://www.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.022>.
26. Karmakera C. L., and M. Saha M. *Optimization of warehouse location through fuzzy multi-criteria decision making methods* // Decision Science Letters. 2015, no. 4, pp. 315–334.
27. Emeç Ş., Akkaya G. *Stochastic AHP and fuzzy VIKOR approach for warehouse location selection problem* // Journal of Enterprise Information Management. 2018, vol. 31, no. 6, pp. 950–962. <https://www.doi.org/10.1108/JEIM-12-2016-0195>.
28. Dey B., Bairagi B., Sarkar B., Sanyal S. K. *A hybrid fuzzy technique for the selection of warehouse location in a supply chain under a utopian environment* // International Journal of Management Science and Engineering Management. 2013, vol. 8, no. 4, pp. 250–261. <https://www.doi.org/10.1080/17509653.2013.825075>.
29. Alidrisi H. *DEA-Based PROMETHEE II Distribution-Center Productivity Model* // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 20, p. 9567. <https://www.doi.org/10.3390/app11209567>.
30. Eko Saputro T., Daneshvar Rouyendegh A. *A hybrid approach for selecting material handling equipment in a warehouse* // International Journal of Management Science and Engineering Management. 2014, vol. 11, no. 1, pp. 34–48. <https://www.doi.org/10.1080/17509653.2015.1042535>.
31. Ulutaş A., Karabasevic D., Popovic G., Stanujkic D., Nguyen P. T., Karaköy Ç. *Development of a Novel Integrated CCSD-ITARA-MARCOS Decision-Making Approach for Stackers Selection in a Logistics System* // Mathematics. 2020, vol. 8, no. 10, p. 1672. <https://www.doi.org/10.3390/math8101672>.
32. Stojčić M., Stević Ž., Nikolić A., Božičković Z. *A multi-criteria model for evaluation and selection of AGV's in a warehouse* // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2019, vol. 9, no. 1, pp. 4–20. <https://www.doi.org/10.18503/2222-9396-2019-9-1-4-20>.
33. Stević Ž., Stjepanović Ž., Božičković Z., Das D., Stanujkić D. *Assessment of conditions for implementing information technology in a warehouse system* // Symmetry. 2018, vol. 10, no. 11, p. 586. <https://www.doi.org/10.3390/sym10110586>.

34. Osintsev N., Rakhmangulov A., Baginova V. *Evaluation of logistic flows in green supply chains based on the combined DEMATEL-ANP method* // Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 473–498. <https://www.doi.org/10.22190/FUME2105050610>.
35. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. *Green logistics: a system of methods and instruments - part 2* // Naše more. 2018, vol. 65, no. 1, pp. 49–55. <https://www.doi.org/10.17818/NM/2018/1.7>.
36. Gabus A., Fontela E. *World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL*. Geneva, Switzerland: Battelle Geneva Research Centre. 1972, pp. 1–8.
37. Saaty T. L., Vargas L. G. *Decision making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*: International Series in Operations Research & Management Science]. New York, N.Y. Springer. 2006. 278 p.
38. Churchman C. W., Ackoff R. L. *An Approximate Measure of Value* // Journal of the Operations Research Society of America. 1954, vol. 2, no. 2, pp. 172–187. <https://www.doi.org/10.1287/opre.2.2.172>.
39. Hwang C.-L., Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*: Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 1981. 1 Online-Ressource (XII, 270 Seiten 1 Illustration).
40. Zavadskas E. K., Kaklauskas A., Sarka V. *The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects* // Technological and Economic Development of Economy. 1994, vol. 1, no. 3, pp. 131–139.
41. Brauers, W.K.M.; Zavadskas, E.K. // Control and Cybernetics. 2006, vol. 35, no. 2, 445–469.
42. Zavadskas E. K., Turskis Z. *A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making* // Technological and Economic Development of Economy. 2010, vol. 16, no. 2, pp. 159–172. <https://www.doi.org/10.3846/tede.2010.10>.
43. Zavadskas E. K., Turskis Z., Antucheviciene J. *Optimization of weighted aggregated sum product assessment* // Electronics and Electrical Engineering. 2012, vol. 122, no. 6. <https://www.doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810>.
44. Pamučar D., Vasin L., & Lukovac V. Selection of railway level crossing for investing in security equipment using hybrid DEMATEL-MAIRCA // XVI Scientific-Expert Conference on Railways, RAILCON '14: Proceedings : October 09-10, 2014, Niš, Serbia / D. Stamenković, M. Milošević, and Banej . 2014, Niš: Faculty of Mechanical Engineering, pp. 89–92.
45. Keshavarz Ghorabae M., Zavadskas E. K., OLFAT L., Turskis Z. *Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS)* // Informatica. 2015, vol. 26, no. 3, pp. 435–451. <https://www.doi.org/10.15388/Informatica.2015.57>.
46. Pamučar D., Čirović G. *The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attributive border approximation area comparison (MABAC)* // Expert Systems with Applications. 2015, vol. 42, no. 6, pp. 3016–3028. <https://www.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.057>.
47. Keshavarz Ghorabae M., Zavadskas E. K., Turskis Z., Antucheviciene J. *A new combinative distance-based assessment (CODAS) method for multi-criteria decision-making* // Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research. 2016, vol. 50, no. 3, pp. 25–44.
48. Stević Ž., Pamučar D., Puška A., Chatterjee P. *Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COMpromise solution (MARCOS)* // Computers & Industrial Engineering. 2020, vol. 140, p. 106231. <https://www.doi.org/10.1016/j.cie.2019.106231>.



ISSN 2222-9396 (Print)

УДК 629.42:629.43:625.3

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-18-28>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОЙ РАБОТЫ ТЕПЛОВЗОВ *UZTE16M3* И ТЯГОВЫЕ КАЧЕСТВА ПРОФИЛЯ ПУТИ УЧАСТКА МАРОКАНД – НАВОИ УЗБЕКСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Аблялимов О.С.^{1*}

¹ Ташкентский государственный транспортный университет,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

*E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

Аннотация. В статье представлена задача обоснования топливно-энергетической эффективности использования магистральных локомотивов дизельной тяги на реальном, холмисто-горном участке Узбекской железной дороги. Задача решается с применением методов теории локомотивной тяги для различных условий организации эксплуатационной деятельности трёхсекционных магистральных (поездных) грузовых тепловозов *UzTE16M3* при вождении грузовых поездов разной массы составов. Основными критериями исследования являются кинематические параметры движения грузовых поездов и параметры энергоёмкости исследуемых тепловозов серии *UzTE16M3* на рассматриваемом участке. Учитываются приведённые значения общего и удельного расходов натурального дизельного топлива на тягу поездов в количественном и денежном исчислении, приведённое время хода поезда в режиме тяги и удельный расход натурального дизельного топлива за поездку. Установлены кинематические параметры и энергетические показатели перевозочной работы исследуемых тепловозов на реальном, холмисто-горном участке Мароканд – Навои Узбекской железной дороги при движении грузовых поездов без остановок и с остановками на раздельных пунктах. Определены значения критерия тягового качества (свойства) профиля пути по каждому перегону рассматриваемого участка. Получены основные показатели топливно-энергетической эффективности эксплуатации исследуемых тепловозов. Результаты исследований рекомендуются машинистам-инструкторам и специалистам линейных предприятий локомотивного комплекса сети Узбекских железных дорог для практического использования.

Ключевые слова: грузовой поезд, тепловоз, *UzTE16M3*, участок железнодорожного пути, эксплуатация, железнодорожная станция, перегон, профиль пути, эффективность

©Аблялимов О.С., 2021

Поступила: 14 июля 2020 г.; Принята к публикации: 29 ноября 2021 г.; Опубликовано: 30 декабря 2021 г.

Для цитирования:

Аблялимов О.С. Исследование эффективности перевозочной работы тепловозов *UzTE16M3* и тяговые качества профиля пути участка Мароканд – Навои Узбекской железной дороги // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2021. Т.11. №1. С.18-28. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-18-28>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



ISSN 2222-9396(Print)

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-18-28>

RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF LOCOMOTIVE *UzTE16M3* OPERATION AND TRACTIVE QUALITIES OF THE RAIL TRACK PROFILE MAROKAND – NAVOI LINE OF UZBEK RAILWAY

Abliyalimov O.S.^{1*}¹ Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan*E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

Abstract. The article presents the problem of substantiating the fuel and energy efficiency of the use of diesel-powered mainline locomotives on a real, hilly-mountainous section of the Uzbek railway. The problem is solved using the methods of the theory of locomotive traction for various conditions of organizing the operational activities of three-section mainline freight diesel locomotives *UzTE16M3* when driving freight trains of different mass. The main research criteria are the kinematic parameters of the movement of freight trains and the parameters of the energy intensity of the investigated diesel locomotives of the *UzTE16M3* series in the line under consideration. The given values of the total and specific consumption of natural diesel fuel for traction of trains in quantitative and monetary terms, the reduced travel time of the train in traction mode and the specific consumption of natural diesel fuel per trip are considered. The kinematic parameters and energy indicators of the transportation work of the investigated diesel locomotives on the hilly-mountainous section of the Marokand – Navoi of the Uzbek railway was established during the movement of freight trains without stops and with stops at separate points. The values of the traction quality criterion (properties) of the track profile for each section of the section under consideration were determined. The main indicators of the fuel and energy efficiency of operation of the investigated diesel locomotives in operation are obtained. The research results are recommended for instructor drivers and specialists of linear enterprises of the locomotive complex of the Uzbek Railways network for practical use.

Keywords: freight train, diesel locomotive, *UzTE16M3*, section of railway line, operation, rail yard, track profile, efficiency

© Abliyalimov O.S., 2021

Received: July 14, 2020; Accepted: November 29, 2021; Published: December 30, 2021

For citation:

Abliyalimov O.S. Research of the Efficiency of Locomotive *UzTE16M3* Operation and Tractive Qualities of the Rail Track Profile Marokand – Navoi Line of Uzbek Railway // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2021, vol.11, no.1, pp.18-28. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-18-28>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

Вопросы эффективности перевозочной работы с применением тепловозной тяги в разнообразных условиях эксплуатации затрагивают часть общей проблемы повышения топливно-энергетической эффективности использования магистрального тягового подвижного состава на различных участках железных дорог.

Эксплуатируемый («рабочий») парк локомотивов железнодорожной отрасли Узбекистана не является однородным и различается по сериям, типам (видам), тягово-эксплуатационным характеристикам, затратам энергии на выполнение работы.

В настоящее время приблизительно 54% всех секций локомотивного парка приходится на магистральные (поездные) тепловозы, из которых около 30% секций составляют тепловозы серии *UzTE16M* [1]. Сказанное необходимо дополнить тем, что повсеместная и активная электрификация узбекских железных дорог никак не влияет на востребованность в тепловозной тяге, которая находится на довольно высоком производственно-техническом уровне.

Поэтому весьма актуальным является повышение эффективности использования тепловозного локомотивного парка АО «Ўзбекистон темир йўллари» (Узбекская железная дорога) при осуществлении железнодорожных перевозок грузов и пассажиров на различных по сложности (трудности) участках железных дорог.

Повышение эффективности использования магистральных (поездных) грузовых тепловозов достигается в результате комплексного подхода к разработкам рекомендаций и мероприятий, практическая реализация которых будет направлена на экономное расходование топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов. Целью исследования является проведение теоретических и экспериментальных исследований по оптимизации параметров перевозочной работы тепловозов и оценке эффективности использования ресурсосберегающих технологий в управлении режимами работы их силовых энергетических установок (систем) в реальных условиях организации эксплуатации.

Достаточно большой опыт в этом направлении накоплен и реализован на практике сотрудниками кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Ташкентского государственного транспортного университета совместно со специалистами локомотивного комплекса «Узбекская железная дорога».

2. Постановка задачи исследования

Проблема повышения эффективности перевозочной работы локомотивов дизельной и электрической тяги в реальных условиях организации разных видов движения является одной из основных задач топливно-энергетической эффективности магистрального тягового подвижного состава на отдельных участках железных дорог. Эту проблему можно решить различными организационно – техническими, конструктивными и технологическими путями.

Высокую эксплуатационную надёжность узлов, систем и агрегатов локомотивов в пути следования авторы исследований [2–4] предлагают обеспечить не только путём дальнейшего совершенствования сервис-

ного технического обслуживания и ремонта локомотивов, но также использованием современных разработок электротехнической промышленности и компьютерных технологий в условиях эксплуатации.

Изучению возможностей снижения расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов посвящены работы [5, 6], в которых предлагается экономиию натурального дизельного топлива тепловозами и электрической энергии тяговым электроподвижным составом осуществлять посредством оптимизации режимов эксплуатации силовых энергетических установок (систем) локомотивов дизельной и электрической тяги.

Процессу передачи электрической энергии от контактного провода к оборудованию тягово-энергетической системы движущегося электрического подвижного состава, через токоприёмник (пантограф) со скользящим электрическим контактом в области изоляторов и нейтральных вставок контактной сети применительно к высокоскоростным железнодорожным магистралям, посвящены работы [7, 8]. Авторы данных работ рекомендуют улучшить (повысить) качественную составляющую процесса токосъёма как за счёт оптимизации режимов токосъёма, путём нормирования верхнего и нижнего пределов контактного нажатия, так и посредством использования механических и электрических средств защиты от возникновения при этом всякого рода резонансных явлений.

Авторы исследований [9, 10] рекомендуют использовать нормально – разомкнутые секционные разъединители с ручным приводом и заземляющим ножом при вынужденной остановке поезда под нейтральной вставкой с целью его вывода из этого места для временной подачи напряжения на нейтральную вставку со стороны направления движения поезда.

Результаты исследований [2–10] имеют определённый научный интерес и практическую значимость, однако они носят теоретический характер и не позволяют определить эффективность использования тягового подвижного состава применительно к реальным условиям организации грузового движения на железнодорожных участках Узбекской железной дороги с учётом степени сложности продольного профиля путей. Под степенью сложности понимается уровень тягового качества профиля пути, который характеризуется расположением и общей протяжённостью продольных уклонов, величиной уклонов, последовательностью расположения уклонов элементов профиля и кривизной пути.

Основными показателями перевозочной деятельности локомотивов на различных режимах работы их силовых энергетических установок являются кинематические параметры движения поезда (скорости движения, время хода поезда на исследуемом участке) и параметры энергетической эффективности самих локомотивов в виде полного и удельного расходов дизельного топлива или электрической энергии на тягу поездов.

Характер кинематических параметров движения поезда, режим работы силовых энергетических установок (систем) локомотивов и расходы дизельного топлива и электрической энергии на тягу напрямую зависят от степени сложности профиля пути железной дороги, основным критерием которой являются, так

называемые, тяговые качества или тяговые свойства [11].

Настоящее исследование является логическим продолжением работы [12] и касается локомотивов дизельной тяги, при помощи которых осуществляется (организуется) технологический процесс движения грузовых поездов на участке Мароканд – Навои Узбекской железной дороги.

Цель исследования заключается в обосновании основных показателей перевозочной работы тепловозов серии *UzTE16M3* и определении влияния реальных условий организации железнодорожных перевозок грузов на значения упомянутых выше показателей, характеризующих тяговые качества профиля пути данного участка.

Объектами исследования являются магистральные (поездные) грузовые трёхсекционные тепловозы *UzTE16M3* и спрямлённый профиль пути реального, холмисто-горного участка Мароканд – Навои Узбекской железной дороги, состоящего из семи железнодорожных перегонов: Мароканд – Джума, Джума – Нурбулак, Нурбулак – Каттакурган, Каттакурган – Разъезд №28, Разъезд № 28 – Зирабулак, Зирабулак – Зиёвуддин, Зиёвуддин – Навои.

Предмет исследования – основные показатели перевозочной работы и параметры топливно-энергетической эффективности использования исследуемых тепловозов *UzTE16M3* с учётом приведённых расходов дизельного топлива на тягу поездов в количественном и денежном исчислении на заданном холмисто-горном участке железной дороги.

Методика исследований, опираясь на широко известные методы теории локомотивной тяги [13, 14] и исходные данные [12], заключается в разработке математических моделей выбора параметров движения (ведения) грузового поезда магистральными (поездными) грузовыми трёхсекционными тепловозами *UzTE16M3* на холмисто-горном участке Мароканд – Навои Узбекских железных дорог. Основной базовой составляющей данных исследований являются тягово-эксплуатационные свойства и разнообразные условия организации перевозочной работы исследуемых тепловозов *UzTE16M3* на спрямлённом профиле пути заданного (принятого) участка. Ниже обозначим характеристики рассматриваемого профиля пути и постоянные ограничения скоростей движения грузовых поездов на перегонах и по станционным путям холмисто-горного участка железной дороги при проследовании или приёме этих поездов на главный или приёмоотправочный железнодорожные пути для обоснования основных показателей перевозочной работы тепловозов серии *UzTE16M3* [12, 15].

Участок железнодорожного пути Мароканд – Навои протяжённостью в 140.5 километров содержит девятнадцать элементов, из которых пятьдесят семь и тридцать девять элементов характеризуются изменением крутизны, соответственно, подъёмов от 0 до +4.46‰ и спусков от 0 до -5.9‰, а три элемента – «площадки». Упомянутый участок «холмисто-горный» – III-й тип профиля пути, так как здесь доля элементов профиля пути с крутизной уклонов в интервале от +3.0‰ до -3.0‰, включая площадки $i = 0$, составляют около 40% от общей длины рассматриваемого участка.

Железнодорожный участок пути Мароканд – Навои имеет пять промежуточных станций, на которых ограничение по скорости движения составляет $V^{oz} = 80$ км/ч (ст. Джума), $V^{oz} = 60$ км/ч (ст. Нурбулак, ст. Каттакурган, ст. Зирабулак) и $V^{oz} = 40$ км/ч (ст. Зиёвуддин) и шесть отдельных пунктов (разъездов) с ограничениями скорости движения $V^{oz} = 60$ км/ч на разъездах №№24, 28, 29. Кроме этого, на перегонах Мароканд – Джума и Нурбулак – Каттакурган имеется по одному ограничению по скорости движения в $V^{oz} = 80$ км/ч и по два таких же ограничения по скорости движения грузовых поездов имеет каждый из перегонов Джума – Разъезд №24 и Каттакурган – Разъезд №28. При этом наибольшая скорость движения грузового поезда составляет $V^{max} = 90$ км/ч.

Конструктивными отличиями магистральных (поездных) грузовых трёхсекционных тепловозов *UzTE16M3* являются [12]: новая силовая энергетическая установка–дизель-генератор 1А-9ДГ с дизелем 1А-5Д49, микропроцессорная система регулирования мощности дизель-генератора УСТА-75-02 (унифицированная система тепловозной автоматики), система КЛУБ-У (комплексное локомотивное устройство безопасности), унифицированный пульт управления УПУ. Для обеспечения управления и контроля параметров на четырёх секциях в электрической схеме базового тепловоза *UzTE16M2* внесены изменения в соединениях интерфейсов и пультов управления каждой секции, а также систем подготовки пуска, пуска дизеля и пожарной сигнализации. Дизель 1А-5Д49 отличается от дизеля 10Д100 экономичностью: удельный расход топлива у дизеля 1А-5Д49 третьего исполнения на режиме номинальной мощности (2206 кВт) составляет 208 г/кВт-ч, в режиме холостого хода расход топлива – 14 кг/ч. Аналогичные параметры для дизеля 10Д100 составляют 226 г/кВт-ч и 22,8 кг/ч.

Согласно [16], тяговые качества (свойства) профиля и трассы железнодорожной линии оказывают существенное влияние на расход дизельного топлива и электрической энергии локомотивами, производительность железной дороги, стоимость железнодорожных перевозок грузов и пассажиров, а для оценки степени трудности профиля пути авторы [17, 18] предлагают использовать виртуальные (эквивалентные) характеристики профиля пути. Виртуальная характеристика профиля пути – есть безразмерная величина, которая представляет собой отношение значения рассматриваемого основного показателя перевозочной работы локомотива на данном элементе профиля пути к значению его на прямом и горизонтальном участке пути такой же протяжённости.

В связи с тем, что изменение механической работы и расход дизельного топлива, затрачиваемого на перемещение поезда по исследуемому участку, взаимосвязаны между собой прямо пропорционально [19], их количественная составляющая напрямую зависит от длины (протяжённости) перегона или участка железной дороги в целом. В этом случае, количественная составляющая будет представлять собой некий «сосредоточенный» (общий или полный) за поездку параметр и поэтому большей механической работе будет соответствовать и больший расход натурального дизельного топлива.

3. Результаты исследования и их анализ

Достижение цели исследования осуществлялось посредством выполнения серии тяговых расчётов на холмисто-горном участке Мароканд – Навои для трёх различных условий перевозочного процесса. Вожделение грузовых поездов с разными массами составов в диапазоне от $Q_1 = 2500$ т до $Q_3 = 3500$ т и дифференциацией изменения их на величину $\Delta Q = 500$ т, а также постоянным числом осей $m = 200$ осей, организовывалось тепловозами *UzTE16M3* без остановок и с остановками на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах.

Энергетика перевозочного процесса грузового поезда будет зависеть от характера движения, который может быть ускоренным, равномерным с постоянной скоростью или замедленным, и будет напрямую зависеть от крутизны уклонов (подъёма или спуска) элементов профиля пути, их величины и той или иной чередующейся последовательностью. Каждый из этих видов движения грузового поезда предполагает макси-

мальное (наибольшее) использование мощности и тягово-эксплуатационных свойств (качеств) локомотива, что для тепловоза *UzTE16M3* соответствует 15-й позиции контроллера машиниста в диапазоне скоростей от 19 км/ч (скорость выхода на автоматическую характеристику) до 100 км/ч согласно тяговой характеристике тепловоза.

Анализ результатов выполненных тяговых расчётов для различных условий организации движения грузовых поездов на участке Мароканд – Навои показывает, что при работе тепловозов *UzTE16M3* на 15-й позиции контроллера машиниста, в сочетании с режимами холостого хода и торможения, преобладает ускоренное и замедленное движение, а движение с постоянной скоростью (равномерное движение) практически отсутствует.

Расчётные значения «чистого» времени хода грузового поезда по перегонам и на разгон-замедление по промежуточным станциям, разъездам и раздельным пунктам упомянутого участка представлены в **табл.1**.

Таблица 1. Расчётное время хода грузового поезда на участке Мароканд – Навои по перегонам и промежуточным станциям, разъездам и раздельным пунктам при замедлении – ускорении

Станция	Длина перегона до предыдущей станции, км	Масса состава, т					
		2500	3000	3500	2500	3000	3500
		Время хода по перегонам, мин			Время хода при замедлении/ускорении, мин		
Мароканд	–	–	–	–	–/2.00*	–/2.00*	–/2.00*
Джума	8.75	7.80	7.70	8.10	1.70/1.50	1.70/1.50	2.00/1.30
Нурбулак	29.00	22.00	22.25	22.65	1.65/1.15	1.85/1.00	2.00/1.25
Каттакурган	24.00	20.90	21.35	20.60	1.70/0.90	1.80/0.90	2.30/1.05
Рзд № 28	11.25	10.70	10.95	10.65	1.25/0.70	1.35/0.80	1.80/0.95
Зирабулак	16.85	14.80	15.55	15.40	1.90/1.40	2.20/1.35	1.80/1.60
Зиёвуддин	27.15	19.50	18.95	19.60	1.90/2.00	1.80/1.55	1.80/2.50
Навои	23.50	16.90	16.65	16.80	1.60/–	1.85/–	2.10/–
Итого	140.5	112.60	113.40	113.80	1.67°/1.38°	1.79°/1.30°	1.97°/1.52°

* – время ускорения по станции Мароканд, которое принято аналогично [20] и входит во время хода по перегону Мароканд – Джума;

° – средние значения времени на замедление (торможение) и ускорение (разгон) при остановках грузового поезда на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах.

Анализ данных **табл. 1** в сравнении с унифицированным (графиковым) грузовым поездом с массой состава 3000 т, показывает следующее.

1. Общее время хода поезда при движении без остановок на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах зависит от изменения массы состава. Уменьшение массы состава на $\Delta Q = 500$ т (~20%) приводит к уменьшению общего времени хода поезда на 0.705%, а с увеличением массы состава на $\Delta Q = 500$ т (~20%) происходит увеличение времени на 0.353%.

2. Усреднённые расчётные значения времени разгона и замедления грузового поезда с унифицированной массой состава 3000 т составляют, соответственно, 1.3 и 1.79 минуты.

3. Уменьшение или увеличение массы состава на величину 500 т увеличивает время на разгон поезда, в обоих случаях, соответственно, приблизительно на 6.15 и 16.92%, а время на замедление поезда при этом, в

первом случае уменьшается на 6.70%, а во втором случае оно увеличивается на 10.05%.

4. Расход натурального дизельного топлива на один разгон-замедление грузового поезда с унифицированной массой состава 3000 т равен 30.69 кг, а усреднённый (то есть, среднеарифметический для трёх масс состава грузового поезда) упомянутый расход, в среднем, составляет 32.99 кг.

В **табл. 2** и **табл. 3** приведены результаты расчётов усреднённых значений, соответственно, кинематических и расходных параметров основных показателей перевозочной работы тепловозов *UzTE16M3* при движении грузовых поездов по перегонам холмисто-горного участка Мароканд – Навои без остановок и с остановками на промежуточных станциях, разъездах и раздельных пунктах.

На **рис. 1** и **рис. 2**, соответственно, представлены графики зависимостей изменения кинематических параметров движения грузовых поездов и параметров

показателей энергетической эффективности исследуемых тепловозов *UzTE16M3* на холмисто-горном участке Мароканд – Навои для двух (обоих) видов движения. По оси абсцисс приняты обозначены перегоны, номера которых соответствуют нумерации в табл. 2, 3. На рис. 1 используются следующие обозначения: V – техниче-

ская скорость; t_n – время хода поезда общее по перегону; t_t – время хода в режиме тяги без остановок; $t_{xx,t}$ – время хода в режиме холостого хода и торможения без остановок. Обозначения без штриха соответствуют параметрам движения поезда без остановок на отдельных пунктах, со штрихом – с остановками.

Таблица 2. Кинематические показатели движения грузовых поездов на разных режимах работы силовых энергетических установок тепловозов *UzTE16M3* на участке Мароканд – Навои

Table 2. Kinematic indicators of the movement of freight trains at different operating modes of power plants of diesel locomotives *UzTE16M3* on the Marokand – Navoi line

№	Перегон	Техническая скорость, V_t , км/ч	Распределение времени хода поезда (без остановок / с остановками на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах), мин		
			общее по перегону участка t_n	в режимах	
				тяги t_t	холостого хода и торможения $t_{xx,t}$
1	Мароканд - Джума	69.25/56.08	7.88/9.73	4.66/4.67	3.22/5.06
2	Джума - Нурбулак	76.65/67.22	22.32/25.45	4.84/8.00	17.48/17.45
3	Нурбулак - Каттакурган	69.11/60.39	20.97/24.00	4.45/6.38	16.52/17.62
4	Каттакурган – Рзд. № 28	62.72/57.69	10.78/11.72	3.67/5.14	7.11/6.58
5	Рзд. № 28 - Зирабулак	69.32/61.43	15.27/17.23	9.55/9.15	5.72/8.08
6	Зирабулак - Зиёвуддин	82.79/70.87	19.37/22.63	6.10/6.86	13.27/15.76
7	Зиёвуддин - Навои	84.62/70.13	16.80/20.27	5.27/8.52	11.53/11.75
8	Мароканд - Навои	74.66/64.61	113.39/131.03	38.54/48.73	74.85/82.30

Таблица 3. Расход натурального дизельного топлива и затраты денежных средств тепловозами *UzTE16M3* при движении грузовых поездов по перегонам участка Мароканд – Навои

Table 3. Consumption of diesel fuel and expenditures of funds by *UzTE16M3* diesel locomotives during the movement of freight trains on the tracks of the Marokand – Navoi line

№	Перегон	Без остановок на отдельных пунктах			С остановками на отдельных пунктах		
		Общий (полный) за поездку E , кг	Удельный за поездку e , кг/10 ⁴ ткм брутто	Приведённые затраты c_t , с/ум/км	Общий (полный) за поездку E , кг	Удельный за поездку e , кг/10 ⁴ ткм брутто	Приведённые затраты c_t , с/ум/км
1	Мароканд - Джума	107.92	39.86	21007	109.20	40.34	21257
2	Джума - Нурбулак	121.54	14.39	7546	193.24	22.89	12000
3	Нурбулак - Каттакурган	112.19	15.71	8222	156.74	21.92	11488
4	Каттакурган – Рзд. № 28	87.99	26.38	13823	120.81	36.10	18981
5	Рзд. № 28 - Зирабулак	220.25	41.81	22104	209.49	40.50	21024
6	Зирабулак - Зиёвуддин	147.32	18.63	9758	166.41	20.98	11022
7	Зиёвуддин - Навои	127.25	18.22	9509	201.01	28.45	15020
8	Мароканд - Навои	924.46	21.84	11600	1156.9	27.33	14517

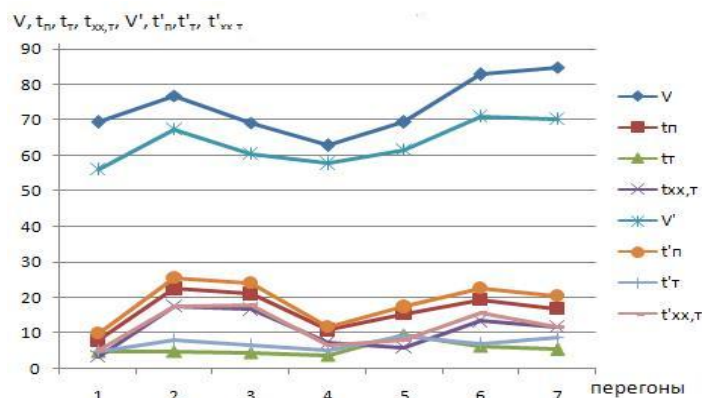


Рис. 1. Кинематические параметры движения грузовых поездов на участке Мароканд – Навои

Fig. 1. Kinematic parameters of freight trains movement on the Marokand - Navoi line

На рис. 2 используются следующие обозначения: E – общий (полный) расход натурального дизельного топлива за поездку; e – удельный расход натурального дизельного топлива за поездку; c_T – затраты денеж-

ных средств за поездку. Обозначения без штриха соответствуют параметрам движения поезда без остановок на отдельных пунктах, со штрихом – с остановками.

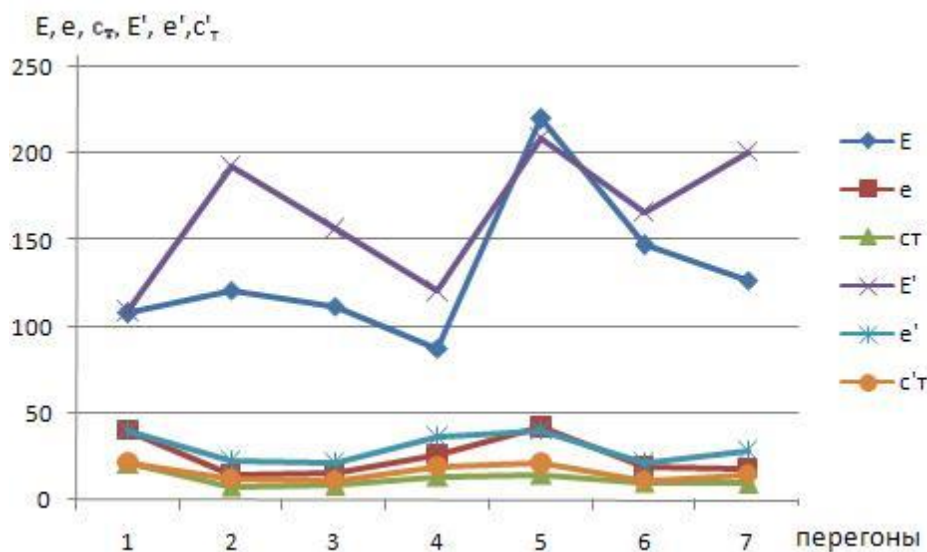


Рис. 2. Параметры энергоёмкости исследуемых тепловозов *UzTE16M3* на участке Мароканд – Навои
Fig. 2. Parameters of energy consumption of the diesel locomotives *UzTE16M3* on the Marokand – Navoi line

Усреднённые значения были рассчитаны как средние величины в принятом диапазоне изменения массы составов (от 2500 т до 3000 т) грузовых поездов, которые, интерпретировались как опорные точки для анализа эффективности выполнения качественной составляющей перевозочной работы исследуемых тепловозов *UzTE16M3* на холмисто-горном участке Мароканд – Навои Узбекской железной дороги.

Анализ проводился путём сравнения между собой усреднённых значений упомянутых выше показателей для разных видов движения грузовых поездов. Объективным подтверждением адекватности полученных результатов послужили результаты многочисленных исследований эффективности использования локомотивов дизельной и электрической тяги в разнообразных условиях организации эксплуатационной работы железных дорог [1, 12, 15, 16, 20].

Движение грузовых поездов на холмисто-горном участке Мароканд – Навои, реализуемое магистральными (поездными) грузовыми трёхсекционными тепловозами *UzTE16M3* без остановок на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах по отношению к аналогичному движению с остановками на них, обеспечивает:

- уменьшение общего времени хода поезда на 17.64 мин при среднем расчётном времени на одну остановку в 2.52 мин и увеличение технической скорости движения на 10.05 км/ч;
- достижение долей движения в режимах тяги, холостого хода и торможения, соответственно, 33.99 и 66.01%;
- уменьшение – увеличение долей движения в режимах тяги и холостого хода, торможения приблизительно на 3,28%;
- уменьшение времени движения в режимах тяги, холостого хода и торможения, соответственно, на

10.19 мин (~20.91%) и 7.45 мин (9.05%) относительно затрат времени на движение с остановками на промежуточных станциях;

- снижение общего (полного) и удельного расходов натурального дизельного топлива за поездку, в среднем на 20.09%;
- достижение общего (полного) и удельного расхода натурального дизельного топлива на одну остановку, соответственно, 33.21 кг и 0.78 кг/10⁴ ткм брутто;
- снижение приведённых удельных затрат денежных средств приблизительно на 2917 с/м / км (или 20%).

Аналогично исследованиям [11, 16], тяговые качества (свойства) профиля пути перегонов холмисто-горного участка Мароканд – Навои АО «Узбекские железные дороги» будем обосновывать по критерию сложности профиля пути перегона. Таким критерием являются приведённые значения общего и удельного расходов натурального дизельного топлива на тягу поездов, которые численно будут равны частному от деления количества (величины) упомянутых расходов на один километр длины железнодорожного пути. С целью обеспечения корректности принятого нами критерия, дополнительно будем использовать сопутствующие перевозочному процессу на холмисто-горном участке Мароканд – Навои следующие приведённые значения: c_T – приведённые денежные затраты; t^* – приведённое время хода поезда в режиме тяги и e – удельный расход натурального дизельного топлива на тягу поездов.

Средние значения кинематических параметров движения, общего расхода натурального дизельного топлива на тягу поездов и приведённые значения параметров основных показателей энергетической эффективности упомянутых тепловозов *UzTE16M3* при вождении грузовых поездов по перегонам участка Мароканд – Навои были определены как среднеариф-

метические величины для двух видов движения – с остановками на раздельных пунктах и без остановок.

На рис. 3 и рис. 4 представлены, соответственно, динамика средних значений кинематических параметров движения грузовых поездов и расхода натурального дизельного топлива, затрачиваемого исследуемыми тепловозами *UzTE16M3* на движение поездов по перегонам участка Мароканд – Навои, а также изменения приведённых значений показателей энергетической

эффективности упомянутых тепловозов по каждому перегону участка. По оси абсцисс приняты обозначены перегоны, номера которых соответствуют нумерации в табл. 2, 3. На рис. 4 использованы следующие обозначения: E^* , e^* , e – расход натурального дизельного топлива за поездку, соответственно, приведённый общий (полный), приведённый удельный и удельный; t_t^* – приведённое время хода поезда в режиме тяги; c_t – приведённые денежные затраты.

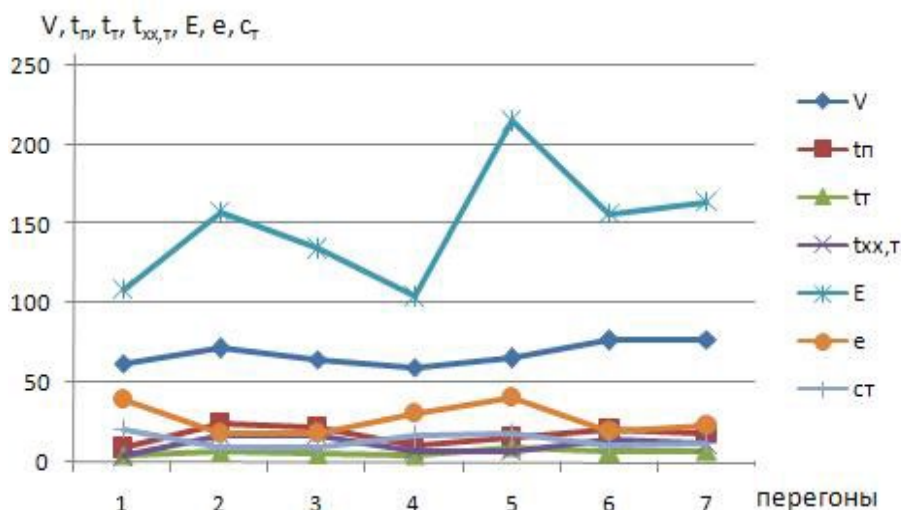


Рис. 3. Средние значения кинематических параметров движения грузового поезда и расхода натурального дизельного топлива на перемещение поезда тепловозами *UzTE16M3* по перегонам участка Мароканд – Навои

Fig. 3. Average values of the kinematic parameters of the movement of a freight train and the consumption of diesel fuel for the movement of a train by diesel locomotives *UzTE16M3* along the tracks of the Marokand – Navoi line

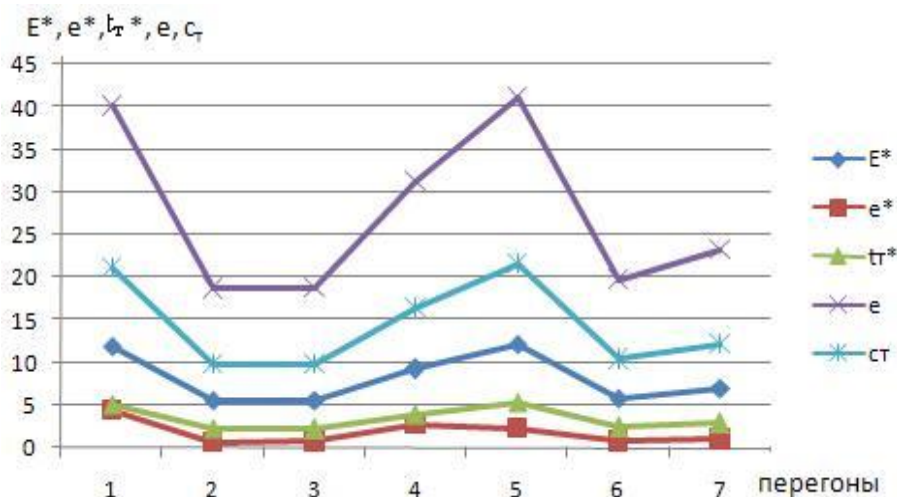


Рис. 4. Приведённые значения показателей энергетической эффективности тепловозов *UzTE16M3* по перегонам участка Мароканд – Навои

Fig. 4. The given values of the energy efficiency indicators of *UzTE16M3* diesel locomotives for the sections of the Marokand – Navoi line

Для лучшей наглядности динамики приведённого времени хода грузового поезда в режиме тяги t_t^* по перегонам исследуемого участка их значения на рис. 4 были увеличены в десять раз.

Анализ представленных зависимостей, критерия сложности профиля пути перегонов участка и приведённых значений параметров основных показателей

перевозочной работы тепловоза *UzTE16M3*, характеризующих исследуемое движение грузовых поездов на этом участке, свидетельствует о следующем.

Перегоны Мароканд – Джума и Разъезд № 28 – Зирабулак являются наиболее сложными, перегон Каттакурган – Разъезд № 28 – средний по сложности, условно лёгким перегон является перегон Зиёвуд-

дин – Навои, а перегоны Джума – Нурбулак, Нурбулак – Каттакурган и Зирабулак – Зиёвуддин – наиболее лёгкие.

Распределение приведённых значений параметров энергетической эффективности исследуемого тепловоза *UzTE16M3* по каждому из перегонов исследуемого участка обосновывает и подтверждает корректность вышесказанного.

1. Величина приведённого расхода натурального дизельного топлива общего (E^* , кг/км) / удельного (e^* , кг/10⁴ ткм брутто: км) по каждому перегону участка Мароканд-Навои составляет:

- на наиболее сложных перегонах Мароканд – Джума и Разъезд № 28 – Зирабулак, соответственно, 11.87 / 4.38 и 12.49 / 2.37 единиц при движении без остановок, а также 12.01 / 4.44 и 11.88 / 2.30 единиц при движении с остановками на отдельных пунктах, а для средних приведённых значений – 11.94 / 4.41 и 12.18 / 2.33 единиц;
- на среднем по сложности перегоне Каттакурган – Разъезд № 28 эти значения составляют 7.81 / 2.34 и 10.72 / 3.20 единиц, соответственно, при движении без остановок и с остановками на отдельных пунктах, а для средних приведённых значений – 9.26 / 2.77 единиц;
- на условно лёгком перегоне Зиёвуддин – Навои и лёгких перегонах Джума – Нурбулак, Нурбулак – Каттакурган и Зирабулак – Зиёвуддин происходит изменение отношения приведённого расхода топлива к удельному в диапазоне от 8.48 / 1.2 до 6.23 / 0.78 единиц при движении с остановками и от 5.87 / 0.74 до 4.26 / 0.5 единиц при движении без остановок на отдельных пунктах, а для средних приведённых значений – от 6.93 / 0.99 до 5.52 / 0.65 единиц.

2. Усреднённые величины приведённых значений времени хода грузового поезда в режиме тяги (t_t^* , мин/км) и денежных затрат (c_t , тыс. сўм/км) на натурное дизельное топливо на лёгких перегонах Джума – Нурбулак, Нурбулак – Каттакурган и Зирабулак – Зиёвуддин составляют, в среднем, $t_t^* = 0.23$ мин/км и $c_t = 10.007$ тыс. сўм/км. Аналогичные значения на перегонах Мароканд – Джума, Разъезд № 28 – Зирабулак и Каттакурган – Разъезд № 28 превышают приведённые выше значения, соответственно, в 2.22 и 2.11; 2.3 и 2.15; 1.7 и 1.39 раз.

3. Аналогичные превышения характерны также для значений удельного расхода натурального дизельного топлива на тягу поездов (для лёгких перегонов величина $e = 19.07$ кг/10⁴ ткм брутто), увеличения которых для двух самых сложных, среднего по трудности и условно лёгкого перегонов составляют, соответственно, 2.1, 2.16; 1.64 и 1.04 раза.

Таким образом, по профилю пути холмисто-горного железнодорожного участка Мароканд – Навои перегоны Мароканд – Джума и Разъезд № 28 – Зирабулак являются наиболее сложными, перегон

Каттакурган – Разъезд № 28 – средний по сложности, условно лёгкий перегон – Зиёвуддин – Навои, а перегоны Джума – Нурбулак, Нурбулак – Каттакурган и Зирабулак – Зиёвуддин – наиболее лёгкие.

4. Заключение

В результате проведённых исследований перевозочной работы трёхсекционных магистральных тепловозов серии *UzTE16M3* при различных условиях организации грузового движения на холмисто-горном железнодорожном участке Мароканд – Навои АО «Узбекская железная дорога» были получены значения кинематических параметров движения грузовых поездов и показатели энергетической эффективности использования исследуемого тепловоза. Были обоснованы критерии тягового качества профиля пути перегонов для разных типов участков железных дорог и определены их значения по каждому из перегонов исследуемого холмисто-горного участка.

Полученные параметры кинематических и энергетических показателей перевозочной работы исследуемых магистральных тепловозов показали достаточно высокую сходимость с результатами известных исследований [1, 11, 12, 20–22] и однозначно могут характеризовать перевозочный процесс в реальных условиях организации железнодорожных перевозок грузов на данном исследуемом участке железной дороги.

Результаты исследования, расширяя диапазон практического использования их в разных условиях организации эксплуатационной деятельности железных дорог, рекомендуются автором машинистам, машинистам-инструкторам и специалистам цеха эксплуатации локомотивных депо Самарканд и Бухара. Полученные результаты могут быть использованы для корректировки режимных карт вождения грузовых поездов, а также для оценки действующих и разработки перспективных нормативов расхода натурального дизельного топлива тепловозами на тягу поездов.

Кроме того, результаты исследования будут весьма полезны специалистам локомотивного комплекса и других смежных структурных подразделений АО «Узбекские железные дороги» при определении тяговых качеств пути и трассы железнодорожной линии Самарканд – Бухара. Предложенные приведённые значения общего и удельного расходов натурального дизельного топлива на тягу поездов в количественном и денежном исчислении, с учётом сопутствующих перевозочному процессу значений приведённого времени хода поезда в режиме тяги и удельного расхода натурального дизельного топлива за поездку, позволят адекватно оценивать влияние сложности перегонов железнодорожного пути на энергетику и эффективность организации движения грузовых и пассажирских поездов на холмисто-горных и идентичным им участках железных дорог.

Список литературы

1. Абляимов О. Анализ эффективности использования локомотивной тяги на равнинном участке железной дороги // Известия Транссиба. 2015. Т. 24. № 4. С. 2-11.
2. Anand M. D., Selvaraj T., Kumanan S., Janarthanan J. Fault diagnosis system for a robot manipulator through neuro fuzzy approach // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2008. Т. 3. № 2. С. 181. <https://www.doi.org/10.1504/IJMIC.2008.019357>.
3. Wang Y.-X., Wang L.-D., Wang B.-H., Luo N.-N. Display screen in the cab for the locomotive fault diagnosis system // Journal of the China Railway Society. 2006. № 3. С. 67-70.
4. Li N. Research on Electromagnetic Transient Process of Electric Locomotive System: PhD thesis, Beijing Jiaotong University. Beijing. 2010. 332 с.
5. Naidoo P. N., Mulder J.M. Improved distributed power train handling strategies // 11th International Heavy Haul Association Conference. Cape Town, 2017.
6. Mayet C., Pouget J., Bouscayrol A., Lhomme W. Influence of an Energy Storage System on the Energy Consumption of a Diesel-Electric Locomotive // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2014. Т. 63. № 3. С. 1032-1040. <https://www.doi.org/10.1109/TVT.2013.2284634>.
7. Liu Y.-J., Chang G. W., Huang H. M. Mayr's Equation-Based Model for Pantograph Arc of High-Speed Railway Traction System // IEEE Transactions on Power Delivery. 2010. Т. 25. № 3. С. 2025-2027. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2037521>.
8. Jiang X., He Z., Hu H., Zhang Y. Analysis of the Electric Locomotives Neutral-section Passing Harmonic Resonance // Energy and Power Engineering. 2013. Т. 05. № 04. С. 546-551. <https://www.doi.org/10.4236/epe.2013.54B104>.
9. GuanJun L., Xiaoyun F., Lijun W., Shihao C. Research and Simulation on Auto-Passing Phase Separation Control Strategy of High-Speed EMU // Transactions of China Electrotechnical Society. 2007. № 7. С. 181-185.
10. WEN J., WANG B., FANG Z. Studies and Applications of Ground Auto-passing Neutral Section Separation System for High Speed Railway // Railway Standard Design. 2011. № 4. С. 104-108.
11. Абляимов О. Оценка эффективности перевозочной работы тепловозов 4ТЭ10М и тяговых качеств профиля пути участка Кумкурган-Ташгузар в условиях эксплуатации // Вестник транспорта Поволжья. 2015. Т. 49. № 1. С. 17-24.
12. Абляимов О. Исследование эксплуатации тепловозов UZTE16M3 на холмисто-горном участке АО «Ўзбекистон темир йўллари» // Вестник транспорта Поволжья. 2016. Т. 57. № 3. С. 16-22.
13. Деев В., Ильин Г., Афонин Г.С. Тяга поездов: Учебное пособие для вузов. М.: Транспорт, 1987. 264 с.
14. Кузьмич В., Руднев В., Френкель С. Теория локомотивной тяги: Учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: Издательство «Маршрут», 2005. 448 с.
15. Абляимов О. Исследование эксплуатации тепловозов 3ТЭ10М на холмисто-горном участке АО «Ўзбекистон темир йўллари» // Известия Транссиба. 2016. Т. 26. № 2. С. 2-10.
16. Абляимов О. Исследование эффективности перевозочной работы тепловозов 3ТЭ10М и тяговые качества профиля пути участка Мароканд – Навои в условиях эксплуатации // Транспортные интеллектуальные системы - 2017 (TIS-2017). Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 16-17 февраля 2017. С. 150-162.
17. Бабищев А., Егорченко В. Тяга поездов. М.: Трансжелдориздат, 1962. 264 с.
18. Бабищев А., Гурский П., Новиков П. Тяга поездов и тяговые расчеты: Учебник. М.: Транспорт, 1971. 280 с.
19. Абляимов О., Ушаков Э. Основы управления локомотивов: Учебник. Ташкент: Davr, 2012. 392 с.
20. Абляимов О. Исследование эффективности использования локомотивов дизельной тяги на холмисто-горном участке железной дороги // Вестник транспорта Поволжья. 2016. Т. 60. № 6. С. 17-24.
21. Абляимов О., Ергашев З. К исследованию эксплуатации тепловозов UzTE16M3 на холмисто-горном участке железной дороги // Локомотивы. XXI век. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2016. С. 179-184.
22. Абляимов О. С., Ергашев З. З., Хисматулин М. И. Оценка тяговых качеств профиля пути железнодорожного участка Мароканд – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари» // Локомотивы. XXI век. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2016. С. 188-193.

References

1. Ablyalimov O. S. *The Analyses of Efficiency of Use of the Locomotive Traction on the Plainly Direction of Railway Track* // Journal of Transsib Railway Studies. 2015, vol. 24, no. 4, pp. 2–11. (In Russ.).
2. Anand M. D., Selvaraj T., Kumanan S., Janarthanan J. *Fault diagnosis system for a robot manipulator through neuro fuzzy approach* // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2008, vol. 3, no. 2, p. 181. <https://www.doi.org/10.1504/IJMIC.2008.019357>.
3. Wang Y.-X., Wang L.-D., Wang B.-H., Luo N.-N. *Display screen in the cab for the locomotive fault diagnosis system* // Journal of the China Railway Society. 2006, no. 3, pp. 67–70.
4. Li N. *Research on Electromagnetic Transient Process of Electric Locomotive System*. Beijing: Beijing Jiaotong University. 2010. 332 p.
5. Naidoo P. N., Mulder J.M. Improved distributed power train handling strategies // 11th International Heavy Haul Association Conference. 2017.
6. Mayet C., Pouget J., Bouscayrol A., Lhomme W. *Influence of an Energy Storage System on the Energy Consumption of a Diesel-Electric Locomotive* // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2014, vol. 63, no. 3, pp. 1032–1040. <https://www.doi.org/10.1109/TVT.2013.2284634>.
7. Liu Y.-J., Chang G. W., Huang H. M. *Mayr's Equation-Based Model for Pantograph Arc of High-Speed Railway Traction System* // IEEE Transactions on Power Delivery. 2010, vol. 25, no. 3, pp. 2025–2027. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2037521>.
8. Jiang X., He Z., Hu H., Zhang Y. *Analysis of the Electric Locomotives Neutral-section Passing Harmonic Resonance* // Energy and Power Engineering. 2013, vol. 05, no. 04, pp. 546–551. <https://www.doi.org/10.4236/epe.2013.54B104>.
9. GuanJun L., Xiaoyun F., Lijun W., Shihao C. *Research and Simulation on Auto-Passing Phase Separation Control Strategy of High-Speed EMU* // Transactions of China Electrotechnical Society. 2007, no. 7, pp. 181–185.
10. WEN J., WANG B., FANG Z. *Studies and Applications of Ground Auto-passing Neutral Section Separation System for High Speed Railway* // Railway Standard Design. 2011, no. 4, pp. 104–108.
11. Ablyalimov O. S. *Evaluation of the efficiency of transportation work of diesel locomotives 4TE10M and traction qualities of the track profile of the Kumkurgan-Tashguzar section under operating conditions* // Vestnik transporta Povolzhya. 2015, vol. 49, no. 1, pp. 17–24. (In Russ.).
12. Ablyalimov O. S. *Study of the operation of UZTE16M3 diesel locomotives on the hilly-mountainous section of JSC "Uzbekiston Temir Yulari"* // Vestnik transporta Povolzhya. 2016, vol. 57, no. 3, pp. 16–22. (In Russ.).
13. Deev V. V., Ilin G. A., Afonin G.S. *Тяга поездов: Textbook*. Moscow: Transport. 1987. 264 p. (In Russ.).
14. Kuzmich V., Rudnev V., Frenkel S. *Locomotive traction theory*. Moscow: Publishing house "Marshrut". 2005. 448 p. (In Russ.).
15. Аблялимов О. *Researching an Exploitation of 3TE10M Diesel Locomotive on a Hilly-Mountainous Direction of "Uzbekistan Railways" JSC* // Journal of Transsib Railway Studies. 2016, vol. 26, no. 2, pp. 2–10. (In Russ.).
16. Ablyalimov O. *Investigation of the efficiency of the transportation operation of diesel locomotives 3TE10M and traction qualities of the track profile of the Marokand - Navoi section under operating conditions* // Transport intelligent systems: Proceedings of the first international scientific and practical conference. 16-17 February 2017, Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, pp. 150–162. (In Russ.).
17. Babichkov A. M., Egorchenko V. F. *Train Traction*. Moscow: Transzheldorizdat. 1962. 264 p. (In Russ.).
18. Babichkov A. M., Gurskii P. A., Novikov P. A. *Тяга поездов и тяговые расчеты: Textbook*. Moscow: Transport. 1971. 280 p. (In Russ.).
19. Ablialimov O. S., Ushakov E. S. *Locomotive control basics: Textbook*. Tashkent: Davr. 2012. 392 p. (In Russ.).
20. Ablialimov O. S. *Study of the efficiency of using diesel traction locomotives on the hilly - mountainous section of the railway* // Vestnik transporta Povolzhya. 2016, vol. 60, no. 6, pp. 17–24. (In Russ.).
21. Ablialimov O. S., Ergashev Z. Z. *To the study of the operation of UzTE16M3 diesel locomotives on the hilly-mountainous section of the railway* // Locomotives. XXI Century: Proceedings of the IV-th conference. 2016, Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, pp. 179–184. (In Russ.).
22. Ablialimov O. S., Ergashev Z. Z., Khismatulin M. I. *Assessment of traction qualities of the track profile of the railway section Marokand - Navoi of JSC "Uzbekiston Temir Yulari"* // Locomotives. XXI Century: Proceedings of the IV-th conference. 2016, Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, pp. 188–193. (In Russ.).



ISSN 2222-9396 (Print)

УДК 656.073:004.942

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40>

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АГЕНТНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ

Мишкурлов П.Н.^{1*}, Рахмангулов А.Н.¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Российская Федерация

*E-mail: p.mishkurov@magtu.ru

Аннотация. Представлены решения по построению имитационных моделей железнодорожной станции на основе агентного подхода. Имитационные модели на железнодорожном транспорте традиционно используются как инструмент обоснования проектных решений. Основным ограничением имитационных моделей железнодорожной станции является специфика организации обработки поездов на уровне оперативного планирования в условиях возрастающей сложности структуры и неравномерности вагонопотоков. Оперативное управление железнодорожным транспортом на основе имитационных моделей требует решения задачи корректировки параметров модели с использованием данных информационной системы. Предлагается подход к построению имитационных моделей железнодорожных станций, основанный на комплексном использовании вспомогательного виртуального графа и агентной модели оперативного управления обработкой поездов. Разработан оригинальный алгоритм формирования виртуального графа железнодорожной станции. Представлена программная библиотека описания маневровой работы и функционала маневрового диспетчера в среде имитационного моделирования AnyLogic. Приведены результаты сравнительного анализа различных подходов к созданию имитационных моделей железнодорожных станций.

Ключевые слова: железнодорожная станция, имитационное моделирование, AnyLogic, маневровый диспетчер, транспортная сеть, маневровый рейс, агентный подход

©Мишкурлов П.Н., Рахмангулов А.Н., 2021

Поступила: 15 апреля 2021 г.; Принята к публикации: 26 августа 2021 г.; Опубликовано: 30 декабря 2021 г.

Для цитирования:

Мишкурлов П.Н., Рахмангулов А.Н. Особенности построения агентной имитационной модели железнодорожной станции // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2021. Т.11. №1. С.29-40.
<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ISSN 2222-9396(Print)

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40>



CONSTRUCTION FEATURES OF RAILWAY STATION AGENT-BASED SIMULATION MODEL

Mishkurov P.N.^{1*}, Rakhmangulov A.N.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, the Russian Federation

*E-mail: p.mishkurov@magtu.ru

Abstract. The authors presented solutions for building simulation models of a railway yards based on an agent-based approach. Simulation models in railway transport are traditionally used as a tool for substantiating design decisions. The main limitation of simulation models of railway yards is the specificity of the organization of train processing at the level of operational planning in the context of the increasing complexity of the structure and unevenness of railcars flows. Operational management of railway transport based on simulation models requires solving the problem of adjusting the model parameters using the data of the information system. An approach to the construction of simulation models of railway stations is proposed, based on the integrated use of an auxiliary virtual graph and an agent-based model of operational control of train processing. An original algorithm for forming a virtual graph of a railway yard has been developed. A software library for describing shunting operations and the functionality of a shunting dispatcher in the AnyLogic simulation environment is presented. The results of a comparative analysis of various approaches to the creation of simulation models of railway yards are presented.

Keywords: rail yard, simulation modeling, AnyLogic, shunting dispatcher, transport network, route of shunting train movement, agent-based approach

© Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N., 2021

Received: April 15, 2021; Accepted: August 26, 2021; Published: December 28, 2021

For citation:

Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. Construction Features of Railway Station Agent-based Simulation Model // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2021, vol.11, no.1, pp.29-40
<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

Новым подходом к построению автоматизированных систем управления является комплексное использование имитационного моделирования и методов оптимизации в информационно-управляющих системах железнодорожного транспорта [1–4].

Одни из первых рекомендаций по использованию метода имитационного моделирования для исследования транспортных процессов и систем предложены профессором В.А. Персиановым. В результате были построены универсальные модели. Использование таких моделей позволило исследовать процесс функционирования транспортных объектов из широкого класса в различных условиях. Следующим этапом стало формирование методик моделирования транспортных систем [1, 2, 5]. Однако представленные универсальные модели были ориентированы, в основном, на проектирование железнодорожных станций и узлов.

В настоящее время анализ практик применения метода имитационного моделирования при описании работы железнодорожного транспорта показывает развитие исследований по нескольким направлениям в зависимости от уровней абстракции и планирования.

Исследования [1, 6–11] посвящены современным подходам к построению имитационных моделей функционирования железнодорожных узлов на высоком уровне абстракции. Отличительной чертой такого подхода к построению имитационных моделей является представление грузов и подвижного состава в форме транспортных потоков, описание свойств и характеристик реальных объектов при помощи различных параметров и показателей потоков. Результатами реализации таких моделей в информационно-управляющих системах железнодорожного транспорта являются рекомендации руководителям стратегического уровня управления, например, при разработке инвестиционных планов, анализа пропускной и перерабатывающей способностей станций, оценке качества железнодорожных перевозок.

Подходы к построению имитационных моделей функционирования железнодорожных станций и узлов на среднем уровне абстракции развиваются в двух направлениях. Исследования [12–17] ориентированы на оптимизацию графика движения и планирование маршрутов движения поездов в железнодорожном узле. Авторами работ [18–22] предлагается макро моделирование технологии работы железнодорожных станций и участков железнодорожной сети. Отличительной особенностью такого подхода является описание групп стрелочных переводов и парков путей отдельными объектами библиотек имитационной модели.

Представленные универсальные модели нашли своё применение при проектировании железнодорожных транспортных узлов и станций, информатизации тактического уровня управления и автоматизации решений проектно-плановых задач на железнодорожном транспорте.

Имитационные модели работы железнодорожного транспорта на низком уровне абстракции применяются при создании цифровых двойников с высокой степенью детализации транспортных узлов и станций. Предлагается комплексное использование метода имитационно-

го моделирования и методов оптимизации графика движения, планирования маршрутов движения поездов в железнодорожном транспортном узле [23–25, 10], обработки поездов на железнодорожной станции [26], инфраструктуры и транспортной сети [27]. Основным преимуществом имитационного моделирования с высокой степенью детализации функционирования транспортных узлов и станций является формирование рекомендаций оперативным руководителям перевозочного процесса, что способствует уменьшению вероятности ошибок планирования работ и сокращению времени на принятие управленческих решений [2, 4].

Таким образом, метод имитационного моделирования позволяет описывать сложную функциональную структуру железнодорожных узлов с различной степенью детализации, проводить эксперименты для различных условий, определять их оптимальную структуру.

Однако существенным недостатком имитационного моделирования железнодорожных станций является высокая трудоёмкость и, как следствие, укрупнённое представление в модели схемы путевого развития железнодорожных станций и операций перевозочного процесса. Это связано с отсутствием эффективного способа представления в модели схемы путевого развития железнодорожной станции для решения различных задач моделирования маневровых перемещений.

В статье представлен способ описания в имитационной модели схемы путевого развития железнодорожной станции в форме ориентированного, не имеющего петель графа, а также порядок использования такого графа для моделирования маневровых операций в составе агентной имитационной модели.

2. Агентная имитационная модель железнодорожной станции

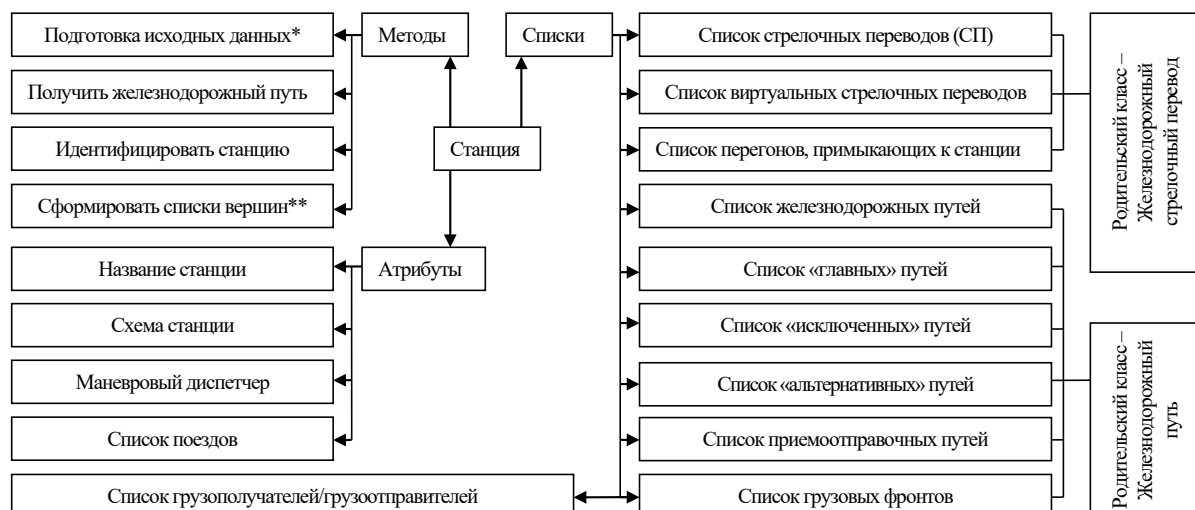
Создание новых программных библиотек моделирования маневровой работы и функционала маневрового диспетчера на основе объектно-ориентированного подхода требует использование агентного подхода к построению имитационных моделей железнодорожных станций (**рис. 1**).

Использование агентного подхода позволит детально описывать статические инфраструктурные (путевое развитие, грузовой фронт, технические средства и т.п.), динамические объекты (вагоны, локомотивы, поезда), а также действия руководителей перевозочного процесса, информационные сообщения между ними.

2.1 Представление схемы путевого развития железнодорожной станции в имитационной модели

Основным инфраструктурным объектом железнодорожной станции является её путевое развитие. Данные об этой схеме могут вводиться в имитационную модель программно (**рис. 2**), путём чтения данных о расположении железнодорожных путей и стрелочных переводов из файла или базы данных, а также вручную.

Транспортные сети традиционно описываются ориентированными или неориентированными графами, не имеющими петель. Предлагается описывать схему путевого развития в виде ориентированного графа, вершины которого графа соответствуют стрелочным переводам, а ребра – железнодорожным путям.



* - методы подготовки исходных данных: инициализировать вершины, определить предшествующий (в составе маршрута) железнодорожный стрелочный перевод, проверить «главный» железнодорожный путь стрелочного перевода, сформировать транспортную сеть, добавить грузополучателя/грузоотправителя.

** - результаты: список вершин транспортной сети, список виртуальных вершин транспортной сети. В качестве исходных данных метода используется граф, описывающий путевое развитие станции.

Рис. 1. Структура данных агентной имитационной модели железнодорожной станции

Fig. 1. Data structure of a rail yard agent-based simulation model

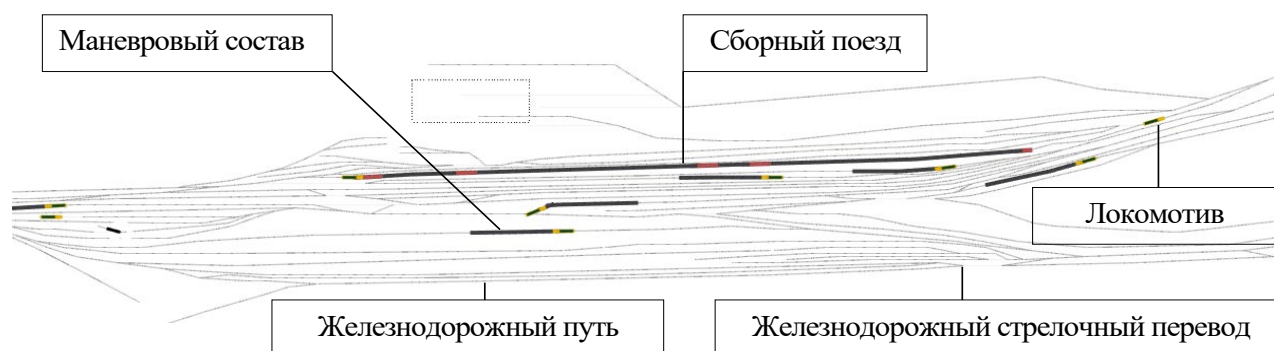


Рис. 2. Визуализация железнодорожной станции в имитационной модели

Fig. 2. Visualizing a rail yard in a simulation model

Традиционное описание топологии путей железнодорожной станции в форме транспортной сети не позволяет моделировать маневровые операции и маршруты маневровых составов с изменением направления их движения. Оптимальные маршруты между двумя произвольными вершинами такого графа не будут содержать ребра, соответствующего вытяжным путям. Это означает, что моделирование движения маневровых составов по таким маршрутам будет некорректным.

Предлагается подход, основанный на автоматизированном формировании виртуального графа, в котором каждой вершине (стрелочному переводу) ставится в соответствии две вершины – реальная и виртуальная (вспомогательная). Впервые идея графа с двумя вершинами для описания схемы путевого развития железнодорожных станций была предложена в [28]. Такой граф позволяет определять оптимальные маршруты движения поездов по железнодорожной станции со сложной схемой, когда требуется изменять направление движения поезда для достижения заданной конечной точки

маршрута. Добавление в граф виртуальной вершины требует связывание этой вершины с реальными при помощи дополнительного виртуального ребра (рис. 3).

Отличительным свойством виртуальной вершины транспортной сети является то, что ребра, которыми она связана с реальными вершинами, располагаются под углом больше 90° друг относительно друга. Такие дополнительные ребра будем также называть виртуальными.

Для предотвращения в модели движения маневрового состава без изменения направления, необходимо удалить из транспортной сети ребро, образующее острый угол, относительно других ребер, исходящих из вершины-стрелочного перевода. Такое ребро называется «исключённым». Ребро, которое не образует острый угол с «исключённым» и «альтернативным» называется «главным» (рис. 3).

Полученная в результате описанных преобразований виртуальная транспортная сеть позволяет моделировать следующие особенности схем путевого развития и технологии работы железнодорожных станций:

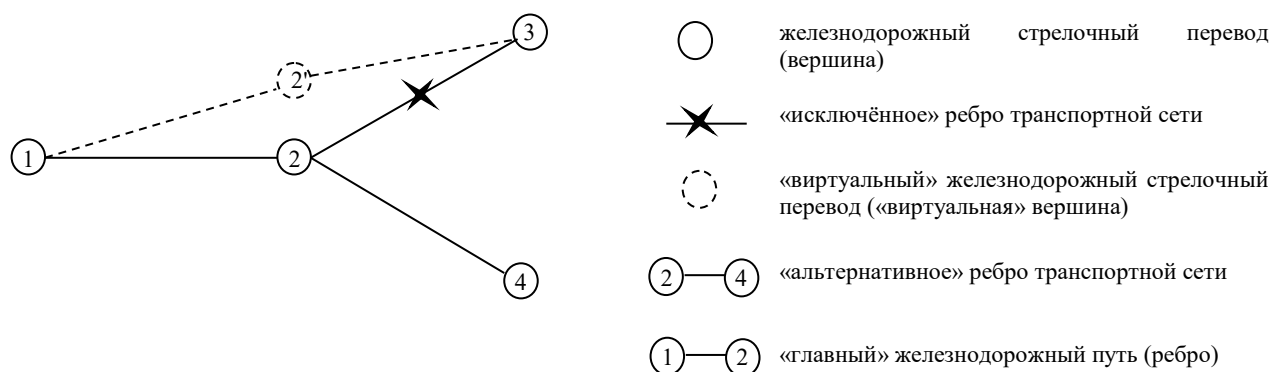


Рис. 3. Представление стрелочного перевода в имитационной модели
Fig. 3. Formalized description of the turnout switch in the simulation model

- «исключённые» ребра могут иметь как симметричное, так и асимметричное расположение;
- железнодорожным путём начала движения поезда или маневрового состава может быть «альтернативный» или «исключённый», а также «главный»;
- парк путей железнодорожной станции могут иметь параллельное, последовательное или комбинированное расположение;
- направление движение поезда или маневрового состава может быть как в чётном, так и в нечётном направлении;
- маневровые полурейсы могут осуществляться методом осаживания, толчка, оттягивания, перестановки, надвига состава или заезда локомотива.

Виртуальная транспортная сеть формируется в разработанной имитационной модели автоматически в процессе подготовки исходных данных.

2.2 Маршрутизация

Оптимальный (кратчайший) маршрут движения поезда по сформированной виртуальной транспортной сети может быть рассчитан с использованием различных методов. Предлагается использовать быстрый эвристический «sweep algorithm» [29], который позволяет находить все оптимальные маршруты от одной или нескольких начальных вершин транспортной сети до всех остальных вершин.

Варианты маршрута движения поезда по станции хранятся в имитационной модели в виде списка агентов типа «Маршрут» (**рис. 4**). Однако, результатами эвристического алгоритма являются списки «конечных» вершин и маршрутов до них, поэтому в имитационной модели необходимо расширять функционал формирования маршрутов, передавая данные о пути назначения подвижного состава.

Формирование маршрута движения поезда по станции реализован в два этапа.

На первом этапе определяется маршрут движения поезда до пути назначения и формируется «предварительный» список железнодорожных путей, входящих в этот маршрут. В качестве критериев выбора маршрута используются оценки (длины) железнодорожных стрелочных путей (рёбер).

На **рис. 5** показан пример формирования маршрута

с использованием виртуальных рёбер и вершины. Пусть путь отправления – это ребро (4)-(2), начальная вершина определена как (4), а путь назначения – дуга (2')-(3). В результате поиска кратчайших маршрутов в модели формируется список вершин $\{(4), (2), (1), (2'), (3)\}$ и список рёбер $\{(4)-(2), (2)-(1), (1)-(2'), (2')-(3)\}$.

На втором этапе предварительный маршрут разбирается на полурейсы и формируется окончательный маршрут движения поезда по станции. По результатам проверки списка дуг предварительного маршрута на наличие железнодорожных вытяжных путей формируются несколько полурейсов для маневрового состава. Производится контроль вместимости вытяжных путей. В случае превышения вместимости осуществляется поиск вытяжного пути необходимой длины. После этого изменяется часть предварительного маршрута до нового вытяжного пути. Результатом корректировки предварительного маршрута является новый список дуг, в состав которого входят железнодорожные вытяжные пути достаточной вместимости.

Формирование маршрутов является методом агента «Маневровый диспетчер», который определяет приоритеты пропуска поездов по транспортной сети.

2.3 Маневровая работа

Разработанная модель имитирует следующие функции маневрового диспетчера железнодорожной станции:

- приём и отправвление поездов;
- планирование маневровых полурейсов;
- управление централизованными стрелочными переводами и контроль занятости элементов путевого развития;
- планирование подачи-уборки вагонов для выполнения грузовых операций;
- планирование формирования-расформирования поездов;
- планирование перестановок вагонов;
- контроль накопления составов поездов;
- ведение графика исполненной работы.

Оперативное управление работой железнодорожной станцией в имитационной модели реализовано агентом «Маневровый диспетчер».

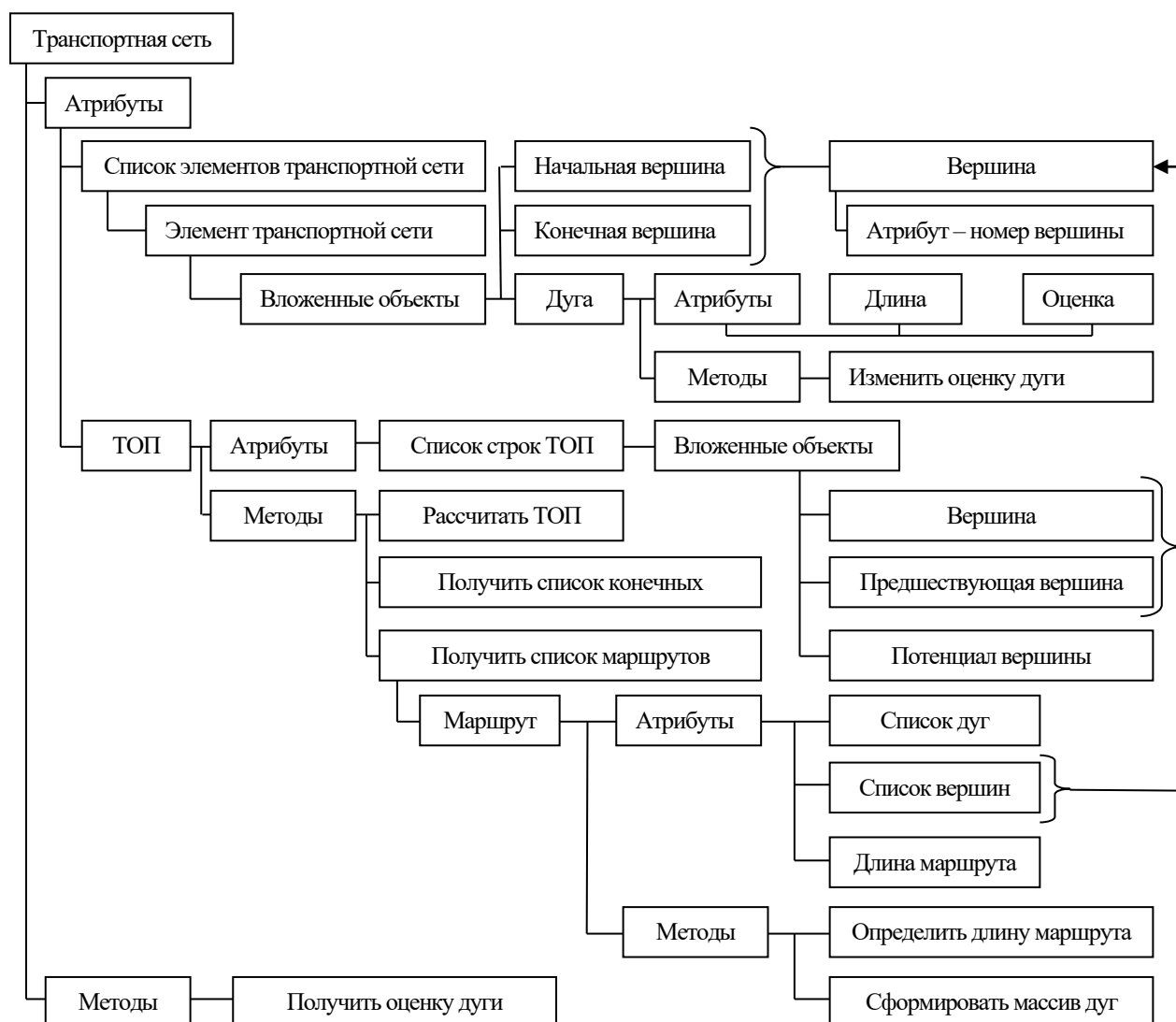


Рис. 4. Структура данных, описывающих путевое развитие железнодорожной станции в имитационной модели
Fig. 4. Track topology data structure in the simulation model

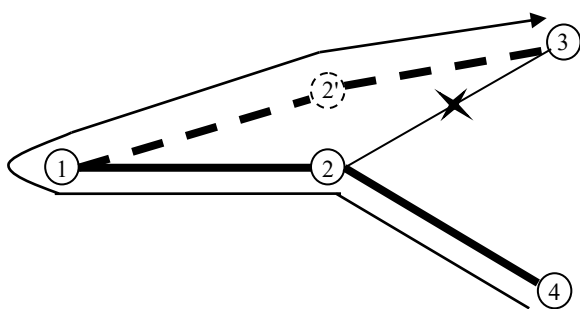


Рис. 5. Схема формирования маршрута на виртуальной транспортной сети
Fig. 5. Route formation scheme on a virtual transport network

Результаты выполнения методов агента «Маневровый диспетчер» передаются в виде сообщений через установленные связи агентов в соответствии со структурой информационных потоков, циркулирующих между уровнями оперативного руководства работой железнодорожной станции [30, 31].

Одним из объектов оперативного руководства работой железнодорожной станции на низком уровне управления является локомотиво-составительская бригада, функционал которой представлен в агенте «Поезд». Агенты типа «Поезд» получают сообщения от агента «Маневровый диспетчер» и выполняют соответствующие команды.

Обработка поездов на железнодорожной станции в модели имитируется потоковой диаграммой (рис. 6), в состав которой входят стандартные блоки «Железнодорожной библиотеки» и «Библиотеки моделирования процессов» AnyLogic. Данная потоковая диаграмма является частью агента «Поезд». В состав разработанной потоковой диаграммы (рис. 6) входят переменные, блоки AnyLogic, а также вложенные агенты. Основные переменные: «ПутьОтправления» и «ПутьНазначения» – ссылки рёбра транспортной сети, соответствующие путям отправления и назначения; «маршрутЗавершен», «полурейсЗавершен» – логические переменные, значение которых изменяется на «истина» после окончания движения по маршруту или после выполнения полурейса.

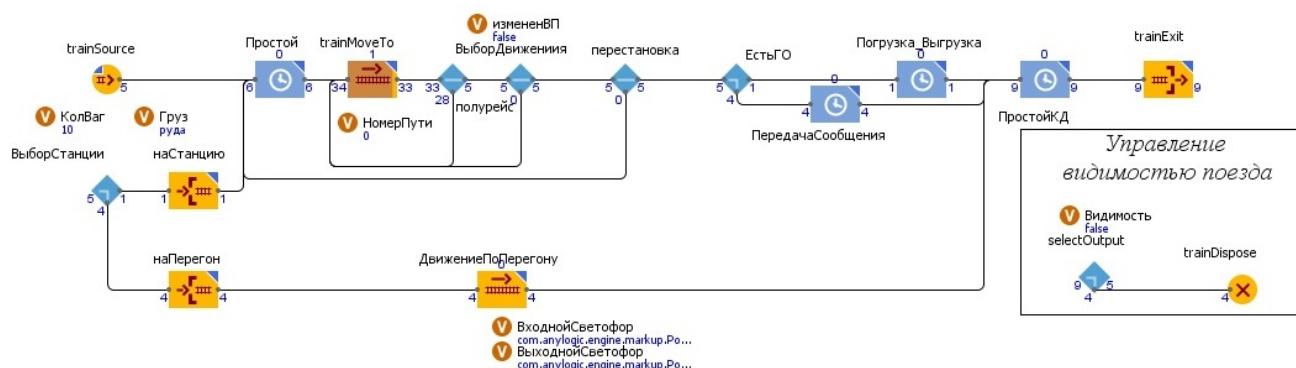


Рис. 6. Фрагмент потоковой диаграммы AnyLogic, имитирующей работу локомотивно-составительской бригады в агенте типа «Поезд»

Fig. 6. Fragment of the AnyLogic flowchart simulating the work of a shunting crew in an "Train" type agent

В разработанной потоковой диаграмме используются следующие блоки AnyLogic: «trainMoveTo» – имитирует движение поезда или маневрового состава по маршруту, заданному списком путей; «Delay» – имитирует задержку состава поезда под грузовыми операциями, а также различные простои; «selectOutput» – определяет место агента «Поезд» в потоковой диаграмме в зависимости от значений переменных «маршрутЗавершен» и «полурейсЗавершен» передаёт агент-поезд в блок «Delay» для имитации простоя или возвращает его в блок «trainMoveTo» для продолжения движения по маршруту [10].

Вложенными агентами потоковой диаграммы являются: «текущаяСтанция» – станция нахождения поезда; «маршрутПоСтанции» – оптимальный маршрут на виртуальной транспортной сети. Потоковая диа-

грамма также содержит список рёбер маршрута от пути отправления до пути назначения и данные о полурейсах, вытяжных путях, входящих в оптимальный маршрут (рис. 7).

Представленный способ описания маневровой работы на железнодорожной станции является универсальным и позволяет моделировать сложные маневровые перемещения с изменением направления движения поездов.

3. Результаты

Данный подход к построению имитационных моделей железнодорожных станций реализован на примере работы железнодорожного транспорта необщего пользования металлургического и горнообогатительного предприятий (рис. 8).

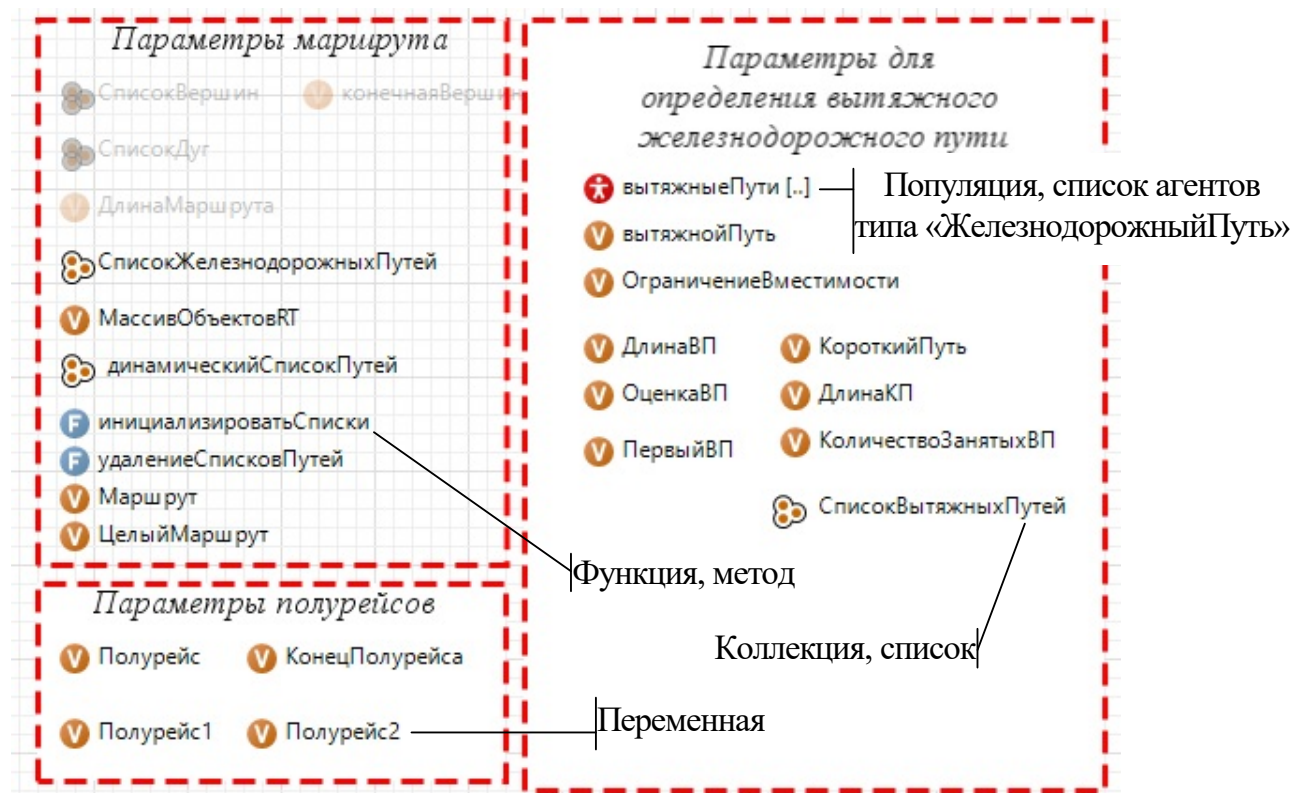


Рис. 7. Фрагмент структуры данных агента «маршрутПоСтанции»
«маршрутПоСтанции» data structure

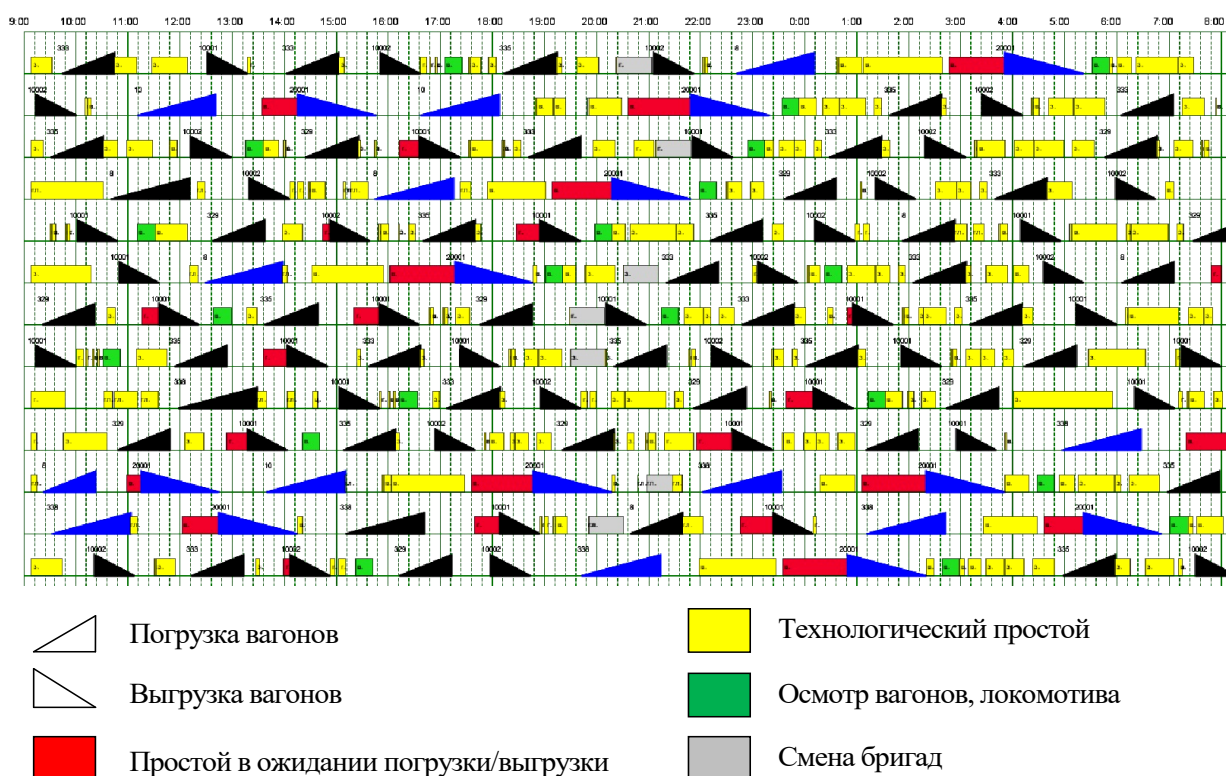


Рис. 8. Пример представления результатов имитационного моделирования работы железнодорожной станции
 Fig. 8. An example of the presentation of the rail yard' simulation modeling results

Результаты проведенных экспериментов на построенных имитационных моделях железнодорожных станций показали адекватное движение железнодорожных составов при выполнении маневровых и поездных операций, а также позволили выявить преимущества агентного подхода при построении имитационных моделей железнодорожных станций (табл. 1). В таблице предлагаемый агентный подход сравнивается с двумя известными подходами. Основное различие между подходами заключается в способе описания задач технологического процесса железнодорожной

станции. Традиционный подход основан на подробном описании каждой операции технологического процесса. Такой подход реализован в универсальных программах моделирования. Улучшенный подход основан на описании технологических процессов в форме набора технологических карт. Этот подход реализуется специализированными программами для моделирования работы железнодорожного транспорта, например [23, 19], а также использовался в ранних версиях представленной имитационной модели [2].

Таблица 1. Результаты анализа подходов к построению имитационных моделей железнодорожных станций
 Table 1. Approaches to the design of simulation models of rail yards

Особенность	Предлагаемый подход	Улучшенный подход	Традиционный подход
Содержание технологических карт	Постоянное	Переменное (зависит от числа технологических операций)	Переменное (зависит от числа технологических операций)
Число операций в составе технологического процесса	Переменное	Постоянное	Постоянное
Последовательность операций технологического процесса	Переменная	Переменная	Постоянная
Описание процесса формирования – расформирования составов	Автоматическое	Ручное (исходные данные)	Ручное (исходные данные)
Формирование маршрутов движения поездов	Автоматическое (оптимальные маршруты)	Автоматическое (оптимальное для отдельных маршрутов)	Ручное (таблица маршрутов)
Изменение маршрутов в процессе моделирования	Автоматическое	Ручное	Отсутствует

4. Заключение

Авторы предложили агентный подход для описания схемы путевого развития железнодорожных станций и технологии выполнения маневровых работ. Показан пример реализации предложенного подхода в составе имитационной модели железнодорожного пути необщего пользования, построенной с использованием программной платформы AnyLogic.

Использование агентного подхода к построению имитационных моделей железнодорожной станции и разработанный способ описания путевого развития

железнодорожных станций в составе имитационных моделей расширяет возможность комплексного применения имитационного моделирования и методов оптимизации при построении автоматизированных систем управления работой железнодорожного транспорта. Реализация данного подхода в рамках информационно-управляющих систем на железнодорожном транспорте позволит снизить вероятность возникновения ошибок и задержек при управлении перевозочным процессом.

Список литературы

1. Осокин О.В. Интеллектуальное сопровождение производственных процессов на железнодорожном транспорте: дис. ... д-ра техн. наук. М. 2014. 355 с.
2. Рахмангулов А.Н., Копылова О.А., Мишкuroв П.Н. Железнодорожные транспортно-технологические системы: организация функционирования. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. 300 с.
3. Michal G., Huynh N., Shukla N., Munoz A., Barthelemy J. RailNet: A simulation model for operational planning of rail freight // *Transportation Research Procedia*. 2017. Т. 25. С. 461-473. <https://www.doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.426>.
4. Rakhmangulov A., Śladkowski A., Osintsev N., Mishkurov P., Muravev D. Dynamic Optimization of Railcar Traffic Volumes at Railway Nodes. // *Rail Transport—Systems Approach / A. Śladkowski*. Cham: Springer International Publishing, 2017. С. 405-456. https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-51502-1_10.
5. Персианов В.А., Курбатова А.В., Липатов А.Г. Информатизация управления и автоматизированного решения проектно-плановых задач на транспорте. М.: ООО «Транслит», 2017. 176 с.
6. Козлов П.А., Козлова В.П., Осокин О.В. Об экономической сущности транспорта // *Транспорт: наука, техника, управление*. Научный информационный сборник. 2020. № 2. С. 57-59. <https://www.doi.org/10.36535/0236-1914-2020-02-10>.
7. Сорочкина И.С., Числов О.Н. Методы системного анализа и имитационного моделирования в работе предприятий промышленного железнодорожного транспорта // *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2014. № 2. С. 115-120.
8. Козлов П.А., Колокольников В.С., Тушин Н.А., Осокин О.В. Об использовании моделей оптимального управления транспортными потоками // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2019. № 1. С. 60-69. <https://www.doi.org/10.20291/2079-0392-2019-1-60-69>.
9. Сай В.М., Кочнева Д.И. Моделирование оценки потребности региона в контейнерных перевозках // *Мир транспорта*. 2018. Т. 16. № 4. С. 160-178.
10. Мишкuroв П.Н., Рахмангулов А.Н. Динамическая оптимизация вагонопотоков. М.: Русайнс, 2017. 110 с.
11. Muravev D., Hu H., Rakhmangulov A., Mishkurov P. Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: Case study on the Ningbo-Zhoushan Port // *International Journal of Information Management*. 2021. Т. 57. С. 102133. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133>.
12. Li S., Lv H., Xu C., Chen T., Zou C. Optimized Train Path Selection Method for Daily Freight Train Scheduling // *IEEE Access*. 2020. Т. 8. С. 40777-40790. <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976904>.
13. Moeinaddini A., Shafahi Y., Hasany R. M. A simulation model for train movements in the rail network // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*. 2019. Т. 172. № 3. С. 152-163. <https://www.doi.org/10.1680/jtran.16.00082>.
14. Alexandrov A., Bannikov D., Sirina N. Agent-based modeling of service maintenance and repair of rolling stock // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Т. 403. № 1. С. 12193. <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012193>.
15. Wang J., Ghanem A., Rakha H., Du J. A rail transit simulation system for multi-modal energy-efficient routing applications // *International Journal of Sustainable Transportation*. 2021. Т. 15. № 3. С. 187-202. <https://www.doi.org/10.1080/15568318.2020.1718809>.
16. Joffe A. D., Wiggins M. W. Cross-task cue utilisation and situational awareness in learning to manage a simulated rail control task // *Applied ergonomics*. 2020. Т. 89. С. 103216. <https://www.doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103216>.

17. Bažant M., Kavička A., Diviš R., Varga M. Simulation-Based Rail Traffic Optimizations Applying Multicriterial Evaluations of Variants // MENDEL. 2019. Т. 25. № 1. С. 139-146. <https://www.doi.org/10.13164/mendel.2019.1.139>.
18. Козлов П.А., Вакуленко С.П., Колокольников В.С. О построении интеллектуальных систем управления железнодорожными станциями // Наука и техника транспорта. 2019. № 2. С. 70-76.
19. Колокольников В.С., Слободянюк И.Г. Технология макро моделирования полигонов // Транспорт Урала. 2019. № 3. С. 48-51. <https://www.doi.org/10.20291/1815-9400-2019-3-48-51>.
20. Лукьянов В.А., Мишкурлов П.Н., Копылова О.А. Логистическая модель транспортно-технологической системы промышленного предприятия // Бюллетень транспортной информации. 2019. Т. 293. № 11. С. 19-30.
21. Chislov O., Zadorozhnyi V., Lomash D., Chebotareva E., Solop I., Bogachev T. Methodological Bases of Modeling and Optimization of Transport Processes in the Interaction of Railways and Maritime Transport. // Modern Traffic Engineering in the System Approach to the Development of Traffic Networks / E. Macioszek [и др.]. Cham: Springer International Publishing, 2020. С. 79-89. https://www.doi.org/10.1007/978-3-030-34069-8_7.
22. Шмудевич М.И., Стариков А.Е. Особенности нормирования маневровой работы в имитационной модели станции // Мир транспорта. 2015. Т. 13. С. 198-212.
23. Александров А.Э., Сурин А.В., Шипулин А.В. Использование имитационных моделей в оперативном планировании поездной работы // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. Т. 60. № 4. С. 65-72.
24. Yang Z., Xiang D., Cheng Y. VR Panoramic Technology in Urban Rail Transit Vehicle Engineering Simulation System // IEEE Access. 2020. Т. 8. С. 140673-140681. <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009326>.
25. Хабаров В.И., Красникова К.В. Создание имитационной модели движения поездов с использованием мультиагентного и дискретно-событийного подходов на примере ЗападноСибирской железной дороги // Journal of Transsib Railway Studies. 2017. Т. 31. № 3. С. 143-154.
26. Калинина А.Р. Разработка имитационной модели узловой технической станции // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2015. Т. 4. № 2.
27. Меркулов А.В., Годяев А.И. Некоторые аспекты имитационного моделирования инфраструктуры железнодорожного участка // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2015. Т. 39. № 4. С. 109-116.
28. Wagg D. J., Worden K., Barthorpe R. J., Gardner P. Digital Twins: State-of-the-Art and Future Directions for Modeling and Simulation in Engineering Dynamics Applications // ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg. 2020. Т. 6. № 3. <https://www.doi.org/10.1115/1.4046739>.
29. Gillet B. E., Miller L. E., Johnson J. G. Vehicle dispatching — Sweep algorithm and extensions. // Disaggregation / L. P. Ritzman [и др.]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1979. С. 471-483. https://www.doi.org/10.1007/978-94-015-7636-9_30.
30. Багинова В.В., Рахмангулов А.Н., Мишкурлов П.Н. Методика оценки организационной структуры оперативного управления вагонопотоками на путях необщего пользования // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2012. Т. 2. С. 19-22.
31. Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н. Управление вагонопотоками в промышленных транспортных системах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 1. С. 16-20.

References

1. Osokin O.V. *Intelligent Support of Production Processes in Railway Transport: Dr. Tech. Thesis*. Moscow: Russian University of Transport. 2014. 355 p. (In Russ.).
2. Rakhmangulov A.N., Kopylova O.A., Mishkurov P.N. *Railway transport and technological systems: organization of functioning*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2014. 300 p. (In Russ.).
3. Michal G., Huynh N., Shukla N., Munoz A., Barthelemy J. *RailNet: A simulation model for operational planning of rail freight* // Transportation Research Procedia. 2017, vol. 25, pp. 461–473. <https://www.doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.426>.
4. Rakhmangulov A., Śladkowski A., Osintsev N., Mishkurov P., Muravev D. Dynamic Optimization of Railcar Traffic Volumes at Railway Nodes // Rail Transport—Systems Approach: Studies in Systems, Decision and Control]. 2017. vol. 87, Cham: Springer International Publishing, pp. 405–456.
5. Persianov V.A., Kurbatova A.V., Lipatov A.G. *Informatization of management and automated solution of design and planning tasks in transport*. Moscow: Translit. 2017. 176 p. (In Russ.).

6. Kozlov P.A., Kozlova V.P., Осокин О.В. *About the Economic Essence of Transport* // Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection. 2020, no. 2, pp. 57–59. <https://www.doi.org/10.36535/0236-1914-2020-02-10>. (In Russ.).
7. Sorochkina I.S., Chislov O.N. *Methods of System Analysis and Simulation in the Work of Industrial Railway Enterprises* // Proceedings of the Rostov State Transport University. 2014, no. 2, pp. 115–120. (In Russ.).
8. Kozlov P.A., Kolokol'nikov V. S., Tushin N.A., Osokin O.V. *On Using Effective Management Models for Transport Flows* // Herald of the Ural State University of Railway Transport. 2019, no. 1, pp. 60–69. <https://www.doi.org/10.20291/2079-0392-2019-1-60-69>. (In Russ.).
9. Say V.M., Kochneva D.I. *Modeling of Assessment of a Region's Need for Container Transportation* // World of Transport and Transportation. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 160–178. (In Russ.).
10. Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. *Dynamic Optimization of Railcar Flows*. Moscow: RuScience. 2017. 110 p. (In Russ.).
11. Muravev D., Hu H., Rakhmangulov A., Mishkurov P. *Multi-agent Optimization of the Intermodal Terminal Main Parameters by Using AnyLogic Simulation Platform: Case Study on the Ningbo-Zhoushan Port* // International Journal of Information Management. 2021, vol. 57, p. 102133. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133>.
12. Li S., Lv H., Xu C., Chen T., Zou C. *Optimized Train Path Selection Method for Daily Freight Train Scheduling* // IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 40777–40790. <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976904>.
13. Moeinaddini A., Shafahi Y., Hasany R. M. *A simulation model for train movements in the rail network* // Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport. 2019, vol. 172, no. 3, pp. 152–163. <https://www.doi.org/10.1680/jtran.16.00082>.
14. Alexandrov A., Bannikov D., Sirina N. *Agent-based Modeling of Service Maintenance and Repair of Rolling Stock* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 403, no. 1, p. 12193. <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012193>.
15. Wang J., Ghanem A., Rakha H., Du J. *A rail transit simulation system for multi-modal energy-efficient routing applications* // International Journal of Sustainable Transportation. 2021, vol. 15, no. 3, pp. 187–202. <https://www.doi.org/10.1080/15568318.2020.1718809>.
16. Joffe A.D., Wiggins M.W. *Cross-task Cue Utilisation and Situational Awareness in Learning to Manage a Simulated Rail Control Task* // Applied ergonomics. 2020, vol. 89, p. 103216. <https://www.doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103216>. (eng).
17. Bažant M., Kavička A., Diviš R., Varga M. *Simulation-Based Rail Traffic Optimizations Applying Multicriterial Evaluations of Variants* // MENDEL. 2019, vol. 25, no. 1, pp. 139–146. <https://www.doi.org/10.13164/mendel.2019.1.139>.
18. Kozlov P.A., Vakulenko S.P., Kolokolnikov V.S. *About Design Intelligent Control Systems for Railway Yards* // Science and Technology in Transport. 2019, no. 2, pp. 70–76. (In Russ.).
19. Kolokolnikov V.S., Slobodyanyuk I.G. *Technology of Polygons Macromodelling* // Transport of the Urals. 2019, no. 3, pp. 48–51. <https://www.doi.org/10.20291/1815-9400-2019-3-48-51>. (In Russ.).
20. Lukyanov V.A., Mishkurov P.N., Kopylova O.A. *The Logistics Model of a Transport Technological System of the Industrial Enterprise* // the Bulletin of Transport Information. 2019, vol. 293, no. 11, pp. 19–30. (In Russ.).
21. Chislov O., Zadorozhnyi V., Lomash D., Chebotareva E., Solop I., Bogachev T. *Methodological Bases of Modeling and Optimization of Transport Processes in the Interaction of Railways and Maritime Transport* // Modern Traffic Engineering in the System Approach to the Development of Traffic Networks: Advances in Intelligent Systems and Computing]. 2020. vol. 1083, Cham: Springer International Publishing, pp. 79–89.
22. Shmulevich M.I., Starikov A.E. *Features of Regulation of Shunting Operations in the Station Simulation Model* // World of Transport and Transportation. 2015, vol. 13, pp. 198–212. (In Russ.).
23. Aleksandrov A.E., Surin A.V., Shipulin A.V. *The Use of Simulations Models In Operational Planning of Train's Operation* // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. 2015, vol. 60, no. 4, pp. 65–72. (In Russ.).
24. Yang Z., Xiang D., Cheng Y. *VR Panoramic Technology in Urban Rail Transit Vehicle Engineering Simulation System* // IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 140673–140681. <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009326>.
25. Khabarov V.I., Krasnikova K.V. *Creating a Simulation Model of Traffic With Using Multi-agent and Discrete Event Approaches by the Example of the West-Siberian Railway Traffic* // Известия Транссиба. 2017, vol. 31, no. 3, pp. 143–154. (In Russ.).
26. Kalinina A.R. *The Development of Technical Junction Stationsimulation Model* // Pacific Rim Countries Transportation System. 2015, vol. 4, no. 2. (In Russ.).
27. Merkulov A.V., Godyaev A.I. *Some Aspects of Simulation Modeling of the Railway Section Infrastructure* // Bulletin of PNU. 2015, vol. 39, no. 4, pp. 109–116. (In Russ.).

28. Wagg D. J., Worden K., Barthorpe R. J., Gardner P. *Digital Twins: State-of-the-Art and Future Directions for Modeling and Simulation in Engineering Dynamics Applications* // ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg. 2020, vol. 6, no. 3. <https://www.doi.org/10.1115/1.4046739>.
29. Gillet B.E., Miller L.E., Johnson J.G. Vehicle dispatching — Sweep algorithm and extensions // *Disaggregation*. 1979. vol. 20, Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 471–483.
30. Baginova V.V., Rakhmangulov A.N., Mishkurov P.N. *Technique of Assessing the Organizational Structure of On-Line Traffic Control on The Railways Belonging to Industrial Enterprises* // *Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection*. 2012, vol. 2, pp. 19–22. (In Russ.).
31. Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N. *Railcar Flow Management in Industrial Transport Systems* // *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013, no. 1, pp. 16–20. <https://www.doi.org/10.6084/m9.figshare.14134568.v1>. (In Russ.).

ISSN 2222-9396 (Print)

УДК 656.073.235:004.942

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-41-53>

МЕТОДИКА РАСЧЁТА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТЕЙНЕРНОГО ДЕПО

Азимов Ф.К.^{1*}, Илесалиев Д.И.¹, Цыганов А.В.²

¹Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент,
Республика Узбекистан

²Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

* E-mail: farruxa@mail.ru

Аннотация. В настоящее время в мировой транспортной системе наблюдается дефицит контейнеров в одних её элементах при одновременном их избытке в других элементах системы. Данная тенденция обосновывает практическую актуальность исследования параметров контейнерных депо, выполняющих функцию складов хранения контейнеров на железнодорожном транспорте. Применяется несколько различных методов и способов определения и расчёта параметров контейнерных терминалов, анализ которых приведён в статье. Однако возникает необходимость в уточнении методики определения параметров контейнерного депо, что обосновывает теоретическую актуальность исследования. Целью работы является разработка методики расчёта рациональных значений параметров контейнерного депо на основе системного анализа и обобщения существующих методов и способов расчёта вместимости складов на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: контейнер, контейнерное депо, погрузочно-разгрузочная машина, математическая модель, методика расчёта

© Азимов Ф.К., Илесалиев Д.И., Цыганов А.В., 2021

Поступила: 08 декабря 2020 г.; Принята к публикации: 11 ноября 2021 г.; Опубликована: 30 декабря 2021 г.

Для цитирования:

Азимов Ф.К., Илесалиев Д.И., Цыганов А.В. Методика расчёта рациональных параметров контейнерного депо // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2021. Т.11. №1. С. 41-53.
<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-41-53>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ISSN 2222-9396 (Print)

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-41-53>



METHODOLOGY FOR CALCULATING THE RATIONAL PARAMETERS OF A CONTAINER DEPOT

Azimov F.K.^{1*}, Ilesaliev D.I.¹, Tsyganov A.V.²

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

* E-mail: farruxa@mail.ru

Abstract. Currently, in the world transport system, there is a shortage of containers in some of its elements, and in others - their excess. This tendency substantiates the practical relevance of the study of the parameters of container depots that serve as warehouses for storing containers on railway transport. Several different techniques and methods for determining and calculating the parameters of container terminals are used, the analysis of which is given in the article. However, there is a need to clarify the existing methods for determining the parameters of a container depot, which justifies the theoretical relevance of the study. The aim of the work is to develop a methodology for calculating rational values of the parameters of a container depot based on a system analysis and generalization of existing methods and methods for calculating the capacity of warehouses on railway transport.

Keywords: container, container depot, loading and unloading machine, mathematical model, calculation method

© Azimov F.K., Ilesaliev D.I., Tsyganov A.V., 2021

Received: December 08, 2020; Accepted: November 11, 2021; Published: December 30, 2021

For citation:

Azimov F.K., Ilesaliev D.I., Tsyganov A.V. Methodology for Calculating the Rational Parameters of a Container Depot // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2021, vol.11, no.1, pp. 41-53. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2021-11-1-41-53>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

В настоящее время наблюдается увеличение объёмов перевозок грузов в контейнерах, однако данная тенденция не отражается на уровне контейнеризации в Узбекистане. В большей степени это вызвано дефицитом контейнеров на рынке грузовых перевозок, а также малым количеством логистических объектов и незначительной долей транзитных перевозок по территории Узбекистана. Например, парк контейнеров основного оператора страны АО «Узтемирйулконтейнер», составляет менее 1000 единиц в двадцатифутовом эквиваленте (ДФЭ). Решение данной проблемы авторы видят путём организации контейнерных депо, которые повысят уровень обслуживания клиентов железнодорожного транспорта и транспортной сети в целом.

2. Краткое описание исследования

Современные грузовые терминальные комплексы представляют собой сложные технические объекты. В данном исследовании в качестве основной методологической базы для изучения контейнерного депо использован системный анализ технического объекта. Согласно которого контейнерное депо рассматривается как техническая система, состоящая из элементов, в качестве которых выступают технологические участки депо. Функционирование участков подчиняется общей цели эффективного накопления и хранения порожних контейнеров на территории депо. В связи с этим в данном исследовании поставлены следующие задачи:

- проанализировать существующие методы определения вместимости контейнерных площадок;
- произвести структурно-параметрическое описание контейнерного депо;
- определить взаимосвязь вместимости контейнерного депо с основными и производными параметрами депо;
- выполнить сравнительный анализ основных параметров погрузочно-разгрузочных машин для переработки и штабелирования контейнеров;
- разработать математическую модель определения параметров контейнерного депо.

3. Обзор научных исследований, посвящённых расчёту вместимости контейнерных площадок

В работе [1] авторами проведён анализ характеристики контейнерной площадки – вместимости зоны хранения контейнерного терминала. Определение значения вместимости зоны хранения осуществлено с использованием вероятностно-статистических методов, инструментов имитационного моделирования, моделей «рождения и гибели» теории массового обслуживания. Построены зависимости интегральной функции распределения от числа хранящихся на складе контейнеров, позволяющие определить вместимость зоны хранения с заданной вероятностью. Авторы исследования описывают функционирование рассматриваемой системы массового обслуживания процессом «рождения и гибели». Финальные вероят-

ности находятся по формулам

при $k \leq n$

$$P(q_k) = \frac{\lambda}{k\mu} \cdot \frac{\lambda}{(k-1)\mu} \dots \frac{\lambda}{\mu} P_0 = \frac{\lambda^k}{\mu^k k!} P_0;$$

при $k \geq n$

$$P(q_k) = \frac{\lambda}{k\mu} \cdot \frac{\lambda}{(k-1)\mu} \dots \frac{\lambda}{\mu} P_0 = \frac{\lambda^k}{\mu^k k!} P_0,$$

где λ – интенсивность входящего потока; k – число занятых мест зоны хранения в q -ом состоянии; n – общее число мест в зоне хранения; μ – интенсивность выходящего потока.

В работе [2] проведено сравнение трёх методик оценки требуемой вместимости склада при технологическом проектировании контейнерных терминалов: через сравнительные величины, по стохастическому методу и методом сценариев. Методика позволяет путём комплексного использования рассмотренных методов с последовательным сравнением результатов и учётом границ применимости каждого метода значительно снизить ошибки проектирования контейнерных терминалов.

В статье [3] приводится краткий анализ научных исследований технологической операции погрузки-выгрузки контейнеров. Автором предложено определять вместимость контейнерного терминала $\sum R$, конт. по следующей формуле

$$\sum R = x \cdot y \cdot z, \quad (1)$$

где x – количество контейнеров, размещаемых по ширине участка хранения терминала, конт.; y – количество контейнеров, размещаемых по длине участка хранения терминала, конт.; z – количество контейнеров по высоте штабелирования, конт.

Приводятся варианты схем расположения технологических участков терминала, оснащённых козловым контейнерным краном. Автор считает, что контейнерные козловые краны эффективно использовать при различных вариантах расположения технологических участков терминала, так как сравнительная простота конструкции по сравнению с другими подъёмно-транспортными машинами выступает основным преимуществом козловых кранов на грузовом терминале.

В исследовании [4] разработан алгоритм определения вместимости контейнерной площадки. Аналитически определено число контейнеров, размещаемых по длине и ширине участка хранения, обслуживаемого порталными автопогрузчиками. Количество контейнеров, размещаемых по длине x , конт. и ширине y , конт. участка хранения определяется соответственно по следующим формулам

$$x = \varepsilon \left\{ \frac{B - l_{np} \cdot n_{np}}{4,3} \right\}, \quad (2)$$

где B – ширина участка хранения контейнеров, м; n_{np} – число боковых проходов вдоль площадки (с двух сторон); l_{np} – ширина продольных проездов, м, (для

автотранспорта вдоль участка хранения контейнеров); 4,3 – округлённая ширина одного продольного ряда, м; $\varepsilon\{\dots\}$ – обозначение целой части числа, получающегося в результате выполнения действий в фигурных скобках;

$$y = \varepsilon \left\{ \frac{L - e \cdot l_{\text{вых}}}{6,3} \right\}, \quad (3)$$

где $l_{\text{вых}}$ – расстояние по длине участка хранения, (на выход портального автопогрузчика из зоны складирования с 40-футовым контейнером (проходы устанавливаются в каждом торце участка)); e – число торцов участка хранения контейнеров; L – длина участка хранения контейнеров, м;

Получен график вместимости площадки в зависимости от числа контейнеров, размещаемых по высоте, а также рассчитаны объёмы переработки контейнеропотока в зависимости от периода оборачиваемости контейнеров.

В статье [5] представлены преимущества и недостатки, а также технические характеристики козлового портального пневмоколесного крана. Произведён краткий научный анализ в области исследования технического оснащения контейнерных терминалов. Предложена математическая модель взаимосвязи параметров крана, контейнера и грузового терминала.

В работе [6] исследуются вопросы совершенствования поиска рациональных значений параметров контейнерного терминала. Предложены математические модели взаимосвязи основных значений параметров участка хранения контейнерного терминала, оборудованного ричстакером компании Kalmar. Приведены зависимости вместимости площадки от длины участка хранения. Также в исследовании приводятся результаты расчёта перерабатывающей способности контейнерного терминала.

Исследование параметров участка основного хранения контейнерного терминала отражено в работе [7], где сравниваются подъёмно-транспортные машины между собой с позиции вместимости участка хранения. Получены результаты, позволяющие оценить пропускную способность терминала в зависимости от технической оснащённости площадки и срока хранения контейнеров.

В работе [8] рассмотрен подход к определению минимальной необходимой вместимости склада «сухого» порта для обработки заданного грузопотока. Методологическая основа исследования базируется на формализации взаимодействия морского терминала и «сухого» порта. Рассмотрены составляющие элементы контейнерного склада «сухого» порта и определен порядок расчёта его основных параметров – объём контейнерного склада и площадь каждой из площадок для импортных грузов, экспортных грузов и порожних контейнеров. В работе приведена методика нахождения минимальных значений параметров контейнерного склада, обеспечивающих выполнение функций «сухого» порта при заданной пропускной способности и переменных значениях входящих грузопотоков.

В работе [9] рассмотрены особенности мировой портовой инфраструктуры. Произведены расчёты капитальных затрат на строительство контейнерного терминала, общей потребности в контейнеро-местах для грузовых терминалов и суммарной длины площадки.

Авторы работы [10] совершенствуют методику определения рациональных значений параметров контейнерного терминала. Предложены математические модели взаимосвязи основных значений параметров участков хранения контейнерного терминала, оборудованного ричстакером компании Kalmar. Приведены зависимости вместимости площадки от длины участка хранения. Также в исследовании приводятся результаты перерабатывающей способности контейнерного терминала за год.

В работе [11] рассмотрены проблемы увеличения пропускной и перерабатывающей способностей морских контейнерных терминалов, а также меры повышения своевременности грузовых перевозок на основе создания «сухих» портов. Разработана система параметров «сухого» порта, позволяющая выбрать стратегию развития морского контейнерного терминала в условиях роста грузооборота, выполнить оценку затрат системы «морской порт – «сухой» порт». Предложена методика расчёта оптимальных значений основных параметров «сухого» порта с использованием имитационного моделирования в программной среде AnyLogic.

Статья [12] посвящена проблеме автоматизированного планирования грузовых работ на железной дороге контейнерного терминала. Автор определяет основные виды работ, которые происходят в процессе выгрузки и погрузки контейнеров. Статья содержит описание метода решения задачи формирования комплекта контейнеров для отгрузки на железнодорожный вагон.

Работа [13] посвящена развитию методов технологического проектирования морских контейнерных портов и терминалов с точки зрения уточнения представлений о проектируемом объекте и ужесточения требований к его технико-эксплуатационным характеристикам.

В работе [14] контейнерный терминал рассматривается как сложная техническая система. В основе методики исследования используются положения марковских случайных процессов. Приводится результирующий вид графа состояний контейнерного терминала, а также пример метода определения количества штабелёров. Сделан вывод, что модели состояния на основе цепей Маркова для описания работы контейнерных терминалов позволяют оценивать загруженность погрузочно-разгрузочных участков для автомобильного и железнодорожного транспорта, а также для участков временного и основного хранения.

В работе [15] предложено нахождение оптимальной высоты складирования контейнеров через сопоставление операционных затрат и стоимости площади контейнерной площадки.

Авторами работы [16] решена задача проектирования склада тарно-штучных грузов по критерию наилучшего способа складирования грузов при задаваемых ограничениях наиболее полного заполнения площади склада грузами и минимальных затратах на перемещение груза внутри склада. В исследовании предложены математические модели, устанавливающие взаимосвязи между отдельными параметрами склада тарно-штучных грузов. Модели использованы при исследовании взаимовлияния параметров, также определения вместимости складов тарно-штучных грузов.

В работе [17] анализируются преимущества и недостатки контейнерных перевозок, выявлен уровень контейнеризации и его влияние на организацию перевозок грузов через создание системы контейнерных терминалов. Обозначена степень влияния уровня контейнеризации грузов на сокращение срока доставки грузов железнодорожным транспортом.

В работе [18] приводится методика оптимизации мест хранения порожних контейнеров при вероятностном объёме их потребления в заданном временном периоде.

В [19] анализируется производительность погрузочно-разгрузочных операций на складе порожних контейнеров, а также схемы штабелирования контейнеров и компоновки депо с целью сокращения времени оборота грузовиков.

В работе [20] приведена математическая модель перемещения порожних контейнеров в пределах региона их использования.

Авторами работы [21] представлена процессная имитационная модель, позволяющая рассчитывать вместимость терминала, численность парка транспортных средств и порядок их обновления для различных условий.

В работе [22] представлено сравнение грузоподъёмности контейнеров на основе различных систем обработки, размеров площадок и характеристик кранов для выбора погрузочно-разгрузочной техники и местоположения контейнерной площадки.

Авторы [23] приводят модель организации очереди для анализа загруженности ворот морского терминала и количественной оценки стоимости ожидания грузовиков, осуществляющих портовые грузоперевозки.

В [24] разработана аналитико-имитационная модель для исследования задержек поездов при различных способах обслуживания. Результаты моделирования используются для поиска оптимального баланса стоимости задержек поездов и отклонения от желаемого уровня качества транспортного обслуживания.

Анализ представленных работ показывает степень изученности задачи определения вместимости контейнерных терминалов, интерес к уровню контейнеризации перевозок в целом. Однако эти исследования не касались вопросов определения параметров контейнерных депо. Недостаточно проработанными остаются вопросы определения и расчёта: численности обменного парка контейнеров всех типов, кото-

рый должен находиться в депо или на терминале в пунктах зарождения основных грузопотоков; параметров пунктов промывки-пропарки контейнеров после выгрузки для соответствия требованиям к перевозкам грузов различной номенклатуры; характеристик пунктов диагностики и ремонта контейнеров. Решение данных вопросов необходимо для эффективной организации контейнерных перевозок в Узбекистане.

4. Структурно-параметрическое описание контейнерного депо

С позиции системного подхода авторами настоящей статьи контейнерное депо рассматривается как сложная техническая система, состоящая из трёх элементов: участка хранения порожних контейнеров, автомобильного погрузочно-разгрузочного участка (фронта) и железнодорожного погрузочно-разгрузочного участка (фронта). Технологическая структура контейнерного депо представлена на **рис. 1**. Задача параметрического описания контейнерного депо сводится к содержательному описанию, математическому выражению и выводу формул для расчёта параметров депо.

Контейнерное депо характеризуется следующими основными параметрами: L – длина контейнерного депо, м; L_x – длина участка хранения порожних контейнеров, м; L_1 – часть длины контейнерного депо, занимаемая поперечными проездами для автотранспорта, м; L_2 – часть длины контейнерного депо, занимаемая административно-бытовым комплексом и ремонтными хозяйствами, м; L_3 – ширина газонов вдоль ограждения забора, м; B – ширина контейнерного депо, м; B_x – ширина участка хранения порожних контейнеров, м; B_1 – часть контейнерного депо, отведённая на железнодорожный погрузочно-разгрузочный участок, а также на выставочный путь, м; B_2 – часть контейнерного депо, отведённая на двухполосную автомобильную дорогу, м; B_3 – ширина газонов вдоль ограждения забора, м; A – ширина проезда для погрузочно-разгрузочной машины, м; $l_{жс}$ – длина железнодорожного погрузочно-разгрузочного участка, м; $l_{фр}$ – длина фронта, м; $l_{выс}$ – длина выставочного пути, м; λ – технологический зазор между контейнерами, расположенный по длине участка хранения, м; ω – технологический зазор между контейнерами, расположенный по ширине участка хранения, м.

Основными параметрами контейнера и контейнеропотока приняты: l – длина контейнера, м; b – ширина контейнера, м; h – высота контейнера, м; $N_{год}$ – годовой контейнеропоток, ДФЭ/год; $N_{мес}$ – месячный контейнеропоток, ДФЭ/мес.; $N_{сут}$ – суточный контейнеропоток, ДФЭ/сут.; N_a – годовой контейнеропоток по прибытию и отправлению по автомобильному транспорту, ДФЭ/год; $N_{жс}$ – годовой контейнеропоток по прибытию и отправлению по железнодорожному транспорту, ДФЭ/год.

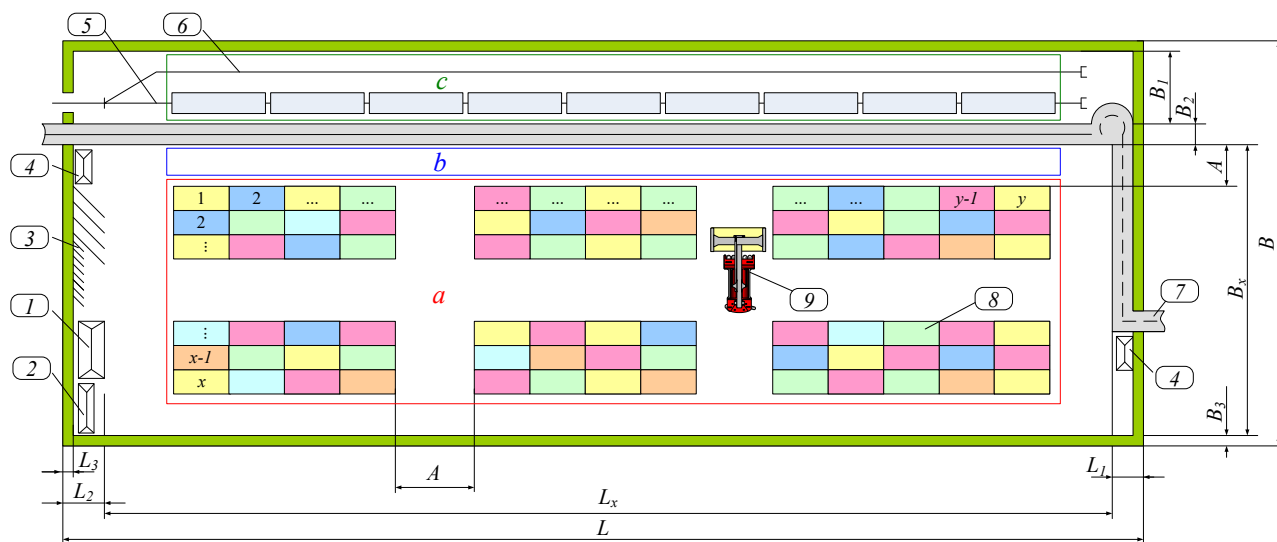


Рис. 1. Схема контейнерного депо: а) участок хранения порожних контейнеров; б) автомобильный погрузочно-разгрузочный участок (фронт); в) железнодорожный погрузочно-разгрузочный участок (фронт): 1 – административно-бытовой комплекс; 2 – ремонтная мастерская; 3 – стоянка для легковых и большегрузных автомобилей; 4 – контрольно-пропускной пункт; 5 – железнодорожный погрузочно-разгрузочный участок; 6 – выставочный путь; 7 – двухполосная автомобильная дорога; 8 – штабель порожних контейнеров; 9 – погрузочно-разгрузочная машина

Fig. 1. Container depot layout: а) empty containers storage area; б) automobile loading and unloading area (front); в) railway loading and unloading area (front): 1 - administrative complex; 2 - repair shop; 3 - parking for cars and heavy vehicles; 4 - checkpoint; 5 - railway loading and unloading area; 6 - track for set out of train; 7 - two-lane road; 8 - a stack of empty containers; 9 - loading and unloading machine

К временным параметрам относятся: T – количество рабочих дней в году, сут.; $t_{мес}$ – количество рабочих дней в месяце, сут.; $t_{см}$ – количество часов в смене, час.; τ – срок хранения порожних контейнеров, сут.; t_{nc} – время на погрузку или разгрузку одного подвижного состава, час.; $t_{ног}$ – время на погрузку одного контейнера, час.; $t_{разг}$ – время на разгрузку одного контейнера, час.; $t_{ц}$ – время рабочего цикла, мин.; $k_{жс}$ – коэффициент неравномерности прибытия и отправления железнодорожным транспортом; k_a – коэффициент неравномерности прибытия и отправления автомобильным транспортом.

К производным параметрам, рассчитываемым исходя из значений основных параметров, отнесены: S – площадь занимаемая контейнерным депо, м²; S_x – площадь участка хранения порожних контейнеров, м²; R – ёмкость контейнерного депо, конт.; x – количество порожних контейнеров по ширине участка хранения, конт.; y – количество порожних контейнеров по длине участка хранения, конт.; z – количество штабелируемых порожних контейнеров по высоте, конт.; n_1 – число продольных проходов; n_2 – число поперечных проходов; E – перерабатывающая способность контейнерного депо, конт./год; η – оборачиваемость контейнеров, 1/год; $t_{конт}$ – время, затрачиваемое на одну технологическую операцию с контейнером, час.; $n_{ваг}$ – количество вагонов по прибытию и отправлению, ваг./сут.; $N_{конт}$ – количество контейнеров по прибытию и отправлению, конт./сут.; k_x – коэффициент использования участка хранения по ширине; k_y –

коэффициент использования участка хранения по длине; $n_{жс}$ – количество железнодорожных путей; n_a – количество полос для движения автотранспорта; m_a – количество мест погрузки и разгрузки большегрузных автомобилей; m_c – количество автостоянок для большегрузных автомобилей; n_n – количество подач групп вагонов, под./сут.; $N_{под}$ – количество контейнеров в подаче, конт./под.; m_v – количество вагонов в подаче, ваг./под.; r – потребное количество погрузочно-разгрузочных машин, шт.; u – число контейнеров в подвижном составе, конт.; $u_{конт}$ – число контейнеров в вагоне, конт.; p – потребный штат работников контейнерного депо, чел.

Взаимосвязь величины вместимости контейнерного депо с основными и производными параметрами депо приведена на рис.2. На рис.2 использованы следующие сокращения: АБК – административно-бытовой комплекс; ПРМ – погрузочно-разгрузочная машина; ЖД ПРУ – железнодорожный погрузочно-разгрузочный участок (фронт).

5. Сравнительный анализ основных параметров погрузочно-разгрузочных машин

По мнению авторов работы, преимущества автопогрузчиков по сравнению с использованием козловых кранов заключается в следующем [25]: простота и короткие сроки ввода в эксплуатацию контейнерного депо, отсутствие подкрановых путей, возможность штабелирования контейнеров выше трёх ярусов и др.

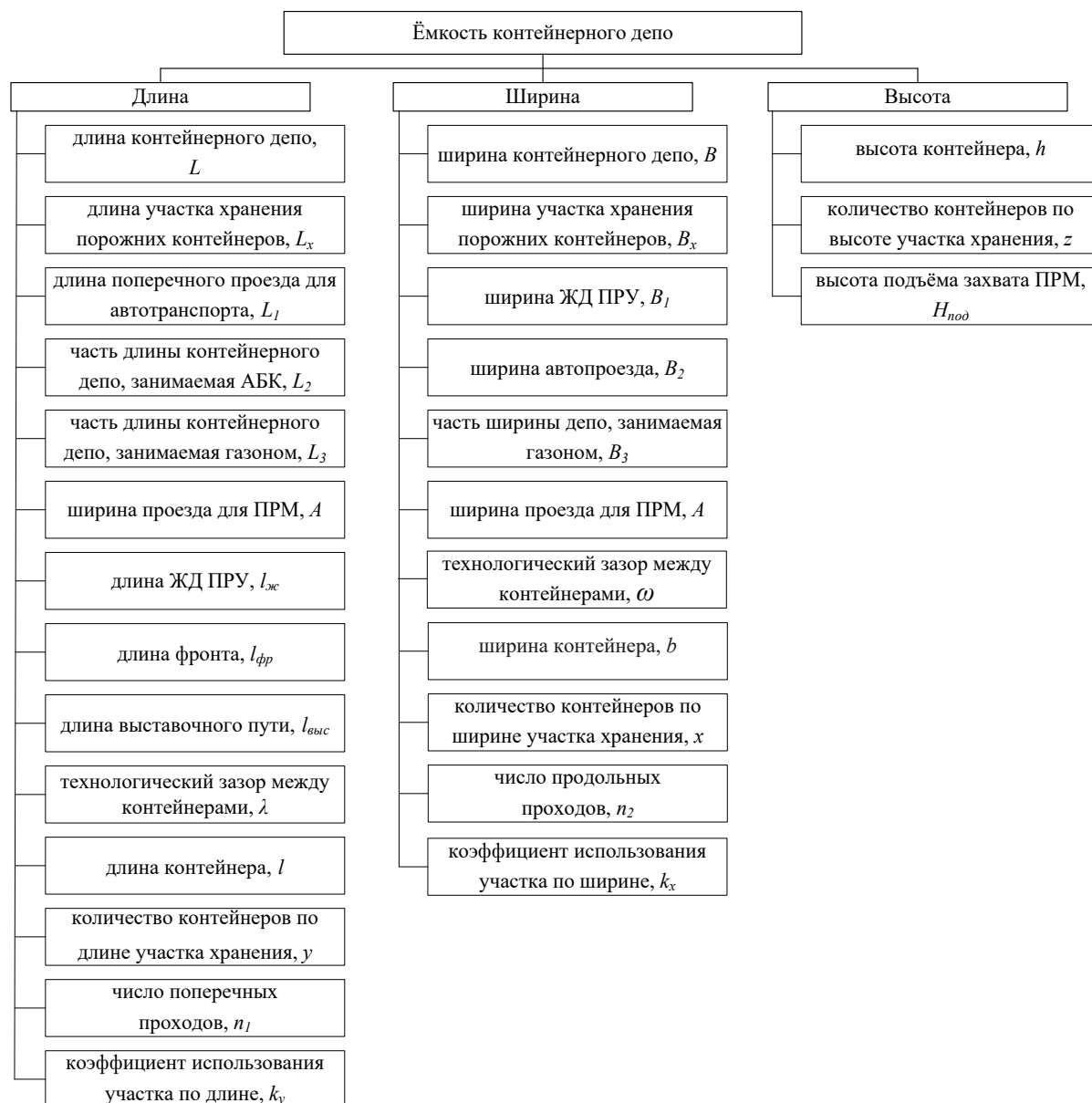


Рис. 2. Параметры, определяющие вместимость (ёмкость) контейнерного депо
 Fig. 2. Parameters of the container depot capacity

Перечисленные преимущества стали решающими для рекомендации данных типов погрузочно-разгрузочных машин в контейнерном депо.

Виды и типы погрузочно-разгрузочных машин связаны с компоновкой генерального плана депо и зависят от типа перерабатываемых контейнеров. На рис. 3–6 показаны контейнерные автопогрузчики различных типов и моделей.

Наибольшее распространение в контейнерных терминалах получили автопогрузчики с выдвижной крановой стрелой (Reachstacker) (рис.3).

Контейнерный автопогрузчик с боковым спрейдерным захватом (Doublestacker) имеет возможность штабелировать сразу два порожних контейнера (рис.4). Техническая производительность данной погрузочно-разгрузочной машины может значительно

превышать производительность других моделей автопогрузчиков.

Контейнерный автопогрузчик с вилочным захватом (Lifttrucks) является универсальной погрузочно-разгрузочной машиной (рис.5). Специальные грузозахватные приспособления вилочного автопогрузчика позволяют производить погрузочно-разгрузочные работы внутри контейнера.

Также в терминалах применяются контейнерные автопогрузчики с верхним спрейдерным захватом (Top-lifthandler) (рис.6).

Основные технико-технологические параметры распространённых моделей контейнерных автопогрузчиков приведены в табл. 1.

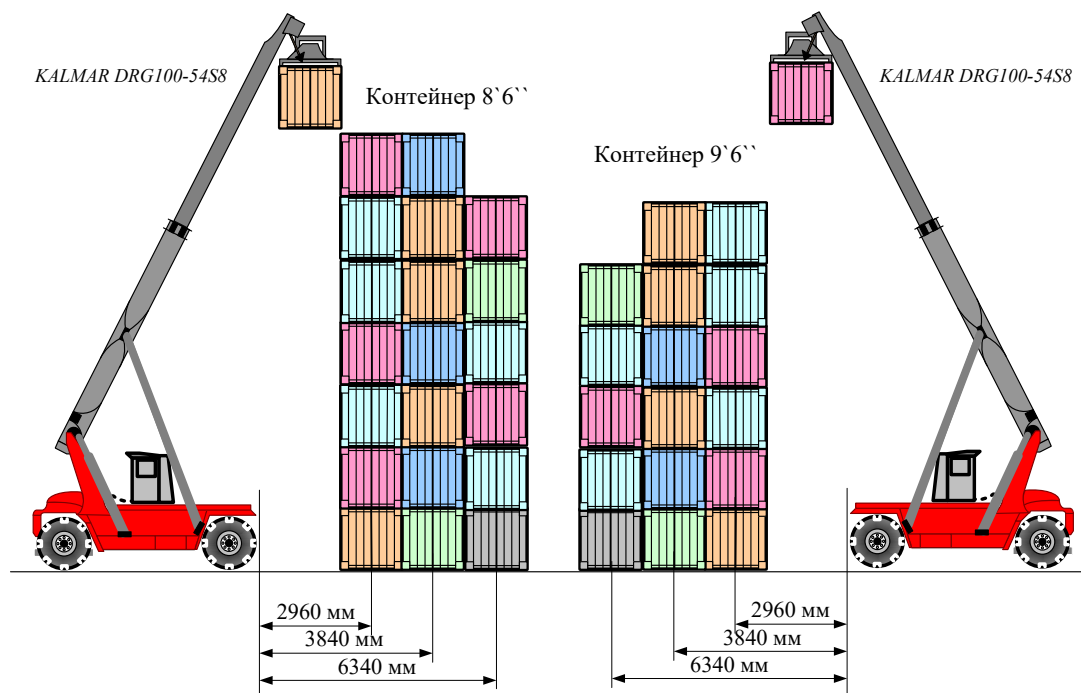


Рис. 3. Контейнерный автопогрузчик с выдвижной крановой стрелой (Reachstacker)
Fig. 3. Reachstacker Container Forklift

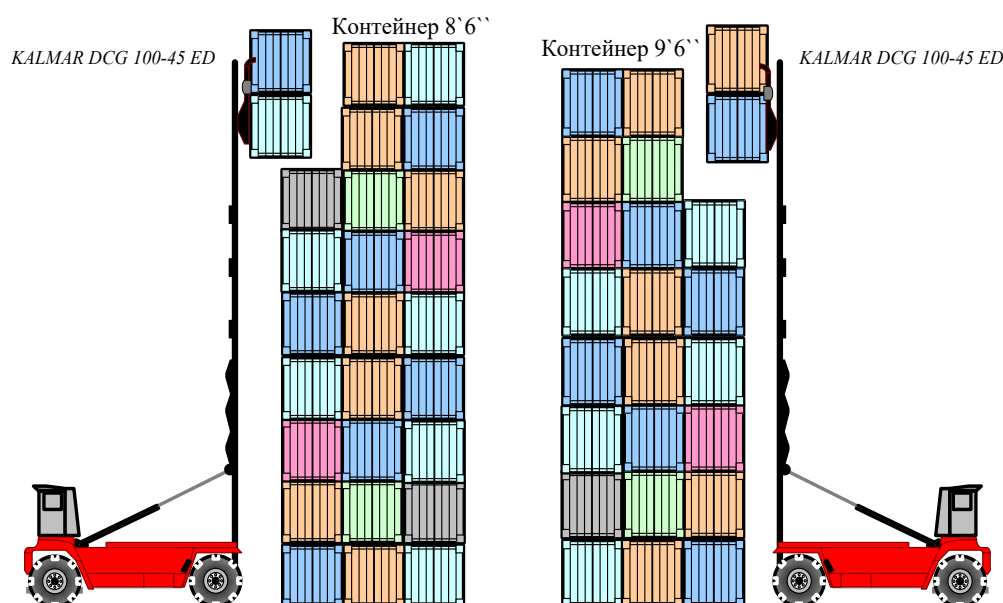


Рис. 4. Контейнерный автопогрузчик с боковым спрейдным захватом (Doublestacker)
Fig. 4. Side Spray Gripper Container Forklift (Doublestacker)

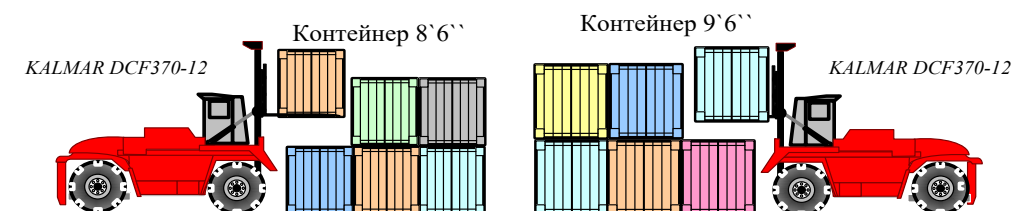


Рис. 5. Контейнерный автопогрузчик с вилочным захватом (Lifttrucks)
Fig. 5. Container Forklift Truck (Lifttrucks)

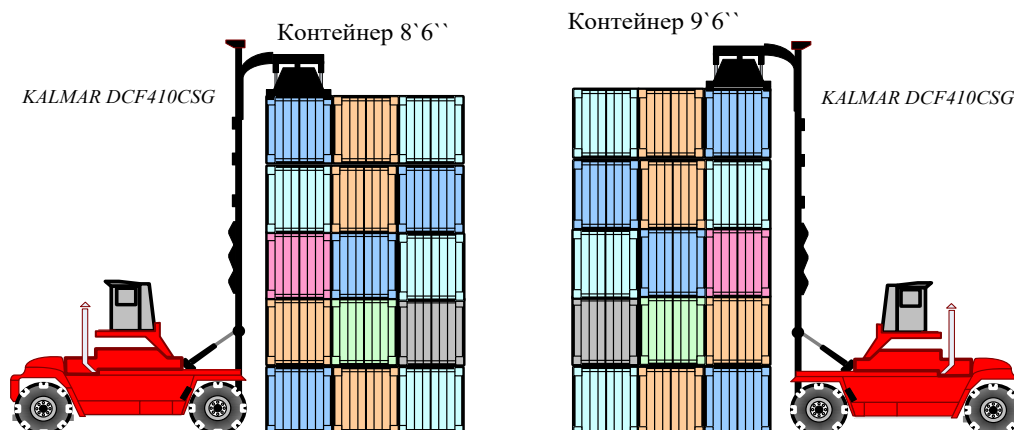


Рис. 6. Контейнерный автопогрузчик с верхним спрейдерным захватом (Top-lifthandler)

Fig. 6. Top-lifthandler container forklift

Таблица 1. Характеристики автопогрузчиков для переработки контейнеров

Table 1. Characteristics of container handling forklift trucks

Параметр автопогрузчика	Модель автопогрузчика			
	<i>Reachstacker</i> <i>DRG100-54S8</i>	<i>Doublestacker</i> <i>DCG 100-45 ED</i>	<i>Lifttrucks</i> <i>DCF370-12</i>	<i>Top-lifthandler</i> <i>DCF410CSG</i>
Снаряжённая масса, т	40.30	44.50	50.10	69.75
Грузоподъёмность, в зависимости от ряда, т				
1 ряд	10.0	22.0	37.0	41.0
2 ряд	8.0	-	-	-
3 ряд	4.5	-	-	-
Высота штабелирования контейнеров, м				
контейнер 8'6''	8	9	2	5
контейнер 9'6''	7	8	2	5
Ширина проезда, мм				
контейнер 20 ft	11200	10846	10795	11990
контейнер 40 ft	14200	14326	10795	14680
Скорость подъёма, м/с				
с контейнером	0.50	0.65	0.35	0.42
без контейнера	0.42	0.59	0.25	0.25
Скорость опускания, м/с				
с контейнером	0.42	0.54	0.25	0.31
без контейнера	0.48	0.59	0.40	0.36
Скорость перемещения, м/с				
передним ходом/задним ходом	8.3/8.3	6.9/6.9	7.2/7.2	7.2/7.2
с контейнером/без контейнера	8.3/8.3	6.9/6.9	6.6/6.6	6.4/6.4

6. Математическая модель расчёта параметров контейнерного депо

Методика расчёта рациональных значений параметров контейнерного депо основана на использовании приведённых в разделе 3 формул (1–3) и перечисленных в разделе 4 параметров контейнерного депо.

Вместимость контейнерного депо R_i определяется целевой функцией, максимизирующей количество контейнеров

$$R_i = x \cdot y \cdot z \rightarrow \max \quad (4)$$

где x – количество контейнеров, размещаемых по

ширине участка хранения порожних контейнеров; y – количество контейнеров, размещаемых по длине участка хранения порожних контейнеров; z – количество контейнеров по высоте штабелирования.

Количество контейнеров, размещаемых по ширине участка хранения порожних контейнеров x , конт., определяется по формуле

$$x = \varepsilon \left\{ \frac{B_x - n_2 \cdot A}{b + \omega} \right\}, \quad (5)$$

где $\varepsilon\{\dots\}$ – обозначение целой части числа, округляется в меньшую сторону; B_x – полезная ширина контейнерного депо, м; n_2 – число продольных проез-

дов.

Полезная ширина контейнерного депо B_x , м (ширина участка хранения порожних контейнеров) определяется по формуле

$$B_x = B - B_1 - B_2 - B_3. \quad (6)$$

Число продольных проездов n_2 , зависящее от количества контейнеров, устанавливаемых по ширине штабеля x_l , определяется по формуле

$$n_2 = \varepsilon \left\{ \frac{B_x - (b + \omega) \cdot x_l - A}{2 \cdot (b + \omega) \cdot x_l + A} \right\} + 1, \quad (7)$$

где 1 – продольный проезд вдоль железнодорожного пути.

Количество контейнеров, размещаемых по длине участка хранения порожних контейнеров y , конт., определяется по формуле

$$y = \varepsilon \left\{ \frac{L_x - n_1 \cdot A}{l + \lambda} \right\}, \quad (8)$$

где $\varepsilon\{\dots\}$ – обозначение целой части числа, округляется в меньшую сторону; L_x – полезная длина контейнерного депо, м (длина участка хранения порожних контейнеров); n_1 – число поперечных проездов.

Полезная длина контейнерного депо L_x , м (длина участка хранения порожних контейнеров) определяется по формуле

$$L_x = L - L_1 - L_2 - L_3. \quad (9)$$

Число поперечных проездов n_1 определяется по формуле

$$n_1 = \varepsilon \left\{ \frac{L_x}{80} \right\}, \quad (10)$$

где 80 – примерная длина, через которую устанавливаются поперечные проезды для автопогрузчиков, м.

Количество вагонов (фитинговых платформ) в подаче m_e , ваг./под. определяется исходя из суточного контейнеропотока по формуле

$$m_e = \xi \left\{ \frac{N_{\text{год}} \cdot k_{\text{жс}}}{365 \cdot u_{\text{конт}} \cdot x_n} \right\}, \quad (11)$$

где $\xi\{\dots\}$ – обозначение целой части числа, округляется в большую сторону.

Потребное количество погрузочно-разгрузочных машин (автопогрузчиков) r , шт. определяется по формуле

$$r = \xi \left\{ \frac{N_{\text{сут}} \cdot k_{\text{конт}} \cdot N_{\text{пер}} \cdot t_{\text{ц}}}{t_{\text{см}} \cdot 60} \right\}, \quad (12)$$

где $\xi\{\dots\}$ – обозначение целой части числа, округляется в большую сторону; 60 – число минут в часе.

7. Результаты расчётов

Разработанная математическая модель параметров контейнерного депо была использована для расчёта вместимости участка хранения порожних контейнеров, обслуживаемого различными погрузоч-

но-разгрузочными машинами (автопогрузчиками). Авторы полагают, что величина вместимости контейнерного депо имеет непостоянное (переменное) значение, зависящее от количества контейнеров, устанавливаемых по ширине штабеля x_l , длины участка хранения y (длины площадки), а также технико-технологических характеристик автопогрузчиков. В качестве расчётных моделей использованы контейнерные автопогрузчики, приведённые в табл. 1 раздела 5. Результаты расчёта вместимости контейнерного депо представлены на рис.7-10.

Анализ результатов расчётов вместимости контейнерного депо подтверждает выдвинутое авторами предположение о вариативности значения данного параметра. При этом установлено, что рассмотренные параметры депо оказывают разную степень влияния.

Вместимость контейнерного депо в наибольшей степени зависит от технико-технологических характеристик погрузочно-разгрузочных машин, осуществляющих переработку и штабелирование контейнеров. Для рассмотренных моделей автопогрузчиков вместимость депо отличается в 4.17–4.45 раза при равной полезной ширине и длине депо.

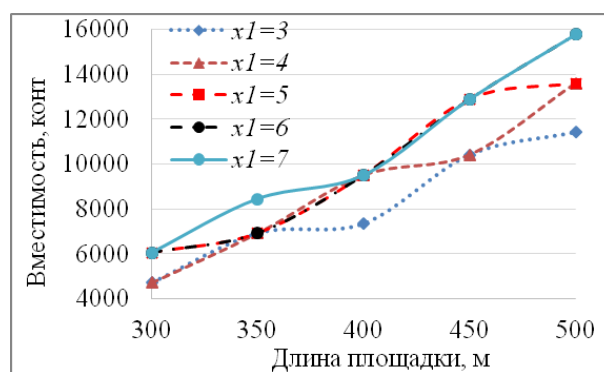


Рис. 7. Вместимость контейнерного депо, обслуживаемого автопогрузчиком с выдвинутой крановой стрелой (Reachstacker)

Fig. 7. Container depot capacity with Reachstacker

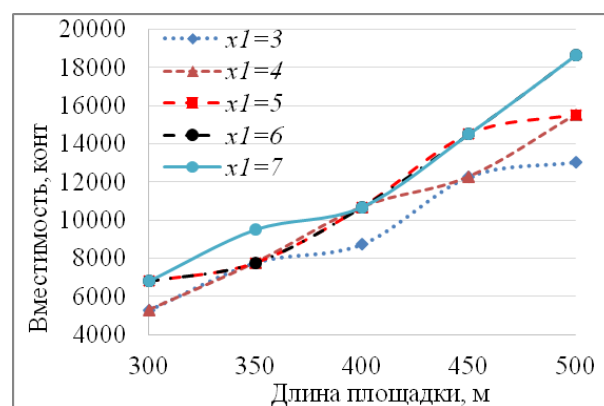


Рис. 8. Вместимость контейнерного депо, обслуживаемого автопогрузчиком с боковым спрейдерным захватом (Doublestacker)

Fig. 8. Container depot capacity with Doublestacker

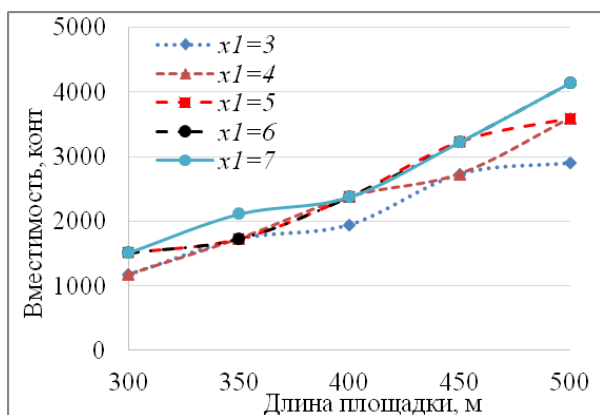


Рис. 9. Вместимость контейнерного депо, обслуживаемого автопогрузчиком с вилочным захватом (Lifttrucks)

Fig. 9. Container depot capacity with Lifttrucks

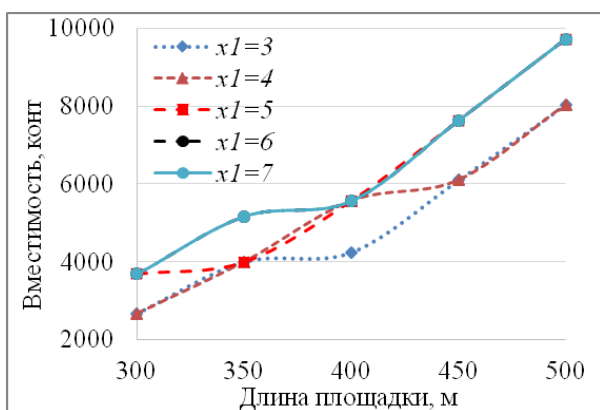


Рис. 10. Вместимость контейнерного депо, обслуживаемого автопогрузчиком с верхним спрейдерным захватом (Top-lifthandler)

Fig. 10. Container depot capacity with Lifttrucks Top-lifthandler

Вместимость контейнерного депо также пропорционально зависит от длины участка хранения порожних контейнеров. При изменении длины моделируемого участка хранения от 300 до 500 м вместимость депо возрастает в 3.31–3.74 раза.

Наименьшее влияние на вместимость контейнерного депо оказывает количество контейнеров, устанавливаемых по ширине штабеля. Вместимость депо различается в 1.21–1.45 раза. Более того, в ряде случаев увеличение ширины штабеля не оказывает влияния на изменение величины вместимости депо.

8. Заключение

Разработка и совершенствование методик определения и расчёта значений технико-технологических параметров контейнерных терминалов и их структурных элементов – контейнерных депо является актуальной задачей, направленной на повышение качества транспортных услуг.

В статье представлена методика, уточняющая расчёт значения одного из основных параметров контейнерного депо – вместимости депо. Определено влияние на величину вместимости депо трёх параметров: ширины штабеля контейнеров, длины участка хранения контейнеров, а также технико-технологических характеристик погрузочно-разгрузочных машин, осуществляющих переработку и штабелирование контейнеров.

Перспективным направлением дальнейшего исследования, по мнению авторов, является определение влияния на величину вместимости депо прочих параметров контейнерного депо, приведённых и систематизированных в данной работе.

Список литературы

1. Лубенцова В. С., Lubentcova V. S., Ефремов А. В., Efremov A. V. Решение задачи определения вместимости контейнерного терминала с использованием модели “гибели и рождения” // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». 2005. Т. 38. С. 155-158. <https://www.doi.org/10.14498/vsgtu393>.
2. Кузнецов А., Козлова Е. Сравнение различных методик оценки требуемой вместимости склада при технологическом проектировании контейнерных терминалов // Эксплуатация морского транспорта. 2008. Т. 54. № 4. С. 9-14.
3. Абдувахитов Ш. Методика определения вместимости контейнерного терминала оборудованной козловым краном // Вестник КемРИПК. 2018. № 4. С. 41-52.
4. Abduvahitov S., Makhmatkulov S., Dehkonov M. Technique for Determining the Capacity of a Container Terminal Served by a Straddle Carrier // Nauchno-tehnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2018. Т. 4. № 4. С. 405-415. <https://www.doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-405-416>.
5. Абдувахитов Ш., Махматкулов Ш., Икрамова Д. Методика определения вместимости контейнерного терминала, оборудованного козловым порталным пневмоколесным краном // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2018. Т. 16. № 3. С. 11-15.
6. Rasulov M. X., Abduvahitov S. R., Ilesaliev D. I. Defining the capacity of the container terminal served by a reach staker // Innотrans. 2019. № 1. С. 35-39. <https://www.doi.org/10.20291/2311-164X-2019-1-35-39>.
7. Rasulov M. X., Abduvahitov S. R., Ilesaliev D. I., Ismatullaev A. F. Investigation of container terminal main storage section parameters // Innотrans. 2019. № 2. С. 31-37. <https://www.doi.org/10.20291/2311-164X-2019-2-31-37>.
8. Zhiliaev D. E. Determination of Minimum Necessary Storage Capacity of a Dry Port Container Yard With a

Scheduled Cargo Turnover // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2015. T. 7. № 6. С. 79-85. <https://www.doi.org/10.21821/2309-5180-2015-7-6-79-85>.

9. Панасенко Н., Яковлев П. Контейнеризация международной транспортной системы // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2016. № 4. С. 103-116.
10. Plesaliev D. I., Abduvakhitov S. R., Ismatullaev A. F., Makhmatkulov S. G. Research of the Main Storage Area of the Container Terminal // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. T. 9. № 1. С. 4625-4630. <https://www.doi.org/10.35940/ijeat.A2923.109119>.
11. Rakhmangulov A. N., Muravev D. S. Assessment of development options for «sea port – „dry” port» system using simulation method // Herald of the Ural State University of Railway Transport. 2016. № 3. С. 54-72. <https://www.doi.org/10.20291/2079-0392-2016-3-54-72>.
12. Васильев И. Метод решения задачи формирования комплекта контейнеров для отгрузки на железнодорожный вагон // Национальная Ассоциация Учёных. Т. 7. № 2-4. С. 101-103.
13. Кузнецов А. Генезис агентного имитационного моделирования в ходе развития методов технологического проектирования портов и терминалов // Эксплуатация морского транспорта. 2009. Т. 58. № 4. С. 3-7.
14. Илесалиев Д., Абдувахитов Ш. Исследования функционирования контейнерного терминала // Транспорт: наука, техника, управление. 2019. № 11. С. 59-62. <https://www.doi.org/10.36535/0236-1914-2019-11-11>.
15. Басов Е. Оптимизация высоты складирования контейнеров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2014. Т. 25. № 3. С. 166-170.
16. Abduvakhitov S. Capacity of Storage of Participant Cargoes // International Journal of Psychosocial Rehabilitation. 2020. T. 24. № 4. С. 3864-3871. <https://www.doi.org/10.37200/IJPR/V24I4/PR201499>.
17. Абдувахитов Ш., Азимов Ф., Ибрагимова Г., Илесалиев Д., Исмагуллаев А. Контейнеризация как фактор развития организации перевозок грузов // Логистические системы в глобальной экономике. 2020. № 10. С. 49-52.
18. Mittal N., Boile M., Baveja A., Theofanis S. Determining optimal inland-empty-container depot locations under stochastic demand // Research in Transportation Economics. 2013. T. 42. № 1. С. 50-60. <https://www.doi.org/10.1016/j.retrec.2012.11.007>.
19. Pascual J., Aranda D., Hidalgo F., Smith A. E., Karakaya E., Gonzalez-Ramirez R. G. Empty container stacking operations: Case study of an Empty Container Depot in Valparaiso Chile // 2016 Winter Simulation Conference (WSC). Washington, DC, USA: IEEE, 11.12.2016 - 14.12.2016. С. 3724-3725. <https://www.doi.org/10.1109/wsc.2016.7822419>.
20. Boile M., Theofanis S., Baveja A., Mittal N. Regional Repositioning of Empty Containers // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2008. T. 2066. № 1. С. 31-40. <https://www.doi.org/10.3141/2066-04>.
21. Petering M. E. Decision support for yard capacity, fleet composition, truck substitutability, and scalability issues at seaport container terminals // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2011. T. 47. № 1. С. 85-103. <https://www.doi.org/10.1016/j.tre.2010.07.007>.
22. CHU C.-Y., HUANG W.-C. Determining container terminal capacity on the basis of an adopted yard handling system // Transport Reviews. 2005. T. 25. № 2. С. 181-199. <https://www.doi.org/10.1080/0144164042000244608>.
23. Guan C., Liu R. Container terminal gate appointment system optimization // Maritime Economics & Logistics. 2009. T. 11. № 4. С. 378-398. <https://www.doi.org/10.1057/mel.2009.13>.
24. Kozan E. Optimum Capacity for Intermodal Container Terminals // Transportation Planning and Technology. 2006. T. 29. № 6. С. 471-482. <https://www.doi.org/10.1080/03081060601075716>.
25. Илесалиев Д.И., Коровяковский Е.К. Анализ существующих методов погрузки тарно-штучных грузов на железнодорожном транспорте // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2015. Т. 5. №1. С. 38-42.

References

1. Lubentcova V. S., Efremov A. V. *Solution of the problem of determining the capacity of a container terminal using the “death and birth” model* // Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences. 2005, vol. 38, pp. 155–158. <https://www.doi.org/10.14498/vsgtu393>. (In Russ.).
2. Kuznetsov A. L., Kozlova E. J. *The Comparative Study of Different Assessment Techniques for the Stack Size at the Container Terminal’s Technologic Design Stage* // Jekspluatacija morskogo transporta. 2008, vol. 54, no. 4, pp. 9–14. (In Russ.).
3. Abduvakhitov S. *Method for determining the capacity of a container terminal equipped with a gantry crane* // Vestnik KemRIPK. 2018, no. 4, pp. 41–52. (In Russ.).
4. Abduvakhitov S., Makhmatkulov S., Dehkonov M. *Technique for Determining the Capacity of a Container Terminal Serviced by a Straddle Carrier* // Nauchno-tehnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo univer-

- siteta. 2018, vol. 4, no. 4, pp. 405–415. <https://www.doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-405-416>. (In Russ.).
5. Abduvakhitov S. R., Makhmatkulov S. G., Ikramova D. Z. *Capacity Evaluation Method for Container Terminal Equipped with Rubber Tyred Gantry Crane* // Pacific Rim Countries Transportation System. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 11–15. (In Russ.).
 6. Rasulov M. X., Abduvakhitov S. R., Ilesaliev D. I. *Defining the capacity of the container terminal served by a reach staker* // Innotrans. 2019, no. 1, pp. 35–39. <https://www.doi.org/10.20291/2311-164X-2019-1-35-39>. (In Russ.).
 7. Rasulov M. X., Abduvakhitov S. R., Ilesaliev D. I., Ismatullaev A. F. *Investigation of container terminal main storage section parameters* // Innotrans. 2019, no. 2, pp. 31–37. <https://www.doi.org/10.20291/2311-164X-2019-2-31-37>. (In Russ.).
 8. Zhiliaev D. E. *Determining of Minimum Necessary Storage Capacity of a Dry Port Container Yard With a Scheduled Cargo Turnover* // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2015, vol. 7, no. 6, pp. 79–85. <https://www.doi.org/10.21821/2309-5180-2015-7-6-79-85>. (In Russ.).
 9. Panasenkov N. N., Yakovlev P. V. *Containerization of World Transport System* // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2016, no. 4, pp. 103–116. (In Russ.).
 10. Ilesaliev D. I., Abduvakhitov S. R., Ismatullaev A. F., Makhmatkulov S. G. *Research of the Main Storage Area of the Container Terminal* // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019, vol. 9, no. 1, pp. 4625–4630. <https://www.doi.org/10.35940/ijeat.A2923.109119>.
 11. Rakhmangulov A. N., Muravev D. S. *Assessment of development options for «sea port – „dry” port» system using simulation method* // Herald of the Ural State University of Railway Transport. 2016, no. 3, pp. 54–72. <https://www.doi.org/10.20291/2079-0392-2016-3-54-72>. (In Russ.).
 12. Vasilyev I. A. *Solving Method Of Containers Composition Problem To Discharge To Railway Car* // Nacional-naia Assotciatsiia Uchenykh, vol. 7, № 2-4, pp. 101–103. (In Russ.).
 13. Kuznetsov A. L. *Genesis of the Agent Simulation in Development of Methods of Technological Design of Ports and Terminals* // Jekspluatatsiia morskogo transporta. 2009, vol. 58, no. 4, pp. 3–7. (In Russ.).
 14. Ilesaliev D. I., Abduvakhitov S. *Research Functioning Container Terminal* // Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection). 2019, no. 11, pp. 59–62. <https://www.doi.org/10.36535/0236-1914-2019-11-11>. (In Russ.).
 15. Basov E. *Container Yard Stacking Height Optimization* // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2014, vol. 25, no. 3, pp. 166–170. (In Russ.).
 16. Abduvakhitov S. *Capacity of Storage of Participant Cargoes* // International Journal of Psychosocial Rehabilitation. 2020, vol. 24, no. 4, pp. 3864–3871. <https://www.doi.org/10.37200/IJPR/V24I4/PR201499>.
 17. Abduvakhitov S. R., Azimov F. K., Ibragimova G. R., Ilesaliev D. I., Ismatullaev A. F. *Containerization as a Factor in the Development of the Organization of Cargo Transportation* // Logistics systems in the global economy. 2020, no. 10, pp. 49–52. (In Russ.).
 18. Mittal N., Boile M., Baveja A., Theofanis S. *Determining optimal inland-empty-container depot locations under stochastic demand* // Research in Transportation Economics. 2013, vol. 42, no. 1, pp. 50–60. <https://www.doi.org/10.1016/j.retrec.2012.11.007>.
 19. Pascual J., Aranda D., Hidalgo F., Smith A. E., Karakaya E., Gonzalez-Ramirez R. G. *Empty container stacking operations: Case study of an Empty Container Depot in Valparaiso Chile* // 2016 Winter Simulation Conference (WSC). 122016, IEEE, pp. 3724–3725.
 20. Boile M., Theofanis S., Baveja A., Mittal N. *Regional Repositioning of Empty Containers* // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2008, vol. 2066, no. 1, pp. 31–40. <https://www.doi.org/10.3141/2066-04>.
 21. Petering M. E. *Decision support for yard capacity, fleet composition, truck substitutability, and scalability issues at seaport container terminals* // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2011, vol. 47, no. 1, pp. 85–103. <https://www.doi.org/10.1016/j.tre.2010.07.007>.
 22. CHU C.-Y., HUANG W.-C. *Determining container terminal capacity on the basis of an adopted yard handling system* // Transport Reviews. 2005, vol. 25, no. 2, pp. 181–199. <https://www.doi.org/10.1080/0144164042000244608>.
 23. Guan C., Liu R. *Container terminal gate appointment system optimization* // Maritime Economics & Logistics. 2009, vol. 11, no. 4, pp. 378–398. <https://www.doi.org/10.1057/mel.2009.13>.
 24. Kozan E. *Optimum Capacity for Intermodal Container Terminals* // Transportation Planning and Technology. 2006, vol. 29, no. 6, pp. 471–482. <https://www.doi.org/10.1080/03081060601075716>.
 25. Ilesaliev D. I., Korovyakovskiy E. K. *The Analysis of Existing Methods of Package Cargoes Overloading on Railway Transportation* // Modern Problems of Russian Transport Complex. 2015, vol. 5, no. 1, pp. 38–42.