## НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ, том 22, выпуск 2, 2025

ISSN (Print) 1815-588X
ISSN (Online) 2658-6851

**Учредитель**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

**Издатель**
Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Центр РИОР» по договору № ЭА78751 от 28.12.2024

**Адрес учредителя и редакции**
190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 457-81-14; e-mail: brni@pgups.ru

**Адрес издателя**
127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, офис 402

**Свидетельство о регистрации средства массовой информации**
ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005, выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, Управление по Северо-Западному федеральному округу

**Журнал зарегистрирован**
в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

**Журнал включен в перечень** ведущих рецензируемых научных журналов и изданий (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19.02.2010, № 6/6)

**Журнал публикует** научные статьи в области технических наук (транспорт, телекоммуникации, строительство)

**Журнал имеет** институт рецензирования

**Журнал распространяется**
Индекс подписки Агентство «Урал-Пресс» 33315

## РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

**Валинский Олег Сергеевич**, главный редактор, канд. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Канаев Андрей Константинович**, заместитель главного редактора, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Евстафьев Андрей Михайлович**, научный редактор, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

## РЕДКОЛЛЕГИЯ

**Абу–Хасан Махмуд Самиевич**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Агеев Сергей Александрович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Анисимов Владимир Александрович**, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Атрошенко Светлана Алексеевна**, д-р техн. наук, профессор, ИПМаш РАН, СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

**Багери Мортеза**, профессор, Иранский университет науки и технологии, Тегеран, Иран

**Беленцов Юрий Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Блажко Людмила Сергеевна**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Воробьев Александр Алфеевич**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Голоскоков Дмитрий Петрович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Ибатов Марат Кенесович**, д-р техн. наук, профессор, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

**Кондратьева Лидия Никитовна**, д-р техн. наук, профессор, СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Россия

**Кручек Виктор Александрович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Ледяев Александр Петрович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Ли Фушэн**, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай

**Лукашевич Анатолий Анатольевич**, д-р техн. наук, профессор, СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Россия

**Маилян Левон Рафаэлович**, действительный член Российской Академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, профессор, ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия

**Макарова Елена Игоревна**, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Матросов Александр Васильевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор, СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

**Никитин Александр Борисович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Покровская Оксана Дмитриевна**, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Привалов Андрей Андреевич**, д-р воен. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Рахимов Рустам Вячеславович**, д-р техн. наук, доц., Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан

**Скотникова Маргарита Александровна**, д-р техн. наук, профессор, СПбПУ, Высшая школа машиностроения, Санкт-Петербург, Россия

**Смирнов Владимир Игоревич**, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Смирнов Владимир Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Соколов Владимир Григорьевич**, д-р техн. наук, профессор, ТИУ, Тюмень, Россия

**Соловьева Валентина Яковлевна**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Талантова Клара Васильевна**, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Титова Тамила Семеновна**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Уздин Александр Моисеевич**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Шевлюгин Максим Валерьевич**, д-р техн. наук, доц., РУТ (МИИТ), Москва, Россия

**Шершнева Мария Владимировна**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Фото на обложке** предоставлено пресс-службой ФГБОУ ВО ПГУПС

**Подписано в печать** 11.06.2025. **Выход в свет** 25.06.2025.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 36,37.
Тираж 200 экз. Заказ 2426. Цена свободная.

**Отпечатано в типографии** ООО "БУКИ ВЕДИ",
г. Москва, Партийный пер., 1, корп. 58, стр. 3

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2025

## SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 22, issue 2, 2025

ISSN (Print) 1815-588X
ISSN (Online) 2658-6851

**Founder**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

**Publisher**

Limited Liability Company "Publishing Center RIOR" under contract N ЭА78751 dated December 28, 2024

**Founder's and editorial office address**

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 457-81-14, e-mail: brni@pgups.ru

**Publisher's address**

127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, of. 402

**Mass media registration certificate number**
ПИ N ФС2-7499 dd. 06.04.2005
issued by the Federal service for the monitoring of legislation compliance in the sphere of mass communications and the preservation of cultural heritage, North West Federal district division

**The journal is registered** in the Russian Science Citation Index (RSCI)

**The journal is included** in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications

**The journal publishes** scientific articles in the fields of Technics (transport, telecommunications, construction)

**The journal has** the Peer-review division

**The journal is destributed**
Index Direct Mail Agency "Ural-Press" 33315

## JOURNAL STAFF

**Oleg Valinskiy**, Editor-in-chief, PhD Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Andrey Kanayev**, Deputy Editor-in-chief, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Andrey Evstafev**, Science editor, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

## EDITORIAL TEAM

**Makhmud Abu-Khasan**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Sergey Ageev**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Vladimir Anisimov**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Svetlana Atroshenko**, D. Eng. Sci., Professor, RAS Institute for Applied Mechanics, St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

**Morteza Bagheri**, PhD, Associate Professor, Iran University of Science and Technology, Teheran, Iran

**Yuriy Belentsov**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Lyudmila Blazhko**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Alexander Vorobyev**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Dmitriy Goloskokov**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Marat Ibatov**, D. Eng. Sci., Professor, Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

**Lidia Kondratyeva**, D. Eng. Sci., Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia

**Viktor Kruchek**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Alexander Ledyaev**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Li Fusheng**, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China

**Anatoly Lukashevich**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia

**Levon Mailyan**, full member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, D. Eng. Sci., Professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

**Elena Makarova**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Alexander Matrosov**, D. Phys.-Math. Sci., Professor, St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

**Alexander Nikitin**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Oksana Pokrovskaya**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Andrey Privalov**, D. Mil. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Rustam Rakhimov**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

**Margarita Skotnikova**, D. Eng. Sci., Professor, Higher School of Mechanical Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

**Vladimir I. Smirnov**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Vladimir N. Smirnov**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Vladimir Sokolov**, D. Eng. Sci., Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Valentina Soloveva**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Klara Talantova**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Tamila Titova**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Alexander Uzdin**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Maksim Shevlyugin**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia

**Maria Shershneva**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

© Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2025

# СОДЕРЖАНИЕ

## → ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

## → ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ



## → СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

# CONTENTS

## → PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

## → GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH



## → HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

УДК 629.4.086

# Перспективы высокоскоростных контейнерных перевозок на базе электропоезда «Финист» (ЭС104/ЭС105)

**О. С. Валинский, А. Н. Марикин, Д. А. Скляренко**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Валинский О. С., Марикин А. Н., Скляренко Д. А.* Перспективы высокоскоростных контейнерных перевозок на базе электропоезда «Финист» (ЭС104/ЭС105) // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 275–289. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-275-289

## Аннотация

**Цель:** Рассмотреть существующие логистические возможности в сфере перевозок немассовых грузов и мелких отправок, а также перспективную модель перевозок в скоростном электропоезде, переоборудованном под контейнерные перевозки, определить его осевую нагрузку, мощность и компоновку оборудования. Определить перспективные направления эксплуатации, параметры транспортной тары и способ её размещения. **Методы:** В исследовании использованы методы анализа и сравнительной оценки зарубежных решений в области высокоскоростных грузовых перевозок. **Результаты:** Рассмотрены недостатки существующих логистических решений, как в области грузовых перевозок автомобильным транспортом, так и железнодорожным, проведён анализ мирового опыта, определены ключевые параметры подвижного состава, такие как выходная мощность ТЭД, масса и осевая нагрузка, установлены перспективные направления интеграции предлагаемой модели в существующую транспортную сеть. Предложены параметры транспортной тары, способы её погрузки и размещения в грузовом пространстве вагона. **Практическая значимость:** Реализация модели высокоскоростных контейнерных перевозок на базе моторвагонного подвижного состава позволит существенно сократить время доставки контейнерных грузов, снизить спрос на грузовые автомобильные перевозки, а следовательно, и вредные выбросы в окружающую среду, аварийность и загруженность автомагистралей, повысить эффективность использования существующей жел

**Ключевые слова:** Высокоскоростной поезд, контейнерные перевозки, моторвагонный подвижной состав, оптимизация движения, железнодорожный транспорт.езнодорожной инфраструктуры, с точки зрения скорости, и расширить транспортные возможности.

## Введение

Рост требований к скорости доставки товаров, а также снижению углеродного следа вынуждает совершенствовать технологии грузовых перевозок железнодорожным транспортом для повышения его конкурентоспособности. В исследовании акцент сделан на сферу перевозок немассовых грузов и мелких отправок в модернизированных под грузовые перевозки электропоездах «Финист».

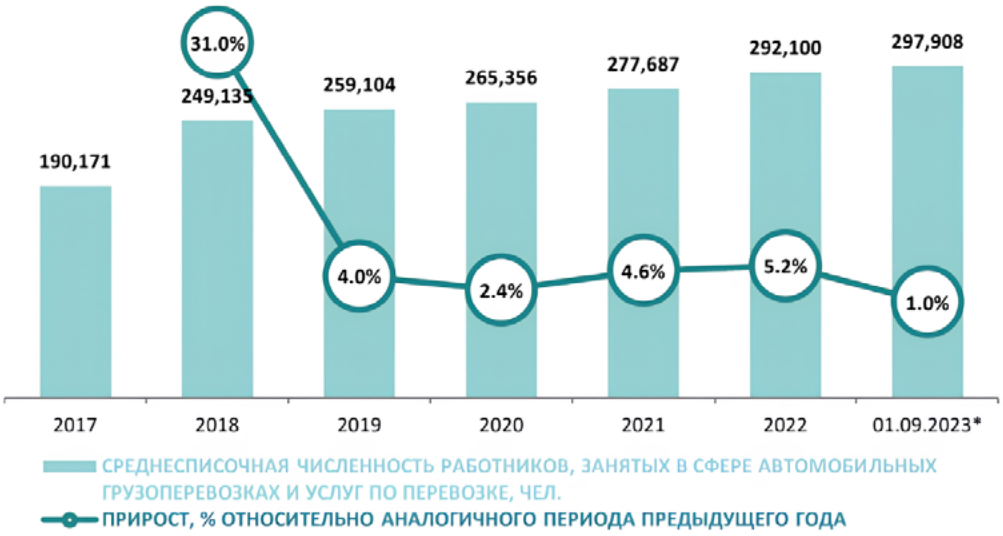



**Рис. 1.** Количество сотрудников, занятых в сфере автомобильных перевозок, 2017 г. — сентябрь 2023 г., человек, %

В настоящее время на направлении Москва — Санкт-Петербург более 80 % грузопотока приходится на автомобильный транспорт. Структура этого грузопотока была подробно исследована ранее [1]:

– продовольственные товары (в том числе скоропортящиеся, алкоголь): 45–50 %;

– промышленные грузы (строительные материалы, химическая продукция): 25–30 %;

– товары народного потребления (одежда, электроника, бытовая техника), в эту же категорию включаются сборные грузы крупнейших маркетплейсов России (Wildberries, OZON, «Яндекс Маркет»): 20–25%;

– специальные грузы (медицинские товары, опасные грузы): 5–10 %.

Высокоскоростной грузовой поезд способен заменить автомобильные перевозки в сегментах продовольственных товаров, товаров народного потребления и медицинских грузов, обеспечивая более быструю и экологичную доставку. Среди недостатков автомобильных грузовых перевозок [2]:

– загрязнение окружающей среды из-за выбросов углекислого газа и других загрязняющих веществ;

– заторы на скоростных федеральных трассах из-за чрезмерного количества грузовых автомобилей, снижение как скорости всего потока автомобилей, так и скорости доставки груза;

– ограниченные объемы перевозок, автотранспорт не подходит для отправления больших объемов товара;

– высокая вероятность аварий, обширные слепые зоны грузовиков представляют опасность для водителей легковых автомобилей.

Еще одним важным фактором является кадровый вопрос. Для перевозки грузов автомобильным транспортом требуется большое количество водителей, что создает высокую занятость в данной сфере и приводит к кадровому дефициту.

По состоянию на 2023 год в сфере автомобильных перевозок было занято 298 000 человек, и если в период с 2019 по 2022 год количество сотрудников увеличивалось в среднем на 4 % ежегодно, то с 2022 по 2023 год количество занятых в этой сфере работников выросло лишь на 1 % (рис. 1). При этом в 2023 году продолжили свой рост такие показатели, как объем рынка грузовых автомобильных перевозок, а также масса перевезенных грузов (рис. 2) [3, 4].

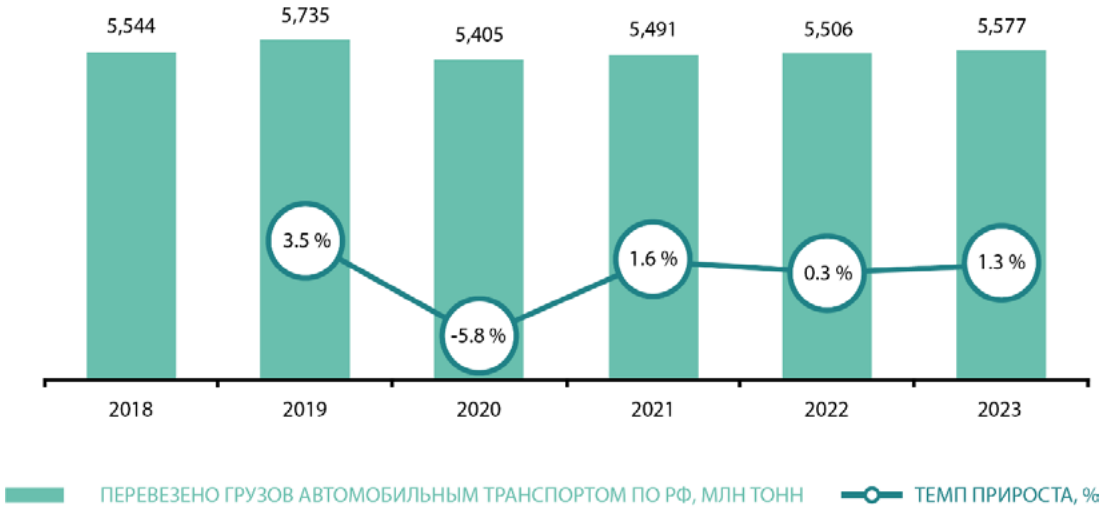



**Рис. 2.** Динамика объема грузов, перевезенных автотранспортом, 2018–2023 гг., млн тонн, %

Одно из новшеств последнего времени, которое предлагает железнодорожный транспорт России, — перевозки контейнеров на платформах с конструкционной скоростью 140 км/ч [5]. Однако на данный момент парк локомотивов не располагает подвижными единицами с конструкционной скоростью более 120 км/ч [6].

Высокоскоростной грузовой электропоезд способен обеспечить надежную, быструю и экологически чистую доставку немассовых грузов и мелких отправок. Его разработка и ввод в эксплуатацию станет важным шагом в развитии транспортной инфраструктуры России, повысит конкурентоспособность железнодорожного транспорта и сократит нагрузку на автомобильные дороги, а также снизит зависимость от человеческого фактора и уменьшит потребность в большом количестве водителей.

После начала эксплуатации ВСМ-1 Москва — Санкт-Петербург в 2028 году стоит ожидать снижения загруженности линии Санкт-Петербург — Москва Октябрьской железной дороги, что позволит ввести в график высокоскоростные контейнерные поезда, время в пути которых при скорости движения 160 километров в час составит пять с половиной часов. Использование таких поездов оправданно и на других полигонах железных дорог, таким образом можно соединить в единую сеть Москву, Петербург, Нижний Новгород, Воронеж, Казань, Екатеринбург, Новосибирск, Смоленск и Брянск, а также примыкающие к соответствующим линиям города.

В мире на данный момент уже имеются успешные примеры контейнерных перевозок на базе высокоскоростного моторвагонного подвижного состава.

Первая в мире высокоскоростная грузовая железнодорожная линия была введена в эксплуатацию 7 ноября 2018 года итальянским оператором Mercitalia Fast (Gruppo FS Italiane). Линия соединяет терминал Маддалони — Марчани́зе в Касерте с интерпортом Болоньи (около 550 км), одним из важнейших логистических узлов Северной Италии.

В качестве подвижного состава используются модернизированные пассажирские высокоскоростные поезда ETR 500. В процессе модернизации было демонтировано пассажирское оборудование: система кондиционирования, туалетные комплексы, кресла и так далее.

Таблица 1. Технические характеристики поездов ETR 500 и ETR.500 M-01

| Параметр | ETR 500 (пассажирский) | ETR.500 M-01 (модернизированный под грузовые перевозки) |
|---|---|---|
| Производитель | Trevi (консорциум Alstom, Bombardier и AnsaldoBreda) | |
| Компоновка | Мг + 11 × Пп + Мг<br>Мг + 12 × Пп + Мг<br>Мг + 8 × Пп + Мг | Мг + 12 × Пп + Мг |
| Максимальная скорость | 360 км/ч | 250 км/ч (ограничена по условиям безопасности)<br>300 км/ч (конструкционная) |
| Мощность длительного режима | 2 × 4400 кВт | |
| Количество и тип ТЭД | 8 АТД | |
| Масса | 598 т | |
| Колея | 1435 мм | |
| Вместимость | 575 пассажиров | 7–10,6 тонны на вагон |

Грузовое пространство разделено на 12 секций (вагонов). В одном вагоне можно разместить 60 контейнеров размером 71 × 80 × 180 см. Стандартная грузоподъемность одного вагона составляет 7 тонн. Технические характеристики поездов ETR 500 и модифицированных под грузовые перевозки ETR.500 M-01 сведены в табл. 1.

При описании компоновки моторвагонного подвижного состава могут применяться следующие обозначения: Мг — моторный головной вагон, оборудованный кабиной управления и имеющий обмоторенные оси; Пг — прицепной головной вагон, оборудованный кабиной управления, но не имеющий обмоторенных осей; Мп — моторный промежуточный вагон, имеющий обмоторенные оси; Пп — промежуточный прицепной вагон, обмоторенных осей не имеющий [7].

Итальянский перевозчик утверждает, что удалось сократить вредные выбросы на 80 % по сравнению с автомобильными перевозками. Помимо этого, маршрут грузовой автомобиль преодолевает за 6–7 часов, в то время как поезд — за 3 часа и 20 минут, со средней скоростью 180 км/ч.

В 2020 году китайский железнодорожный перевозчик представил свой высокоскоростной грузовой поезд, разработанный компанией CRRC Tangshan Co Ltd, входящей в состав China Railway Rolling Stock Corp — крупнейшего в стране производителя подвижного состава по объемам производства. Данный подвижной состав может развивать максимальную скорость 350 километров в час и способен преодолевать путь длиной 1500 километров за 5 часов.

Каждый вагон оснащен парой загрузочных дверей шириной 2,9 м, что делает двери грузовых вагонов этого поезда самыми большими в мире. В отличие от итальянского ETR.500 M-01, где загрузка и распределение контейнеров выполняется вручную, в грузовых отсеках предусмотрена напольная система с встроенными транспортерами, которые автоматически распределяют груз по составу. Благодаря этой системе заполнение грузового пространства происходит максимально эффективно. Данный механизм аналогичен используемому в грузовых самолетах [8, 9].

С 2025 года на заводе «Уральские локомотивы» в Верхней Пышме был начат выпуск двухсистемного электропоезда ЭС105 «Финист».

Электропоезд имеет следующую компоновку:

Пг — Мп — Пп — Мп — Пг.

Тип тяговых электродвигателей: асинхронные самовентилируемые.

Мощность тяговых электродвигателей: 330 кВт.

Суммарная выходная мощность: 2640 кВт.

Для эффективной эксплуатации на расстояниях от 500 до 1500 километров имеет

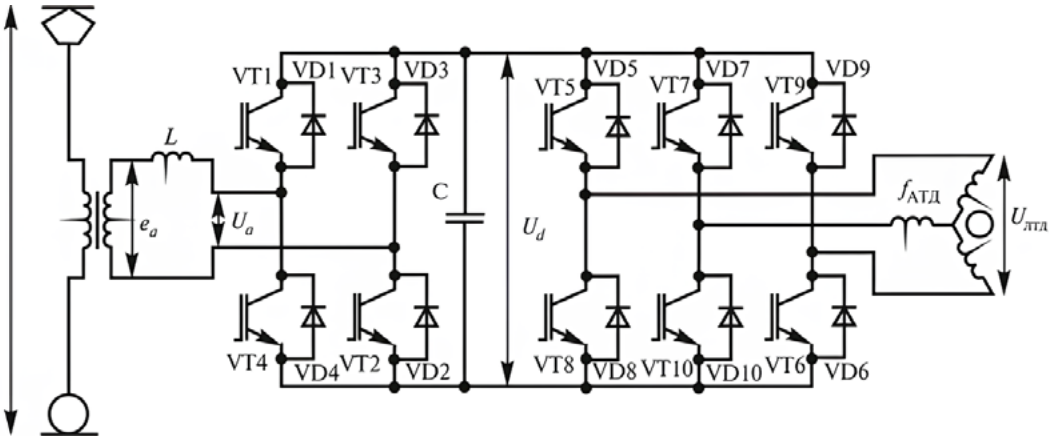



**Рис. 3.** Схема четырехквадрантного преобразователя (4QS) и автономного инвертора напряжения (АИН)

Таблица 2. Масса и осевая нагрузка вагонов в составе электропоезда ЭС105

| Параметр | Головной вагон | Моторный промежуточный | Прицепной промежуточный |
|---|---|---|---|
| Тара исходная | 58,6 т | 58,3 т | 45,6 т |
| Нагрузка на ось исходная | 14,65 т | 14,575 т | 11,4 т |
| Тара грузовой модификации | 53,6 т | 58,1 т | 43,2 т |
| Нагрузка на ось грузовой модификации | 13,4 т | 14,525 т | 10,8 т |
| Максимальная нагрузка на ось | 19 т | | |
| Допустимая масса груза | 22,4 т | 17,9 т | 32,8 т |

смысл выполнить электропоезд в составности 10 вагонов.

Основное тяговое оборудование на ЭС105 располагается следующим образом:

− тяговый трансформатор: головные прицепные вагоны (1 и 5 в составе);

− статический тяговый преобразователь, включающий в себя четырехквадрантный преобразователь и автономный инвертор напряжения (рис. 3): моторные вагоны (2 и 4 в составе).

В целях эффективного использования массы, а также возможного повышения скорости движения до 200 км/ч требуется установка более мощных электродвигателей. Подразделение «Синара — Транспортные машины» и завод «Уральские локомотивы» при разработке высокоскоростного поезда для строящейся магистрали ВСЖМ-1 Москва — Санкт-Петербург будут использовать асинхронные двигатели с принудительным охлаждением с номинальной мощностью 650 кВт. Тележки электропоездов семейства «Финист» (ЭС104, ЭС105) также позволяют установить такие ТЭД.

Компоновка 10-вагонного состава:

Пг — Мп — Пп — Пп — Пп — Пп — Пп — Пп — Мп — Пг.

Исходя из того, что в таком составе 2 моторных вагона по 4 обмоторенных оси каждый, суммарная мощность всего электропоезда составит 5200 кВт.

В табл. 2 представлена масса каждого типа вагона и его осевая нагрузка при удалении оборудования, предназначенного для пассажирских перевозок, а также изменении массы тягового оборудования в связи с установкой более мощных двигателей. Также был учтен монтаж грузового пола с роликами и направляющими для ускорения погрузки контейнеров [10].

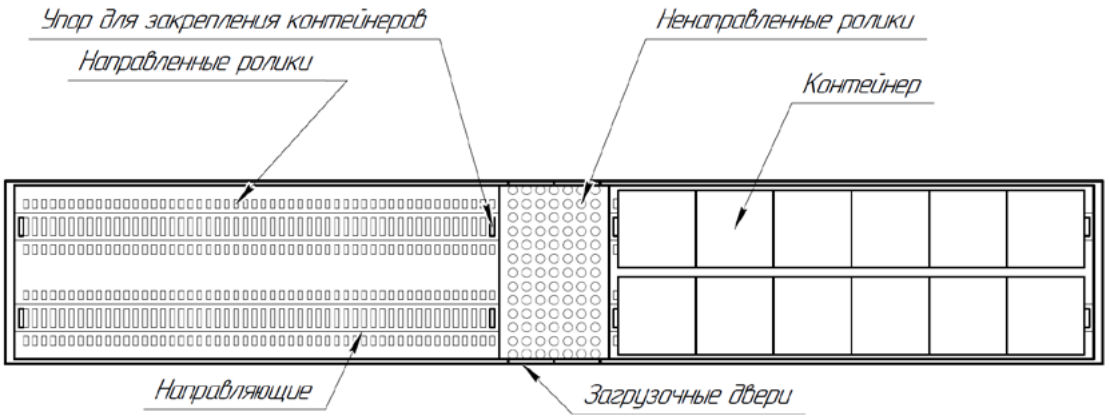



**Рис. 3.** План промежуточного вагона

План промежуточного вагона представлен на рис. 3.

Контейнер габаритами 1,5 × 1,5 × 2 метра загружается при помощи погрузчика на загрузочную площадку вагона, оборудованную ненаправленными роликами. При помощи рабочего контейнер заводится на направляющие, после чего, взаимодействуя с направленными роликами задвигается вглубь вагона. Каждый контейнер вмещает в себя 1,5 тонны груза. Тара контейнера — 100 кг.

Масса пустого электропоезда может быть вычислена по формуле:

$$G = q_{\text{Пг}} n_{\text{Пг}} + q_{\text{Мп}} n_{\text{Мп}} + q_{\text{Пп}} n_{\text{Пп}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{Пг}}$ — тара прицепного головного вагона;
$q_{\text{Мп}}$ — тара моторного промежуточного вагона;
$q_{\text{Пп}}$ — тара прицепного промежуточного вагона;
$n_{\text{Пг}}, n_{\text{Мп}}, n_{\text{Пп}}$ — количество соответствующих вагонов в составе.

Масса груза с учетом среднего коэффициента загрузки, принимаемого 0,65, вычисляется по формуле:

$$M = 0,65\left(m_{\text{Пг}} n_{\text{Пг}} + m_{\text{Мп}} n_{\text{Мп}} + m_{\text{Пп}} n_{\text{Пп}}\right), \quad (2)$$

где $m_{\text{Пг}}$, $m_{\text{Мп}}$, $m_{\text{Пп}}$ — массы груза в соответствующих вагонах.

Масса груженого электропоезда вычисляется по формуле:

$$Q = G + M. \quad (3)$$

Среднее пусковое ускорение до расчетной скорости можно определить по формуле:

$$a_{\text{срп}} = \frac{3,6 k_{\text{пм}} k_{\text{п}} P_{\text{э}}}{Q(1+\gamma) V_{\text{р}}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{пм}}$ — коэффициент, учитывающий механические потери в ТЭД и тяговой передаче, а также магнитные потери в ТЭД;
$k_{\text{п}}$ — коэффициент допустимой пусковой перегрузки ТЭД;
$P_{\text{э}}$ — суммарная мощность ТЭД электропоезда;
$Q$ — масса груженого электропоезда;
$(1+\gamma)$ — коэффициент инерции вращающихся частей;
$V_{\text{р}}$ — расчетная скорость.

## Выводы

В исследовании рассмотрена концепция скоростных и высокоскоростных перевозок контейнерных грузов на базе электропоезда ЭС105 «Финист».

Проведен сравнительный анализ перевозок немассовых грузов и мелких отправок автомо-

бильным транспортом и железнодорожным. Выявлены и перечислены основные недостатки автомобильного транспорта, среди которых вредные выбросы в атмосферу, образование заторов на скоростных автомагистралях, ограниченная грузоподъемность и высокая вероятность аварий. Особое внимание уделено кадровому вопросу в условиях дефицита на рынке труда. Также рассмотрена перспективная модель перевозок контейнеров на фитинговых платформах с конструкционной скоростью 140 км/ч. Была дана оценка данной модели.

Рассмотрен мировой опыт перевозок контейнерных грузов в высокоскоростных поездах, как в модифицированных (Италия), так и изначально созданных для грузовой работы (Китай).

Основываясь на этом, определены основные параметры перспективного российского электропоезда, переоборудованного под перевозки контейнерных грузов. Среди них: компоновка, мощность ТЭД, тара разных типов вагонов в составе, стандарт транспортной тары (контейнера). Представлена методика расчета среднего пускового ускорения для данного типа подвижного состава.

## Список источников

1. Прокофьев М. Н. Совершенствование технологии ускоренных грузовых перевозок железнодорожным транспортом: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: дисс. … канд. техн. наук / М. Н. Прокофьев. — М., 2018. — С. 20–28.

2. Автомобильные перевозки грузов: преимущества и недостатки. — URL: https://tr-logistik.com/blogs/avtomobilnye-perevozki-gruzov (дата обращения: 16.05.2025).

3. Федеральная служба государственной статистики. — URL: https://rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 06.05.2025).

4. РБК. Российский рынок коммерческих автомобильных грузоперевозок 2023: обзор. — М.: РБК, 2023. — 110 с. — С. 100–110.

5. Скоростная шестиосная 80-футовая вагон-платформа модели 13-6704. — URL: https://sinaratm.ru/products/putevaya-tekhnika/skorostnaya-shestiosnaya-80-futovaya-vagon-platforma-modeli-13-6704/ (дата обращения: 09.05.2025).

6. Ероян А. Г. Современный подвижной состав железнодорожного транспорта. Основные тенденции в транспортном машиностроении / А. Г. Ероян // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2020. — Т. 2. — № 3(99). — С. 47–52.

7. Железнодорожный транспорт. Энциклопедия. — М.: Большая Российская Энциклопедия, 1995. — С. 249–250.

8. Urbański P. Review of freight high speed railway (HSR). Rail Vehicles / P. Urbański // Pojazdy Szynowe. — 2022. — № 1-2. — Pp. 49–61.

9. Киселев И. П. Перспективы грузовых высокоскоростных перевозок / И. П. Киселев, А. А. Китунин // Железнодорожный транспорт. — 2021. — № 10. — С. 70–77.

10. Платформа Механизации Cargo Castor. — URL: http://pk-aerotech.ru/meh-pol/platforma-mekhanizatsii-cargo-castor (дата обращения: 09.05.2025).

Дата поступления: 02.05.2025
Решение о публикации: 28.05.2025

**Контактная информация:**
ВАЛИНСКИЙ Олег Сергеевич — канд. техн. наук, проф.; rector@pgups.ru
МАРИКИН Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф.
СКЛЯРЕНКО Даниил Александрович — студент; podstukk@yandex.ru

# Prospects for High-Speed Container Transportation by the "Finist" Electric Train (ES104/ES105)

**O. S. Valinsky, A. N. Marikin, D. A. Sklyarenko**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Valinsky O. S., Marikin A. N., Sklyarenko D. A. Prospects for High-Speed Container Transportation by the "Finist" Electric Train (ES104/ES105). *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 275–289. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-275-289

## Summary

**Purpose:** To consider the existing logistics possibilities in the sphere of transportation of non-bulky cargo and small consignments, as well as a prospective use of a high-speed electric train for container transportation, and to determine the train axle load, capacity and equipment layout. To determine the prospective directions of operation, the container parameters, and the placement methods. **Methods:** The analysis and comparative evaluation of solutions in the field of high-speed freight transportation in other countries. **Results:** A thorough analysis of the existing logistics solutions in the field of freight transportation by road and rail has been conducted, and the global practices have been taken into account. The key parameters of the rolling stock, including the traction motor output power, weight and axle load, have been determined. The prospects of integrating the proposed model into the existing transportation network have also been established. The container parameters, as well as the methods of cargo loading and placement in the train car, have been proposed. **Practical significance:** The implementation of the high-speed container transportation model, utilising rail multiple units, will lead to substantial improvements in the delivery time of container cargo. This will result in a reduced road freight transportation, consequently minimising harmful emissions into the environment, accidents and highway congestion. The model will enhance the efficiency of existing railway infrastructure in terms of speed, while also expanding transportation opportunities.

**Keywords:** High-speed train, container transportation, multiple units, traffic optimization, railway transport.

## References

1. Prokof'ev M. N. *Sovershenstvovanie tekhnologii uskorennykh gruzovykh perevozok zheleznodorozhnym transportom: spetsial'nost' 05.22.08 "Upravlenie protsessami perevozok": diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the technology of accelerated freight transportation by rail: specialty 05.22.08 "Transportation process management": diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. Moscow, 2018, pp. 20–28. (In Russian)

2. *Avtomobil'nye perevozki gruzov: preimushchestva i nedostatki* [Automobile transportation of goods: advantages and disadvantages]. Available at: https://tr-logistik.com/blogs/avtomobilnye-perevozki-gruzov (accessed: May 16, 2025). (In Russian)

3. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki* [Federal State Statistics Service]. Available at: https://rosstat.gov.ru/ (accessed: May 6, 2025). (In Russian)

4. *RBK. Rossiyskiy rynok kommercheskikh avtomobil'nykh gruzoperevozok 2023: obzor* [RBC. Russian market of commercial automobile freight transportation 2023: review]. Moscow: RBK Publ., 2023, 110 p., P. 100–110. (In Russian)

5. *Skorostnaya shestiosnaya 80-futovaya vagon-platforma modeli 13-6704* [High-speed six-axle 80-foot flatcar model 13-6704]. Available at: https://sinaratm.ru/products/putevaya-tekhnika/skorostnaya-shestiosnaya-80-futovaya-vagon-platforma-modeli-13-6704/ (accessed: May 9, 2025). (In Russian)

6. Eroyan A. G. Sovremennyy podvizhnoy sostav zheleznodorozhnogo transporta. Osnovnye tendentsii v transportnom mashinostroenii [Modern rolling stock of railway transport. Main trends in transport engineering]. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya* [Economy and management: problems, solutions]. 2020, vol. 2, Iss. 3(99), pp. 47–52. (In Russian)

7. *Zheleznodorozhnyy transport. Entsiklopediya* [Railway transport. Encyclopedia]. Moscow: Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya Publ., 1995, pp. 249–250. (In Russian)

8. Urbański P. Review of freight high speed railway (HSR). Rail Vehicles. Pojazdy Szynowe, 2022, Iss. 1-2, pp. 49–61.

9. Kiselev I. P., Kitunin A. A. Perspektivy gruzovykh vysokoskorostnykh perevozok [Prospects for high-speed freight transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2021, Iss. 10, pp. 70–77. (In Russian)

10. *Platforma Mekhanizatsii Cargo Castor* [Cargo Castor Mechanization Platform]. Available at: http://pk-aerotech.ru/meh-pol/platforma-mekhanizatsii-cargo-castor (accessed: May 9, 2025). (In Russian)

Received: May 02, 2025
Accepted: May 28, 2025

**Author's information:**
Oleg S. VALINSKY — PhD in Engineering, Professor; rector@pgups.ru
Alexander N. MARIKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor
Daniil A. SKLYARENKO — Student; podstukk@yandex.ru

УДК 629.424

# Исследование выбора материнской вейвлет-функции при вибродиагностике тепловозных двигателей

**А. А. Беляев, Д. П. Кононов, А. М. Кудрин**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Беляев А. А., Кононов Д. П., Кудрин А. М.* Исследование выбора материнской вейвлет-функции при вибродиагностике тепловозных двигателей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 290–299. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-290-299

## Аннотация

**Цель:** Разработка объективного подхода к определению наиболее эффективных вейвлетов для конкретных типов вибрационных сигналов дизельных двигателей на основе количественных критериев с возможностью последующего применения в системах диагностики тепловозов. Исследование направлено на создание универсальной методики сравнительной оценки различных вейвлетов, что является важным шагом в развитии современных методов вибродиагностики. **Методы:** Экспериментальное получение вибрационных сигналов с помощью трехпозиционного датчика на дизельном двигателе, последующая обработка данных с применением вейвлет-пакетного преобразования в среде программирования Python. Проведена оценка эффективности 35 различных вейвлетов из семейств Добеши, Коифлеты, Биортогональные, Обратные биортогональные, Симлеты и Хаар по двум объективным критериям: минимальной среднеквадратичной ошибке (MSE) реконструкции и максимальной спектральной энергии сигнала. Сравнительный анализ проводился с использованием специально разработанного алгоритма ранжирования и отбора оптимальных вейвлетов на основе параллельной оценки по обоим критериям. **Результаты:** Представлена универсальная методика выбора оптимальной материнской вейвлет-функции для анализа вибрационных сигналов дизельных двигателей. Установлено, что для исследуемого сигнала оптимальными по обоим критериям являются вейвлеты bior3.3, bior3.5 и bior3.7, обеспечивающие наилучший баланс между точностью реконструкции и сохранением энергетических характеристик. Полученные результаты позволяют количественно обосновать выбор вейвлета для конкретного типа сигнала, что повышает достоверность диагностики. **Практическая значимость:** Разработанная методика позволяет объективно выбирать оптимальные материнские вейвлеты для вейвлет-пакетного преобразования вибросигналов, что повышает эффективность вибродиагностики дизельных двигателей тепловозов и позволяет совершенствовать существующие интеллектуальные системы мониторинга технического состояния с возможностью раннего обнаружения неисправностей и прогнозирования остаточного ресурса.

**Ключевые слова:** Дизельный двигатель, вибродиагностика, вейвлет-преобразование, вейвлет-пакет, среднеквадратичная ошибка, спектральная энергия, декомпозиция сигнала.

## Введение

Вейвлет-анализ представляет собой математическую процедуру, которая разбивает данные на различные частотные компоненты, а затем исследует каждый компонент с разрешением, соответствующим его масштабу. В вейвлет-анализе сигнал декомпозируется на его «вейвлеты», масштабированные и сдвинутые версии исходной (материнской) вейвлет-функции [1, 2]. В общем, вейвлет-преобразования делятся на дискретное

вейвлет-преобразование (DWT), вейвлет-пакетное преобразование (WPT) и непрерывное вейвлет-преобразование (CWT). Дискретное вейвлет-преобразование (DWT) может быть эффективно реализовано путем декомпозиции сигнала на аппроксимационные (низкочастотные) и детализированные (высокочастотные) коэффициенты. После первого уровня только аппроксимация декомпозируется на более высокий уровень. Вейвлет-преобразование представляет собой математический метод, позволяющий разложить сигнал на компоненты различного масштаба. Для дискретного сигнала $x[n]$ дискретное вейвлет-преобразование (DWT) может быть представлено как:

$$WW_{\psi}(j,k)=\sum_{n}x[n]\psi_{j,k}[n], \quad (1)$$

где $\psi_{j,k}[n]$ — дискретная вейвлет-функция, определяемая как:

$$\psi_{j,k}[n]=2^{-j/2}\psi\left(2^{-j}n-k\right). \quad (2)$$

где $j$ — параметр масштаба;
$k$ — параметр сдвига;
$\psi(t)$ — материнская вейвлет-функция [3, 4].

## Теоретические основы пакетного вейвлет-анализа

Вейвлет-пакетное преобразование (WPT) является обобщением дискретного вейвлет-преобразования и обеспечивает более гибкий подход к анализу сигналов. В отличие от DWT, которое разделяет только аппроксимирующие коэффициенты, WPT разделяет как аппроксимирующие, так и детализирующие коэффициенты на каждом уровне декомпозиции [5].

Вейвлет-пакет $W_{j,n}$ определяется рекурсивно:

$$W_{j+1,2n}(t)=\sqrt{2}\sum_{k}h(k)W_{j,n}(2t-k), \quad (3)$$

$$W_{j+1,2n+1}(t)=\sqrt{2}\sum_{k}g(k)W_{j,n}(2t-k), \quad (4)$$

где $h(k)$ и $g(k)$ — коэффициенты фильтра низких и высоких частот соответственно, связанные с выбранным вейвлетом, а $W_{0,0}(t)=\phi(t)$ — масштабирующая функция [3, 4].

В вейвлет-анализе существует множество типов материнских вейвлет-функций, которые могут быть использованы. Различные материнские вейвлет-функции, примененные к одному и тому же сигналу, дадут разные результаты [3]. Материнские вейвлет-функции характеризуются такими свойствами, как ортогональность, компактная поддержка, симметрия и исчезающие моменты. Однако часто существует более одной материнской вейвлет-функции с одинаковыми свойствами. И выбор подходящей вейвлет-функции является ключевым фактором, определяющим эффективность анализа и обработки сигнала [6–9]. Поэтому крайне важно иметь методику, позволяющую для заданного сигнала определить оптимальные вейвлеты по объективным критериям.

Экспериментальной базой настоящего исследования послужил четырехтактный дизельный двигатель Nissan CD20, на котором проводились измерения вибрационных характеристик. Измерения выполнялись в одной точке с использованием трехпозиционного датчика вибрации, что позволило зафиксировать колебания по трем пространственным осям. Обработка полученных осциллограмм проводилась методами пакетного вейвлет-преобразования в среде Python. Такой подход обеспечил возможность предварительного моделирования диагностических алгоритмов с целью их последующего применения на более сложных дизельных двигателях тепловозов.

## Методика исследования

В данном исследовании для оценки эффективности вейвлетов использовались два критерия: среднеквадратичная ошибка (MSE) и спектральная энергия.

Среднеквадратичная ошибка (MSE) при реконструкции сигнала, которая определяется как:

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x[i]-\hat{x}[i]\right)^2, \quad (5)$$

где $x[i]$ — исходный сигнал;

$\hat{x}[i]$ — реконструированный сигнал;

$N$ — длина сигнала.

Спектральная энергия для вейвлет-коэффициентов на уровне $j$ рассчитывается следующим образом. Для каждого узла вейвлет-пакета $d_{j,k}$ на уровне $j$ мы применяем дискретное преобразование Фурье:

$$X_{j,k}[m] = \sum_{n=0}^{N_j-1} d_{j,k}[n]\cdot e^{-i2\pi mn/N_j}, \quad (6)$$

где $d_{j,k}[n]$ — вейвлет-коэффициенты в $k$-м узле на уровне $j$;

$N_j$ — количество коэффициентов в узле;

$X_{j,k}[m]$ — коэффициенты Фурье.

Затем для каждого узла вычисляется энергия спектра:

$$E_{j,k} = \sum_{m=0}^{N_j-1}\left|X_{j,k}[m]\right|^2. \quad (7)$$

По теореме Парсеваля сумма квадратов последовательности (или сигнал) равна сумме квадратов амплитуд ее преобразования Фурье:

$$\sum_{n=0}^{N_j-1}\left|d_{j,k}[n]\right|^2 = \frac{1}{N_j}\sum_{m=0}^{N_j-1}\left|X_{j,k}[m]\right|^2. \quad (8)$$

При расчете используется именно спектральная энергия, потому что расчет энергии напрямую через вейвлет-коэффициенты в открытой библиотеке PyWavelet для языка программирования Python демонстрирует существенные искажения на высоких уровнях декомпозиции.

Общая спектральная энергия для уровня $j$ определяется как сумма энергий всех узлов на этом уровне:

$$E_j = \sum_{k=0}^{2^j-1} E_{j,k} = \sum_{k=0}^{2^j-1}\sum_{m=0}^{N_j-1}\left|X_{j,k}[m]\right|^2. \quad (9)$$

Этот критерий позволяет оценить, насколько хорошо вейвлет сохраняет энергетические характеристики сигнала при декомпозиции до определенного уровня. Преимущество использования спектральной энергии заключается в том, что она позволяет оценить способность вейвлета сохранять частотно-энергетические характеристики сигнала, что важно для дальнейшего анализа статистических характеристик.

В исследовании рассматривались 35 различных вейвлетов из нескольких семейств. Полный список исследуемых вейвлетов и их максимальные уровни декомпозиции представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исследуемые вейвлеты и их максимальные уровни декомпозиции

| Семейство вейвлетов | Вейвлеты | Максимальные уровни декомпозиции |
|---|---|---|
| Добеши (db) | db1, db2, db3, db4, db5, db6, db7, db8 | 13, 11, 11, 10, 10, 10, 9, 9 |
| Коифлеты (coif) | coif1, coif2, coif3, coif4, coif5 | 11, 10, 9, 8, 8 |
| Биортогональные (bior) | bior1.1, bior2.2, bior2.4, bior2.8, bior3.3, bior3.5, bior3.7, bior3.9 | 13, 11, 10, 9, 10, 10, 9, 9 |
| Обратные биортогональные (rbio) | rbio1.1, rbio1.3, rbio1.5, rbio3.1, rbio3.3, rbio5.5 | 13, 11, 10, 11, 10, 10 |
| Симлеты (sym) | sym2, sym3, sym4, sym5, sym6, sym7, sym8 | 11, 11, 10, 10, 10, 9, 9 |
| Хаар (haar) | haar | 13 |

Для обеспечения корректного сравнения всех вейвлетов в равных условиях, в качестве общего уровня сравнения был алгоритмически определен уровень 8, являющийся минимальным из всех максимальных уровней. Это обеспечивает, что все 35 вейвлетов могут быть корректно сравнены на одинаковых уровнях декомпозиции без выхода за пределы их возможностей.

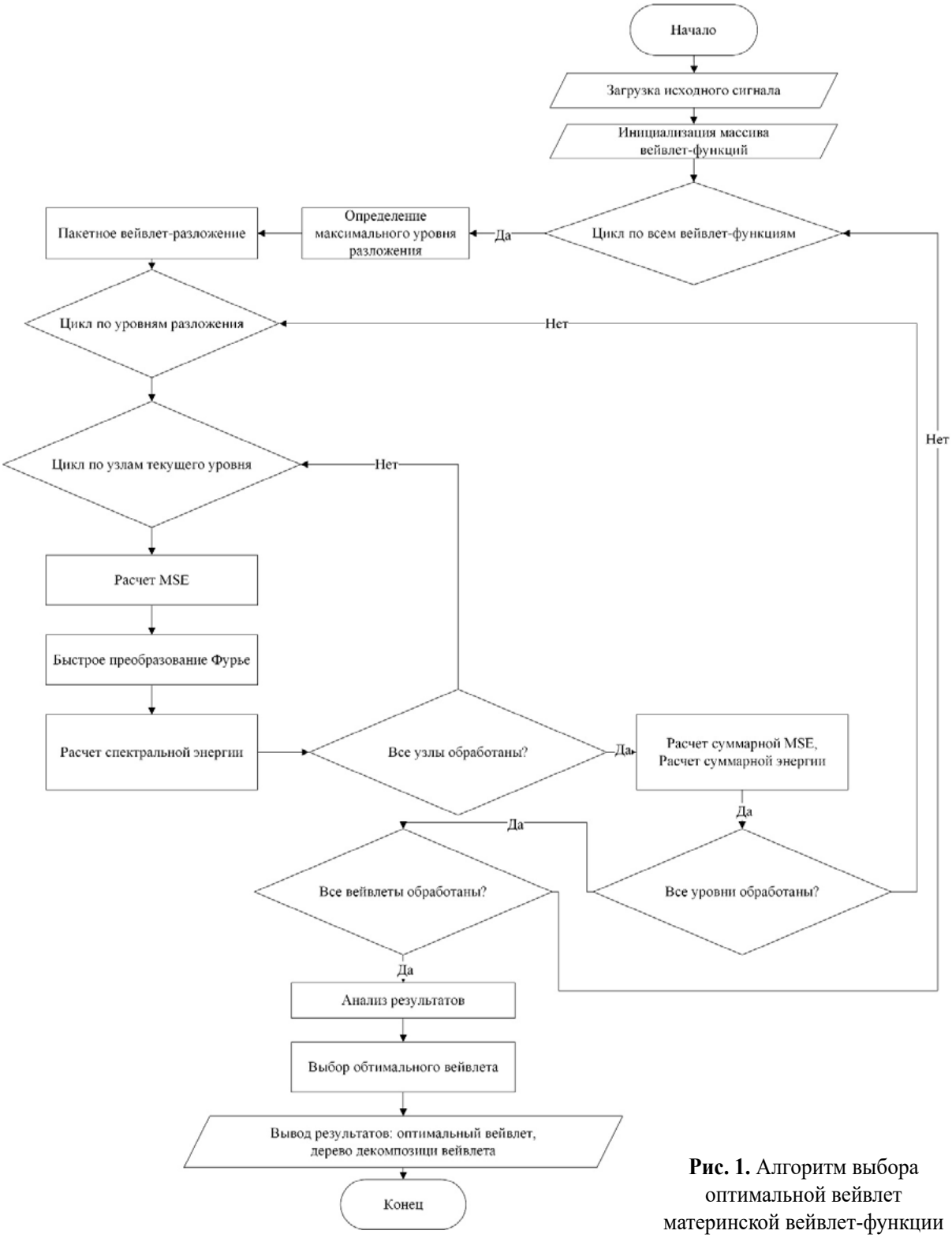



**Рис. 1.** Алгоритм выбора оптимальной вейвлет материнской вейвлет-функции

## Алгоритм выбора оптимальной вейвлет-функции

Разработанная методика представляет собой универсальный алгоритм (рис. 1), который может быть применен к любому дискретному сигналу для определения оптимальных вейвлетов.

Алгоритм позволяет выбирать оптимальный вейвлет как пересечение множеств общих вейв-

летов из отсортированных последовательностей вейвлетов по критериям MSE и спектральной энергии. Математически алгоритм формирования для трех оптимальных вейвлетов (множество оптимальных вейвлетов — $C$) можно представить следующим образом:

$$C = \{w_k \mid w_k \in \left(M_i \cup E_j\right), |C| \le 3, i, j \to \min\}, \quad (11)$$

где $M$ — упорядоченная последовательность вейвлетов по возрастанию MSE: $M = \left(m_1, m_2, \ldots, m_n\right)$;

$E$ — упорядоченная последовательность вейвлетов по убыванию энергии : $E = \left(e_1, e_2, \ldots, e_n\right)$;

$M_i$ — префикс последовательности $M$ длины $i$;

$E_j$ — префикс последовательности $E$ длины $j$.

Формула задает множество $C$, содержащее элементы $w_k$, которые принадлежат объединению двух множеств $M_i$ и $E_j$. $i$ и $j$ выбираются минимальными, чтобы выполнялось условие |C| = 3, т. е. мощность множества $C$ (количество элементов в нем) не превышает трех вейвлетов, которые представляют оптимальный компромисс между минимальной ошибкой реконструкции и максимальной спектральной энергией.

## Результаты сравнительного анализа вейвлетов

На основе значений MSE и спектральной энергии на различных уровнях были определены лучшие вейвлеты по каждому критерию. Результаты отбора вейвлетов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расширенные списки лучших вейвлетов по обоим критериям

| Критерий | Список вейвлетов |
|---|---|
| Топ-8 по минимальному MSE | bior2.2, bior3.3, bior3.5, bior3.7, coif1, db2, db3, db5 |
| Топ-6 по максимальной спектральной энергии | bior3.3, bior3.5, bior3.7, bior3.9, rbio3.1, rbio3.3 |

В результате анализа пересечения расширенных списков лучших вейвлетов были выявлены три вейвлета, присутствующие как в топ-8 по минимальному MSE, так и в топ-6 по спектральной энергии: bior3.3, bior3.5 и bior3.7. Эти вейвлеты представляют оптимальный компромисс между обоими критериями.

На основе полученных данных были построены графики, иллюстрирующие зависимость MSE (рис. 2) и спектральной энергии от уровня декомпозиции (рис. 3) для различных вейвлетов.

График зависимости MSE от уровня декомпозиции для топ-8 вейвлетов с наименьшим MSE на уровнях 1–8 (рис. 2) показывает, что ошибка реконструкции увеличивается с ростом уровня декомпозиции для всех вейвлетов. Однако для вейвлета bior2.2 это увеличение происходит значительно медленнее.

График зависимости спектральной энергии от уровня декомпозиции для топ-5 вейвлетов с наибольшей энергией по уровням 1–8 (bior3.3, bior3.5, bior3.7, bior3.9, rbio3.1, rbio3.3) (рис. 4) демонстрирует, что вейвлет rbio3.1 значительно превосходит остальные по данному критерию. Это свидетельствует о его способности сохранять энергию сигнала при декомпозиции до высоких уровней.

## Анализ оптимальных вейвлетов

В результате анализа пересечения лучших вейвлетов были выявлены три вейвлета, присутствующие как в топ-8 по минимальному MSE, так и в топ-6 по спектральной энергии: bior3.3, bior3.5 и bior3.7. Эти вейвлеты представляют оптимальный компромисс между обоими критериями.

График MSE и спектральной энергии для трех вейвлетов, входящих в пересечение расширенных списков (bior3.3, bior3.5, bior3.7) (рис. 4), показывает, что все три вейвлета имеют близкие значения MSE на всех уровнях декомпозиции до общего уровня 8, с небольшим преимуществом

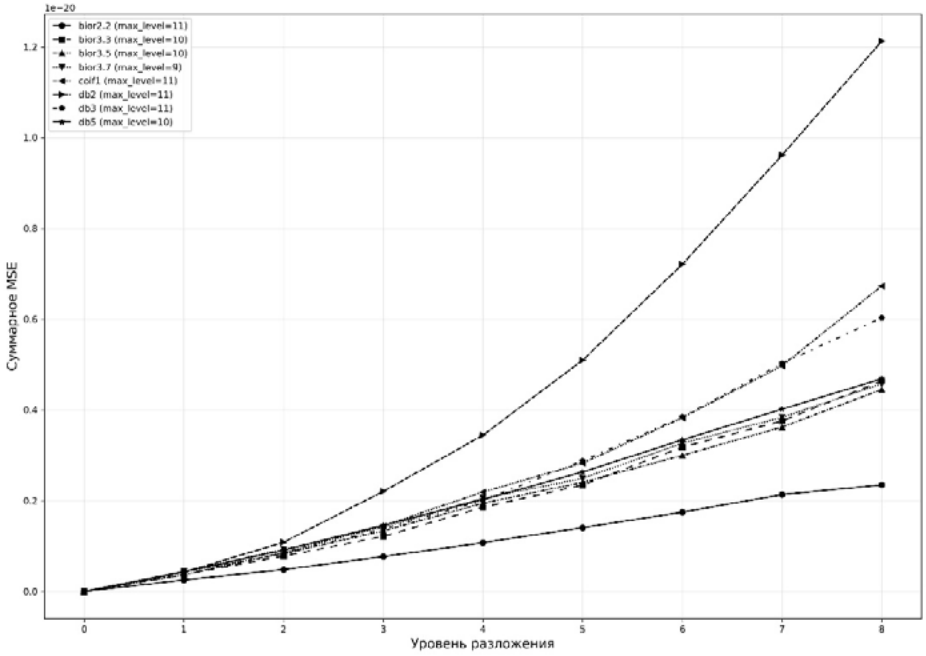



**Рис. 2.** График зависимости среднеквадратичной ошибки от уровня декомпозиции для вейвлетов с наименьшим MSE

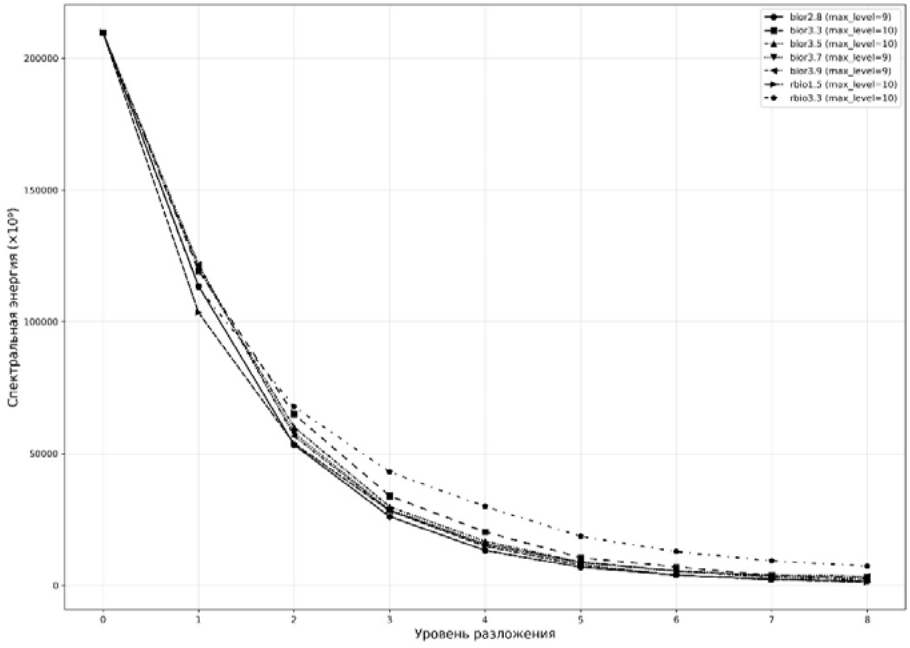



**Рис. 3.** График зависимости спектральной энергии от уровня декомпозиции для вейвлетов с наибольшей энергией

bior3.3 на ранних уровнях и bior3.5 на более высоких уровнях. Все три вейвлета демонстрируют достаточно низкие значения MSE, что указывает на их хорошую способность точно восстанавливать сигнал.

График (рис. 4) также демонстрирует, что bior3.7 сохраняет наибольшую энергию на уровне 8, за ним следует bior3.3, а затем bior3.5. Интересно отметить, что на более низких уровнях декомпозиции (1–3) порядок может быть иным,

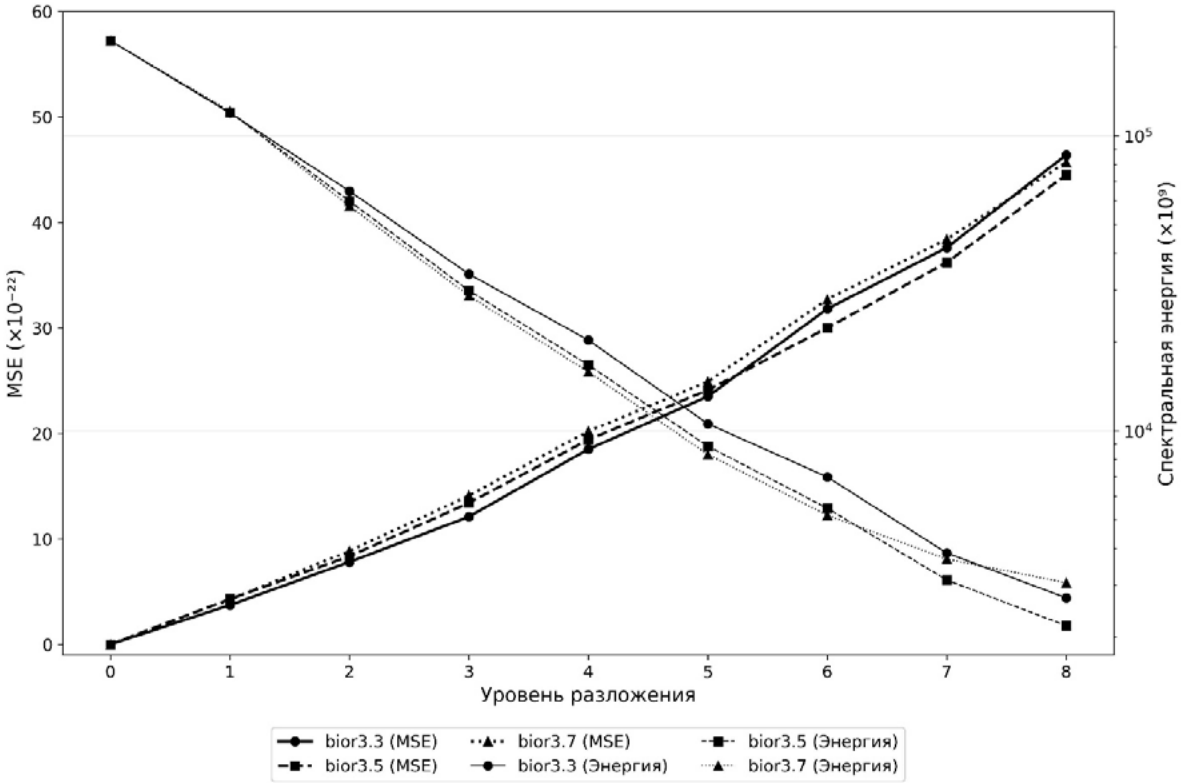



**Рис. 4.** График MSE и спектральной энергии для трех оптимальных вейвлетов

что говорит о различном поведении вейвлетов на разных масштабах анализа.

## Обсуждение результатов

Результаты исследования показывают, что для данного конкретного тестового сигнала не существует универсального вейвлета, который бы превосходил остальные по обоим критериям одновременно. Выбор оптимального вейвлета зависит от конкретной задачи и требований к обработке сигнала [1, 10].

Если для анализируемого сигнала приоритетом является точность реконструкции, то предпочтение следует отдать вейвлету bior2.2, который обеспечивает наименьшую ошибку реконструкции на всех уровнях декомпозиции. Наблюдаемое увеличение MSE с ростом уровня декомпозиции является ожидаемым эффектом и связано с потерей информации при многократной фильтрации сигнала [1, 11]. Однако для разных вейвлетов скорость роста ошибки различна, что отражает их различную способность к сохранению информации при многоуровневой декомпозиции.

Если же важнее сохранение спектральной энергии сигнала, то наилучшим выбором для данного сигнала будет вейвлет rbio3.1, который значительно превосходит остальные по этому критерию на общем уровне сравнения.

Снижение спектральной энергии с ростом уровня декомпозиции также является ожидаемым и связано с уменьшением количества коэффициентов на высоких уровнях. Однако вейвлет rbio3.1 демонстрирует высокую спектральную энергию на высоких уровнях декомпозиции для данного сигнала, что может быть связано с его специфическими частотными характеристиками и особенностями анализируемого сигнала [2, 10].

Для задач, требующих баланса между обоими критериями, наиболее подходящими вариантами являются вейвлеты bior3.3, bior3.5 и bior3.7. Среди

них bior3.7 имеет наивысшую спектральную энергию ($3055{,}65 \cdot 10^9$), bior3.5 обеспечивает немного лучшую реконструкцию ($MSE = 4{,}45 \cdot 10^{-21}$), а bior3.3 представляет промежуточный вариант между ними.

## Заключение

В данной работе разработана и представлена универсальная методика для сравнительного анализа различных вейвлетов при обработке дискретных сигналов. Методика основана на оценке вейвлетов по двум объективным критериям: минимальной среднеквадратичной ошибке при реконструкции сигнала и максимальной спектральной энергии. Ценность предложенного подхода заключается именно в методологии, а не в конкретных числовых результатах, которые будут варьироваться от сигнала к сигналу.

Разработанный алгоритм анализа вибрационных сигналов, сочетающий вейвлет-пакетное преобразование (WPD) и преобразование Фурье, формирует методологическую основу для внедрения разработанных подходов в системы диагностики тепловозных дизелей. Эффективный выбор оптимальной материнской вейвлет-функции поможет более точно определять диагностические признаки неисправностей в системах автоматической классификации неисправностей [6], что улучшит интеллектуальные системы [12] мониторинга технического состояния локомотивных дизелей.

## Список источников

1. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. — М.: Мир, 2005. — 671 с.

2. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. — Ижевск: РХД, 2001. — 464 с.

3. Lee G. R. PyWavelets: A Python package for wavelet analysis / G. R. Lee, R. Gommers, F. Wasilewski, K. Wohlfahrt et al. // Journal of Open Source Software. — 2019. — Vol. 4(36). — P. 1237. — DOI: 10.21105/joss.01237.

4. Воробьев В. И. Теория и практика вейвлет-преобразования / В. И. Воробьев, В. Г. Грибунин. — СПб.: ВУС, 1999. — 204 с.

5. Можаров Г. П. Сравнительный анализ адаптивных алгоритмов вейвлет-пакетов / Г. П. Можаров // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». — 2016. — № 1(106). — С. 75–88.

6. Kewei O. Adaptive Multi-Scale Wavelet Neural Network for Time Series Classification / O. Kewei, H. Yi, Z. Shilin, Z. Ye // Information an International Interdisciplinary Journal. — 2021. — T. 12. — Iss. 6. — P. 252. — DOI: 10.3390/INFO12060252.

7. Yu H. AdaWaveNet: Adaptive Wavelet Network for Time Series Analysis / H. Yu, G. Peikun, S. Akane // arXiv preprint arXiv:2405.11124. — 2024. — DOI: 10.48550/arXiv.2405.11124.

8. Wolter M. Adaptive wavelet pooling for convolutional neural networks / M. Wolter, J. Garcke // Proceedings of Machine Learning Research. — 2021. — Vol. 130. — Pp. 1–12.

9. Oppenheim A. V. Discrete-Time Signal Processing / A. V. Oppenheim, R. W. Schafer. — 3rd ed. — Prentice Hall, 2009. — 1144 p.

10. Antonini M. Image coding using wavelet transform / M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, I. Daubechies // IEEE Transactions on Image Processing. — 1992. — Vol. 1. — Iss. 2. — Pp. 205–220.

11. Oppenheim A. V. Discrete-Time Signal Processing / A. V. Oppenheim, R. W. Schafer. — 3rd ed. — Prentice Hall, 2009. — 1144 p.

12. Грачев В. В. Диагностирование электронного оборудования локомотива с использованием интеллектуальных классификаторов / В. В. Грачев, М. В. Федотов, А. В. Грищенко и др. // Eltrans 2023: сборник трудов XI Международного симпозиума, Санкт-Петербург, 31 мая — 2 июня 2023 года / Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. — Санкт-Петербург: ООО «ИПК «НП-Принт», 2023. — С. 134–145.

Дата поступления: 27.03.2025
Решение о публикации: 12.04.2025

**Контактная информация:**
БЕЛЯЕВ Андрей Александрович — аспирант;
belyaevaa@list.ru

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — д-р техн. наук, проф.; d_kononov@mail.ru
КУДРИН Антон Михайлович — аспирант;
belyaevaa@list.ru

# Selection of Mother Wavelet Function for Vibration Diagnostics of Locomotive Engines

## A. A. Beliaev, D. P. Kononov, A. M. Kudrin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Beliaev A. A., Kononov D. P., Kudrin A. M. Selection of Mother Wavelet Function for Vibration Diagnostics of Locomotive Engines // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 290–299. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-290-299

## Summary

**Purpose:** To develop an objective approach to determine the most effective wavelets for specific types of diesel engine vibration signals based on quantitative criteria, with the possible further application in locomotive diagnostic systems. The research aims to create a universal methodology for comparative evaluation of different wavelets, which will be an important step in the development of modern vibration diagnostic methods. **Methods:** Experimentally obtained vibration signals using a three-position sensor on a diesel engine followed by data processing with wavelet packet transformation in the Python programming environment. The effectiveness of 35 different wavelets from the Daubechies, Coiflets, Biorthogonal, Reverse Biorthogonal, Symlets and Haar families was evaluated according to two objective criteria: minimum mean square error (MSE) of the reconstruction and maximum spectral energy of the signal. Comparative analysis was performed using a specially developed algorithm for ranking and selecting optimal wavelets based on parallel evaluation against both criteria. **Results:** A universal method for selecting the optimal mother wavelet function for the analysis of diesel engine vibration signals has been presented. For the studied signal, the wavelets bior3.3, bior3.5 and bior3.7 were found to be optimal according to both criteria, offering the best balance between reconstruction accuracy and preservation of energy characteristics. The results obtained allow a quantitative justification of the choice of wavelet for a specific type of signal, increasing the reliability of the diagnosis. **Practical significance:** The developed methodology allows the objective selection of optimal mother wavelets for wavelet packet transformation of vibration signals, which will increase the efficiency of vibration diagnostics of locomotive diesel engines and will enable the improvement of existing intelligent systems for technical condition monitoring with the possibility of early fault detection and prediction of remaining useful life.

**Keywords:** Diesel engine, vibration diagnostics, wavelet transformation, wavelet packet, mean squared error, spectral energy, signal decomposition.

## References

1. Malla S. *Veyvlety v obrabotke signalov* [Wavelets in Signal Processing]. Moscow: Mir Publ., 2005, 671 s. (In Russian)

2. Dobeshi I. *Desyat' lektsiy po veyvletam* [Ten Lectures on Wavelets]. Izhevsk: RKhD Publ., 2001, 464 p. (In Russian)

3. Lee G. R., Gommers R., Wasilewski F., Wohlfahrt K. et al. PyWavelets: A Python package for wavelet analysis. Journal of Open Source Software, 2019, vol. 4(36), p. 1237. DOI: 10.21105/joss.01237.

4. Vorob'ev V. I., Gribunin V. G. *Teoriya i praktika veyvlet-preobrazovaniya* [Theory and Practice of Wavelet Transform]. St. Petersburg: VUS Publ., 1999, 204 p. (In Russian)

5. Mozharov G. P. Sravnitel'nyy analiz adaptivnykh algoritmov veyvlet-paketov [Comparative analysis of adaptive wavelet packet algorithms]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya "Priborostroenie"* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Instrument Engineering"]. 2016, Iss. 1(106), pp. 75–88. (In Russian)

6. Kewei O., Yi H., Shilin Z., Ye Z. Adaptive Multi-Scale Wavelet Neural Network for Time Series Classification. Information-an International Interdisciplinary Journal, 2021, vol. 12, Iss. 6, p. 252. DOI: 10.3390/INFO12060252.

7. Yu H., Peikun G., Akane S. AdaWaveNet: Adaptive Wavelet Network for Time Series Analysis. arXiv preprint arXiv:2405.11124, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2405.11124.

8. Wolter M., Garcke J. Adaptive wavelet pooling for convolutional neural networks. Proceedings of Machine Learning Research, 2021, vol. 130, pp. 1–12.

9. Oppenheim A. V., Schafer R. W. Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed., Prentice Hall, 2009, 1144 p.

10. Antonini M., Barlaud M., Mathieu P., Daubechies I. Image coding using wavelet transform. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, vol. 1, Iss. 2, pp. 205–220.

11. Oppenheim A. V., Schafer R. W. Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed., Prentice Hall, 2009, 1144 p.

12. Grachev V. V., Fedotov M. V., Grishchenko A. V. et al. Diagnostirovanie elektronnogo oborudovaniya lokomotiva s ispol'zovaniem intellektual'nykh klassifikatorov [Diagnostics of locomotive electronic equipment using intelligent classifiers]. *Eltrans 2023: sbornik trudov XI Mezhdunarodnogo simpoziuma, Sankt-Peterburg, 31 maya — 2 iyunya 2023 goda, Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I* [Eltrans 2023: proceedings of the XI International Symposium, St. Petersburg, May 31 — June 2, 2023, Emperor Alexander I Petersburg State University of Railway Engineering]. St. Petersburg: OOO "IPK "NP-Print", 2023, pp. 134–145. (In Russian)

Received: March 27, 2025
Accepted: April 12, 2025

**Author's information:**
Andrei A. BELIAEV — Postgraduate Student; belyaevaa@list.ru
Dmitry P. KONONOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; d_kononov@mail.ru
Anton M. KUDRIN — Postgraduate Student; anton_kudrin@mail.ru

УДК 656.212

# К вопросу закрепления вагонов при маневровой работе

**В. И. Смирнов, С. А. Видюшенков**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Смирнов В. И., Видюшенков С. А.* К вопросу закрепления вагонов при маневровой работе // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 300–307. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-300-307

## Аннотация

**Цель:** Проверить возможность перекатывания вагонов через тормозные башмаки при маневрах с целью обеспечить корректный расчет необходимого числа тормозных башмаков при учете физических характеристик закрепляемого подвижного состава и параметров продольного профиля пути. **Методы:** Применены методы моделирования и анализа. Моделирование движения вагонного отцепа перед соударением основано на численном решении дифференциального уравнения. Анализ возможности перекатывания вагонов через тормозной башмак проводится с энергетической позиции. **Результаты:** Рассмотрен пример из эксплуатационной практики: движение группы из 25 груженых цистерн, ее соударение со стоящей на пути группой таких же груженых цистерн, состоящей из 41 вагона. При типовых условиях маневровой работы при проталкивании локомотивом состава, закрепленного башмаками, должно происходить скольжение башмака по рельсу. Однако на практике встречаются случаи так называемого «приваривания» башмака к рельсу, то есть резкого возрастания коэффициента трения, что приводит к перекатыванию колеса через башмак. Показано, что в условиях продавливания вагонного отцепа локомотивом возможно перекатывание колес через тормозной башмак. При ударе перескок колес вагонов через башмаки в рассмотренных условиях представляется маловероятным. Выполненные расчеты относятся к двубортным тормозным башмакам, в случае однобортных башмаков повышается вероятность его выброса при наезде колеса. Числовой пример рассмотрен в предположении, что колебания жидкости в цистернах практического влияния на динамику движения подвижного состава при маневровых скоростях оказать не могут, но при соударении вызывают рассеивание кинетической энергии. **Практическая значимость:** Приведенный анализ позволяет уточнить нормы и способы закрепления подвижного состава при маневрах на станции.

**Ключевые слова:** Тормозной башмак, вагонный отцеп, маневровая работа, уравнение движения, скорость соударения, энергия отцепа.

## Введение

Несмотря на то, что в последние годы на станциях появились стационарные устройства для предотвращения самопроизвольного ухода вагонов [1, 2], тормозной башмак не теряет актуальности, так как позволяет закреплять подвижной состав в любом месте.

Различные варианты укладки тормозных башмаков рассмотрены в статье [3]. В работе [4] предложена автоматизированная методика расчета норм закрепления подвижного состава на станционных железнодорожных путях с учетом скорости и направления ветра. Результаты компьютерного моделирования динамического взаимодействия колес с установленными на рельсах тормозными башмаками в процессе остановки вагона грузового поезда с применением стандартных тормозных башмаков приведены в работе

[5]. В статье [6] представлено развитие методики расчета норм закрепления сочлененного и разнородного по длине подвижного состава.

В отличие от стационарного упора тормозной башмак представляет слабое препятствие при наезде и последующем движении группы вагонов, управляемой локомотивом. При большом количестве вагонов в группе машинист в силу значительной ее массы может даже не заметить установленные на пути башмаки. Такие случаи нередки в маневровой работе.

## Моделирование движения вагонного отцепа

Рассмотрим с энергетической позиции возможность перекатывания вагонов через группу тормозных башмаков. Такой анализ удобно выполнить на примере, являющимся типичным в маневровой практике.

Первоначально оценим скорость движения группы из 25 груженых цистерн перед соударением ее со стоящей на пути группой таких же груженых цистерн, состоящей из 41 вагона. После толчка локомотива 25-вагонный отцеп приобретает скорость $V_0$ =1,5 м/с и, двигаясь под уклон крутизной $i$ = 2 ‰, проходит путь перед соударением $L$ = 65 м.

Исходные данные для расчета следующие:

– масса груженой цистерны $m$ = 76,6 т;

– масса группы из 25 груженых цистерн $M$ = 25 · 76,6 = 1915 т;

– количество осей в отцепе $n$ = 25 · 4 = 100;

– ускорение силы тяжести с учетом инерции вращения колес:

$$g' = \frac{M\ g}{M + 0{,}925n}, \quad (g = 9{,}81\,\text{м/с}^2);$$

– основное удельное сопротивление движению вагонов в соответствии с Правилами тяговых расчетов [7] $w$ = 1 Н/кН;

– скорость попутного ветра $V_в$ = 5 м/с.

Уравнение движения отцепа имеет вид [8]:

$$V\frac{dV}{ds} + \text{sign}(V + V_в\cos\beta)\mu(V + V_в\cos\beta)^2 = \lambda, \tag{1}$$

где $V$ — скорость движения;

$V_в$ — скорость ветра;

$\beta$ — угол между направлением ветра и осью пути, по которому движется отцеп (угол атаки);

$s$ — пройденный путь (дуговая координата, $0 \le s \le L$, $L$ — длина пробега отцепа);

$\lambda$, $\mu$ — параметры, расшифровка которых приведена ниже:

$$\lambda = g'(i - w\cdot 10^{-3}), \quad \mu = c / M,$$

$c$ — аэродинамический коэффициент, т/м:

$$c = \frac{0{,}0667\,p}{287\cdot(273 + t^\circ)}\sum_{j=1}^{N} C_{xj}S_j,$$

где $C_{xj}$ — коэффициент воздушного сопротивления $j$-го вагона;

$S_j$ — площадь поперечного сечения $j$-го вагона, м$^2$;

$p$ — атмосферное давление, мм рт. ст.;

287 — удельная газовая постоянная для воздуха, Дж/(кг · К);

0,0667 — переводной коэффициент (масса вагона принимается в тоннах);

$t^\circ$ — расчетная температура воздуха, °С;

$M$ — масса отцепа.

Функция sign($x$) определена следующим образом

$$\text{sign}\left(V + V_в\cos\beta\right) = \begin{cases} +1, \text{если } V + V_в\cos\beta > 0; \\ \ \ 0, \text{если } V + V_в\cos\beta = 0; \\ -1, \text{если } V + V_в\cos\beta < 0. \end{cases}$$

Уравнение (1) решалось численным методом при следующем начальном условии: $V = V_0$ = = 1,5 м/с при $t$ = 0 — время. Температура воздуха принята равной $t^\circ$ = +17 °С, атмосферное давле-

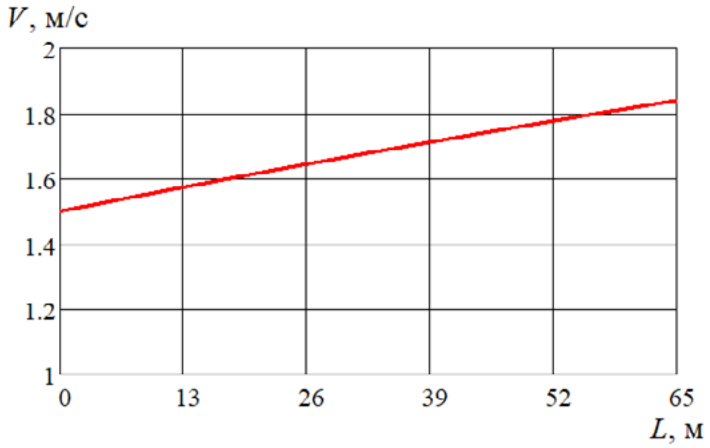



**Рис. 1.** Зависимость скорости 25-вагонного отцепа от расстояния пробега

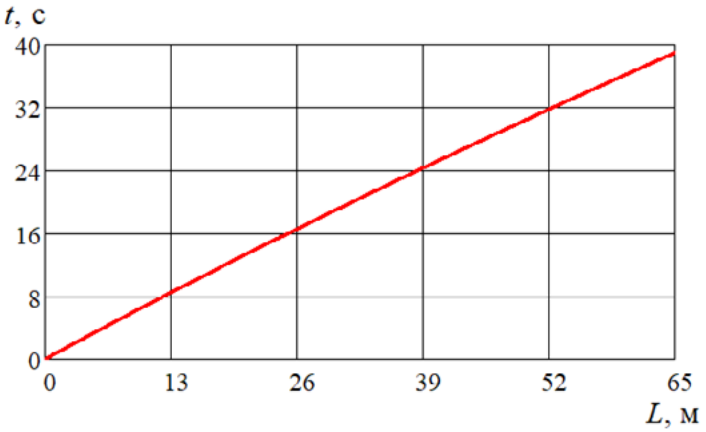



**Рис. 2.** Зависимость продолжительности движения 25-вагонного оцепа от расстояния пробега

ние $p$ = 760 мм рт. ст., β = 20°, $C_x$ = 0,96, $S$ = 9,8 м$^2$. Кривая времени определена интегрированием скорости:

$$t(s) = \int_0^s \frac{dx}{V(x)}.$$

График изменения скорости движения 25-вагонного отцепа приведен на рис. 1, а график времени движения — на рис. 2. Вычисления показывают, что скорость отцепа к моменту сцепления составляет 1,84 м/с, или 6,62 км/ч, что намного меньше допустимой скорости входа на тормозной башмак (4,5 м/с, или 16,2 км/ч, по ГОСТ 22235—76 [9]), то есть скорость соударения (сцепления) вагонов не представляет угрозы перескакивания колес через башмаки, даже при наезде отцепа на башмаки при отсутствии стоящих вагонов, так как начальная скорость сцепившегося 66-вагонного отцепа будет составлять 25/66 скорости, которую имел 25-вагонный отцеп перед соударением.

Кинетическая энергия 25-вагонного отцепа перед соударением со скоростью 1,84 м/с равна:

$$T = \frac{MV^2}{2} = \frac{1915 \cdot 1{,}84^2}{2} = 3{,}24 \text{ МДж}.$$

Энергоемкость поглощающих аппаратов грузовых вагонов составляет порядка 70 кДж. Поглощающие аппараты 41-вагонного отцепа (81 шт.) способны поглотить 5,67 МДж энергии.

Некоторая доля энергии расходуется на возбуждение продольных колебаний в сформирован-

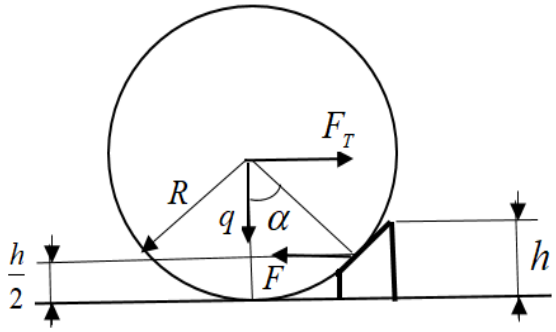



**Рис. 3.** Схема контакта колеса с тормозным башмаком

ном после соударения 66-вагонном составе (часть кинетической энергии 25-вагонного отцепа переходит в энергию продольных волн в хребтовых балках цистерн).

Кроме того, поскольку центры тяжести цистерн находятся выше осей автосцепок, в составе возбуждаются связанные колебания подергивания и галопирования (часть поступившей энергии переходит в эти колебания). Помимо этого, полагая, что определенная часть цистерн не полностью заполнена жидкостью, считаем, что некоторая доля энергии переходит в энергию колебательных движений жидкости в указанных цистернах. Часть энергии также рассеивается на вибрацию рельсошпальной решетки и земляного полотна. В таких условиях вся энергия 25-вагонного отцепа полностью рассеивается, и после соударения сцепившиеся вагоны останавливаются.

Оценим теперь скорость 25-вагонного отцепа, при которой может начаться движение сцепившихся вагонов. Если все упруго-фрикционные аппараты 41-вагонного неподвижного отцепа раскрыты (все автосцепки осаживаемого 25-вагонного отцепа предполагаются закрытыми) и суммарное рассеяние энергии на все перечисленные виды потерь составляет 10 % от исходной энергии, то начальная кинетическая энергия движущегося отцепа должна составлять 5,67 / 0,9 = 6,3 МДж, что соответствует скорости его движения 9,4 км/ч. Если же после сцепления групп вагонов осаживание продолжается, то описанные выше динамические процессы не происходят, а потери энергии на преодоление всех сопротивлений при постоянной скорости движения состава компенсируются за счет энергии локомотива.

Определим величину дополнительного усилия, которое необходимо приложить со стороны локомотива к цистерне, чтобы перевалить ее через башмак. Для этого рассмотрим взаимодействие колесной пары и башмака (рис. 3).

Из рис. 3 следует, что:

$$\cos\alpha = \frac{R - h/2}{R} = \frac{0,5 - 0,1/2}{0,5} = 0,9,$$

где $h$ — высота тормозного башмака (колодки);

$R$ — радиус колеса.

Отсюда

$$\alpha = \arccos\frac{R - h/2}{R} = \arccos 0,9 = 26°.$$

Искомая сила, которую следует приложить локомотиву, чтобы перевалить одно колесо 4-осной цистерны через башмак, найдем из выражения:

$$F = q \cdot \mathrm{tg}\,\alpha = \frac{mg}{8} \cdot \mathrm{tg}\,\alpha =$$
$$= \frac{76\,600 \cdot 9,81}{8}\,\mathrm{tg}\,26° = 45,81\ \text{кН}.$$

Здесь $q = mg / 8$ — нагрузка на колесо. Для перевалки трех цистерн эта сила составит 45,81 · 3 = = 137,43 кН.

Определим минимальную кинетическую энергию 66-вагонного отцепа, которой он должен обладать для того, чтобы «перескочить» через 5 башмаков, установленных с накатом (согласно Инструкции [10]).

Учитывая то, что башмаки установлены на одной нитке пути, центр тяжести одной цистерны при перевалке через башмак должен приподняться на высоту $h/2$. Потенциальная энергия одной цистерны увеличится на

$$\Delta\Pi_1 = mg\frac{h}{2}.$$

Так как пять тормозных башмаков установлены под тремя цистернами, суммарная потенциальная энергия трех цистерн при перевалке через башмаки составит:

$$\Delta\Pi = 3mg\frac{h}{2}.$$

Пренебрегая потерями энергии при перевалке отцепов через башмаки, на основании закона сохранения энергии имеем:

$$M_{66}\frac{V_{66}^2}{2} = 3mg\frac{h}{2}.$$

или

$$V_{66} = \sqrt{\frac{3mgh}{M_{66}}} = \sqrt{\frac{3\cdot 76600\cdot 9,81\cdot 0,1}{76600\cdot 66}} =$$
$$= 0,21 \text{ м/с}.$$

Таким образом, для перевалки через пять тормозных башмаков, уложенных с накатом, 66-вагонный отцеп должен иметь скорость 0,21 м/с (0,8 км/ч) (при семи башмаках эта скорость составит 0,24 м/с, или 0,88 км/ч).

**Обсуждение результатов и выводы**

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что кинетическая энергия состава в рассмотренном примере вполне может превышать потребную для перекатывания через башмаки потенциальную энергию, что приведет к перекатыванию колес через тормозные башмаки в условиях продавливания состава. И наоборот, перескок колес вагонов через башмаки при ударе представляется в заданных условиях маловероятным. Возможно лишь незначительное скольжение тормозных башмаков по рельсу (юз).

К такому же выводу можно прийти путем сопоставления механических моментов сдвига/удержания колеса относительно точки перекатывания через башмак.

Условие отсутствия перекатывания через башмак имеет вид:

$$M_{\text{с}} < M_{\text{у}},$$

где $M_c$, $M_y$ — момент сдвига и удерживающий момент соответственно.

$$M_{\text{с}} = F_{\text{Т}}(R-h), \quad M_{\text{у}} = q\sqrt{2Rh-h^2}, \qquad (2)$$

где $F_{\text{Т}}$ — сила тяги (нажатия) локомотива;

$q$ — нагрузка на колесо. Моменты определены относительно верхней точки колодки башмака (рис. 3).

Для $k$ башмаков из выражений (2) получаем условие неперекатывания колес через башмаки:

$$F_{\text{Т}} < \frac{\sqrt{2Rh-h^2}}{R-h}\sum_{i=1}^{k} q_i. \qquad (3)$$

Для рассматриваемого примера имеем: $q_i = q = 94$ кН, $R = 0,5$ м, $k = 5$, $h \approx 0,1$ м. Тогда $F_{\text{Т}} < 352,5$ кН.

Сила сопротивления от 66 вагонов составит:

$$F_w = Q\cdot w = (76,6\cdot 66\cdot 9,81)\cdot 1,0 = 49,6 \text{ кН},$$

где $Q$ — вес отцепа.

Таким образом, суммарная сила сопротивления перекатыванию через башмак равна:

$$F_T + F_w = 352,5 + 49,6 \approx 402 \text{ кН},$$

что составляет, например, для локомотива ТЭМ7 75 % от его касательной силы тяги (540 кН).

В нормальных условиях при проталкивании локомотивом состава, закрепленного башмаками, должно происходить скольжение башмака по рельсу. Суммарная сила трения скольжения применительно к принятым исходным условиям при одинаковой нагрузке на ось составит:

$$F_{\text{ТР}} = f\cdot q\cdot k = 0,17\cdot 94\cdot 5 \approx 80 \text{ кН},$$

где $f = 0,17$ — коэффициент трения.

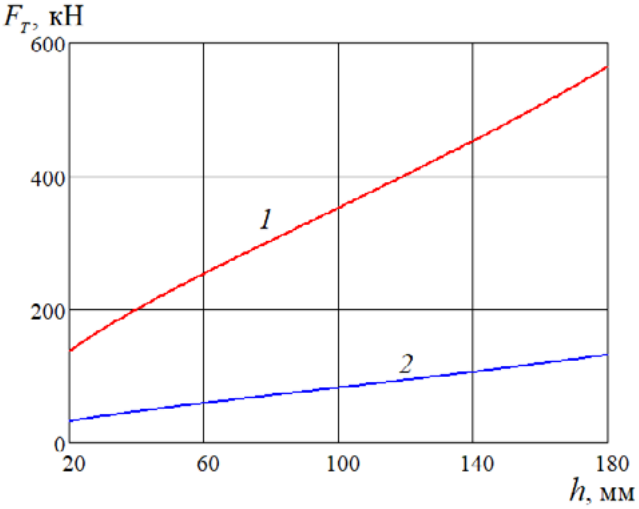



**Рис. 4.** Минимальная сила тяги в зависимости от высоты башмака:
*1* — груженая цистерна,
*2* — порожняя цистерна

Таким образом, сила трения в данном случае оказывается примерно в пять раз меньше силы, требуемой для перекатывания через башмак. Тем не менее в маневровой практике встречаются случаи так называемого «приваривания» башмака к рельсу, то есть резкого возрастания коэффициента трения, что и приводит к перекатыванию колеса через башмак. Очевидно, что вероятность перекатывания колеса через башмак возрастает при наличии загрязнений на его поверхности (масло, мазут, лед и т. п.).

Необходимо отметить, что в маневровой практике нельзя исключать случаев применения различных моделей тормозных башмаков с разной высотой колодки $h$. На рис. 4 показана зависимость потребной силы тяги локомотива от высоты колодки башмака, построенная согласно формуле (3) для рассматриваемого примера ($q$ = 94 кН, $k$ = 5). Диапазон изменения высоты колодки принят, как и в работе [11], равным 20–180 мм. Для сравнения на этом же рисунке показана аналогичная зависимость для порожней цистерны ($q$ = 27 кН). В этом случае, как видно, риск переката колеса через башмак заметно возрастает.

## Заключение

Приведенный анализ, очевидно, относится к двубортным тормозным башмакам. В случае однобортных башмаков повышается вероятность их выброса при наезде. Отметим, что колебания жидкости в цистернах практического влияния на динамику движения подвижного состава при маневровых скоростях оказать не могут, но при соударении вызывают рассеяние кинетической энергии.

## Список источников

1. Исаев К. С. Упоры для механизированного закрепления подвижного состава / К. С. Исаев, В. П. Шейкин, В. М. Сорокодумов, М. Ф. Бобылев // Автоматика, телемеханика и связь. — 1996. — № 1. — С. 25–27.

2. Малахов А. И. О технических средствах для закрепления подвижного состава на станционных путях / А. И. Малахов, Ю. А. Хахишвили // Вестник Липецкого государственного технического университета. — 2020. — № 1(42). — С. 49–53.

3. Ильин А. М. Многовариантная верификационная методика расчета норм закрепления подвижного состава на железнодорожных путях станций / А. М. Ильин, О. Н. Числов // Вестник РГУПС. — 2020. — № 3. — С. 115–123.

4. Похилко С. П. Автоматизация методики расчета норм закрепления подвижного состава на станционных путях / С. П. Похилко, И. С. Иванченко // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. — 2020. — № 59. — С. 27–38.

5. Шимановский А. О. Компьютерное моделирование динамики взаимодействия колесных пар вагонов с тормозными башмаками / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова, О. В. Демьянчук // Механика машин, механизмов и материалов. — 2021. — № 4(57). — С. 48–55.

6. Числов О. Н. Совершенствование методологических и технико-технологических решений по закреплению перспективных видов подвижного состава на станционных железнодорожных путях / О. Н. Числов, А. М. Ильин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2022. — № 1(60). — С. 38–48.

7. Правила тяговых расчетов для поездной работы. — М.: Транспорт, 1980. — 287 с.

8. Смирнов В. И. Динамические особенности скатывания вагонов с сортировочной горки / В. И. Смирнов, С. А. Видюшенков, А. С. Кухарева // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — Т. 16. — Вып. 2. — С. 241–250.

9. ГОСТ22235—76. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. — М.: Издательство стандартов, 1978. — 35 с.

10. Инструкция по движению поездов и маневровой работе на железных дорогах Российской Федерации. ЦД-206. — М.: Транспорт, 2000. — 117 с.

11. Марков Д. П. Стояночные тормозные башмаки для закрепления подвижного состава на станционных путях. Полигонные испытания / Д. П. Марков, И. Н. Воронин, Н. П. Шипулин, В. И. Маршев и др. // Вестник ВНИИЖТ. — 2016. — Т. 75. — № 5. — С. 308–317.

Дата поступления: 24.02.2025
Решение о публикации: 23.03.2025

**Контактная информация:**
СМИРНОВ Владимир Игоревич — д-р техн. наук, проф.; vsmirnov1@gmail.com
ВИДЮШЕНКОВ Сергей Александрович — канд. техн. наук, доц.; baklava@mail.ru

## Securing Wagons During Shunting Operation

### V. I. Smirnov, S. A. Vidyushenkov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Smirnov V. I., Vidyushenkov S. A. Securing Wagons During Shunting Operation // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 300–307. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-300-307

### Summary

**Purpose:** To assess the possibility of wagons rolling over the brake shoes during shunting operations, with the aim of determining the number of brake shoes required, taking into account the physical characteristics of the secured wagons and the parameters of the longitudinal profile of the track. **Methods:** The modelling and analysis techniques were used. The simulation of the wagon cut movement before the collision was based on the numerical solution of the differential equation. The possibility of wagons rolling over the brake shoe was analyzed from the energy point of view. **Results:** The following example has been drawn from practical experience, namely, the movement of a group of 25 loaded tank cars and its collision with a group of 41 similarly loaded tank cars standing on the track. In a standard shunting operation, when a locomotive pushes a train secured by the shoes, the shoes should slide along the rail. However, in practice, there are cases of the so-called “welding” of the shoe to the rail. This is due to a significant increase in the coefficient of friction, which results in the wheel rolling over the shoe. It has been demonstrated that when a locomotive exerts pressure on a wagon cut, the wagon wheels could potentially roll over the brake shoe. In the event of an impact, it appears improbable that the wheels of the wagons will jump over the shoes under the conditions considered. There is a possibility of slight sliding of the brake shoes on the rail. The calculations performed are applicable to double brake shoes. In the case of single shoes, there is an increased potential for the brake shoe to be discarded during the wheel impact. A numerical example has been considered on the assumption that fluid fluctuations in tanks do not affect the dynamics of rolling stock movement at shunting speeds. However, during the collision, these fluctuations cause the dissipation of kinetic energy. **Practical significance:** The aforementioned analysis has enabled the establishment of clear standards and procedures for securing wagons during shunting operations at the station.

**Keywords:** Brake shoe, wagon cut, shunting operation, equation of motion, collision velocity, wagon cut energy.

## References

1. Isaev K. S., Sheykin V. P., Sorokodumov V. M., Bobylev M. F. Upory dlya mekhanizirovannogo zakrepleniya podvizhnogo sostava [Stops for mechanized fastening of rolling stock]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz'* [Automation, telemetry and communication]. 1996, Iss. 1, pp. 25–27. (In Russian)

2. Malakhov A. I., Khakhishvili Yu. A. O tekhnicheskikh sredstvakh dlya zakrepleniya podvizhnogo sostava na stantsionnykh putyakh [On technical means for fastening rolling stock on station tracks]. *Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Lipetsk State Technical University]. 2020, Iss. 1(42), pp. 49–53. (In Russian)

3. Il'in A. M., Chislov O. N. Mnogovariantnaya verifikatsionnaya metodika rascheta norm zakrepleniya podvizhnogo sostava na zheleznodorozhnykh putyakh stantsiy [Multivariant verification methodology for calculating the standards for fastening rolling stock on station tracks]. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of RGUPS]. 2020, Iss. 3, pp. 115–123. (In Russian)

4. Pokhilko S. P., Ivanchenko I. S. Avtomatizatsiya metodiki rascheta norm zakrepleniya podvizhnogo sostava na stantsionnykh putyakh [Automation of the methodology for calculating the standards for securing rolling stock on station tracks]. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport]. 2020, Iss. 59, pp. 27–38. (In Russian)

5. Shimanovskiy A. O., Kuznetsova M. G., Dem'yanchuk O. V. Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki vzaimodeystviya kolesnykh par vagonov s tormoznymi bashmakami [Computer modeling of the dynamics of interaction of car wheelsets with brake shoes]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials]. 2021, Iss. 4(57), pp. 48–55. (In Russian)

6. Chislov O. N., Il'in A. M. Sovershenstvovanie metodologicheskikh i tekhniko-tekhnologicheskikh resheniy po zakrepleniyu perspektivnykh vidov podvizhnogo sostava na stantsionnykh zheleznodorozhnykh putyakh [Improvement of methodological and technical-technological solutions for securing promising types of rolling stock on station railway tracks]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Railway Engineering]. 2022, Iss. 1(60), pp. 38–48. (In Russian)

7. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [Rules for traction calculations for train operation]. Moscow: Transport Publ., 1980, 287 p. (In Russian)

8. Smirnov V. I., Vidyushenkov S. A., Kukhareva A. S. Dinamicheskie osobennosti skatyvaniya vagonov s sortirovochnoy gorki [Dynamic features of wagons rolling off a marshalling hump]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering]. 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 241–250. (In Russian)

9. GOST22235—76. *Vagony gruzovye magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm* [GOST 22235—76. Freight cars of mainline railways with a gauge of 1520 mm]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1978, 35 p. (In Russian)

10. *Instruktsiya po dvizheniyu poezdov i manevrovoy rabote na zheleznykh dorogakh Rossiyskoy Federatsii. TsD-206* [Instructions for train movement and shunting operations on the railways of the Russian Federation. CD-206]. Moscow: Transport Publ., 2000, 117 p. (In Russian)

11. Markov D. P., Voronin I. N., Shipulin N. P., Marshev V. I. et al. Stoyanochnye tormoznye bashmaki dlya zakrepleniya podvizhnogo sostava na stantsionnykh putyakh. Poligonnye ispytaniya [Parking brake shoes for securing rolling stock on station tracks. Field tests]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Railway Transport]. 2016, vol. 75, Iss. 5, pp. 308–317. (In Russian)

Received: February 24, 2025
Accepted: March 23, 2025

**Author's information:**
Vladimir I. SMIRNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; vsmirnov1@gmail.com
Sergey A. VIDYUSHENKOV — PhD of Engineering, Associate Professor; baklava@mail.ru

УДК 656.27

# Модель задачи функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий на различных этапах жизненного цикла их работы

**К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Ковалев К. Е., Новичихин А. В.* Модель функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий на различных этапах жизненного цикла их работы // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 308–315. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-308-315

## Аннотация

**Цель:** Повышение эффективности функционирования железнодорожной транспортной сети за счет разработки инструмента, позволяющего осуществлять выбор между вариантами функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий. **Методы:** Применены методы теории управления, теории транспортных процессов, системного анализа и динамического программирования. **Результаты:** Разработан инструментарий интегральной оценки эффективности малоинтенсивных железнодорожных линий на различные горизонты планирования. **Практическая значимость:** Предлагаемый инструментарий позволяет осуществлять прогноз альтернативных этапов жизненного цикла эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе интегрального набора технических, технологических и экономических показателей.

**Ключевые слова:** Малоинтенсивные железнодорожные линии, динамическое программирование, транспортная сеть, показатели работы транспорта.

## Введение

Малоинтенсивные железнодорожные линии (МИЛ) являются сложным объектом управления в железнодорожной транспортной системе [1, 2]. Экономические факторы, взывающие изменение спроса на перевозки [3, 4], необходимость технического переоснащения и оптимизации перевозочного процесса требуют применения методов, которые позволяют формировать и оценивать различные варианты функционирования таких линий. Для МИЛ выделены четыре основных этапа жизненного цикла эксплуатации, которые включают в себя: поиск новой грузовой базы; модернизацию; временную консервацию; демонтаж.

«Поиск новой грузовой базы» реализуется с учетом существующих и перспективных мощностей предприятий, привлечения новых клиентов, а также за счет оказания транспортно-логистических, терминально-складских и экспедиторских услуг.

«Модернизация» включает в себя изменение технологии эксплуатации работы МИЛ (режим работы линии и станций), совмещение профессий работников на линии, изменение технологии обслуживания станций и линий в зависимости от размеров перевозок, технологическое переоснащение систем управления движением поездов на участке в целях упрощения и снижения затрат на их эксплуатацию.

«Временная консервация» включает закрытие железнодорожных линий для движения поездов. Для закрытия железнодорожных путей общего пользования, в том числе МИЛ, владелец инфраструктуры оправляет в Министерство транспорта Российской Федерации письменное предложение о закрытии железнодорожных путей с указанием: сведений о владельце инфраструктуры; адреса; государственного регистрационного номера записи о государственной регистрации юридического лица. К предложению в произвольной форме прилагаются: технико-экономическое обоснование закрытия железнодорожных путей; предложение субъекта Российской Федерации по вопросу закрытия железнодорожных путей; данные об объемах и характере грузовой и пассажирской работы; сведения о технической характеристике и точном местонахождении железнодорожных путей, подлежащих закрытию; схема железнодорожных путей, подлежащих закрытию; информация о наличии пассажирского движения поездов, а также грузоотправителей и грузополучателей, осуществляющих грузовые операции с использованием железнодорожных путей, подлежащих закрытию; сведения о предполагаемых изменениях в технологии обслуживания пассажиров, грузоотправителей и грузополучателей при закрытии железнодорожных путей, включая расчет возможного изменения тарифной нагрузки в случае переноса операций на другие железнодорожные пути и оценку возможности их обслуживания другими видами транспорта на соответствующем направлении; расчет затрат на проведение мероприятий по закрытию железнодорожных путей [5].

«Демонтажу» подлежат МИЛ, которые длительное время находятся в консервации и не подлежат восстановлению для организации движения в связи с отсутствием спроса на пассажирские и грузовые перевозки.

При этом отсутствуют инструменты классификации и отнесения МИЛ к какому-то из вариантов функционирования и возможности перехода из одного варианта к другому. А также отсутствует возможность прогноза на краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный горизонт планирования по существующим вариантам функционирования МИЛ. В зависимости от горизонтов планирования выделяют долгосрочное, среднесрочное и краткосрочное планирование работы МИЛ.

Долгосрочное планирование работы МИЛ формирует стратегические перспективы работы линии и плановые показатели финансового результата линии, инфраструктурную модернизацию в соответствии с потребностями в перевозках [6–8]; определяет возможность развития логистических узлов и терминалов; рассматривает оптимизацию маршрутов и грузопотоков с интеграцией в крупные международные транспортные коридоры. Разрабатывает инструменты привлечения крупных грузоотправителей на полигоне МИЛ с учетом динамики изменений грузопотоков.

Среднесрочное планирование работы МИЛ состоит в повышении экономической эффективности и эксплуатационной надежности путем снижения затрат на эксплуатацию и обслуживание линий, оптимизации режима работы линии, а также привлечения новой грузовой базы.

Краткосрочное планирование работы МИЛ состоит в решении текущих задач эксплуатации и обеспечения стабильной работы, включающих проведение регламентных работ по поддержанию инфраструктуры, оптимизацию существующей технологии перевозочного процесса, реализуемой на участке. Поиск инструментов экономически эффективного перераспределения грузопотоков с интенсивных направлений линий на МИЛ. Анализ статей доходов и расходов линии. Подготовка линии к работе в зимних условиях эксплуатации.

Краткосрочное планирование МИЛ состоит в поддержании работоспособности линии. Среднесрочное планирование является платформой

для достижения долгосрочной стратегии. Долгосрочная стратегия обеспечивает траекторию стабильной эксплуатации МИЛ для увеличения срока активной эксплуатации такой линии.

Таким образом, требуется разработка модели определения этапов жизненного цикла эксплуатации и возможного перехода между ними на основе набора технических, технологических и экономических аспектов эксплуатации линий с учетом временной динамики. В статье приводятся математическая постановка задачи, инструменты ее решения и результаты модельных экспериментов оценки интегрального показателя эффективности МИЛ для различных горизонтов планирования.

## 1. Постановка задачи определения интегрального показателя эффективности для этапов жизненного цикла эксплуатации МИЛ

На полигоне железной дороги имеются $x$ МИЛ, требуется повысить эффективность функционирования таких линий на основе совокупности технических, технологических и экономических показателей.

Пусть дано $s_t^x(t) \in \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ — состояния железнодорожной линии в момент времени $t$, где $S_1$ — линия находится в режиме поиска грузовой базы; $S_2$ — линия модернизируется и функционирует; $S_3$ — линия законсервирована; $S_4$ — линия демонтирована.

При этом $a_t \in \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ — действия, принимаемые в момент времени $t$, где $A_1$ — перейти к поиску грузовой базы; $A_2$ — провести модернизацию; $A_3$ — законсервировать линию; $A_4$ — демонтировать линию.

Требуется по набору технических, технологических и экономических показателей определить эффективность функционирования МИЛ при выборе альтернативных этапов жизненного цикла эксплуатации таких линий с учетом временной динамики, учитывающей эффективность реализуемых мероприятий. Решение задачи выполняется поэтапно.

**Этап 1.** Интегральный показатель эффективности характеризуется набором показателей надежности железнодорожной инфраструктуры, грузонапряженностью и финансовым результатом. Функция $\pi = \{a_1, a_2, \ldots, a_t\}$ задает выбор действий $a_t$ в каждый момент времени $t$ (принимаемый равным шагу в один месяц) исходя из текущего состояния $s_t$.

Для этого вводим интегральный показатель эффективности $E(s_t, a_t)$, который отражает эффективность определенного действия $a_t$, выполненного в состоянии $s_t$ с учетом трех ключевых компонентов: коэффициента надежности железнодорожной инфраструктуры ($T_{\text{тех}}$); технологической эффективности МИЛ (грузонапряженность не более 5 млн т-км брутто/км ($T_{\text{техн}}$); финансового результата, млн руб./год ($T_{\text{экон}}$).

Интегральный показатель рассчитывается как взвешенная сумма элементов:

$$E(s_t, a_t) = w_{\text{тех}} T_{\text{тех}} + w_{\text{техн}} T_{\text{техн}} + w_{\text{экон}} T_{\text{экон}}, \quad (1)$$

где $w_{\text{техн}}, w_{\text{техн}}, w_{\text{экон}}$ — весовые коэффициенты, определяемые в относительных единицах, отражающие относительную значимость каждого из компонентов по мультипликативной свертке взаимозависимых переменных.

Для сценария поиска грузовой базы значения компонентов определяются по 10-балльной шкале. Инфраструктура находится в хорошем состоянии, отказы технических средств и неисправности происходят редко) ($T_{\text{тех}} = 8$); грузонапряженность низкая из-за недостаточной грузовой базы ($T_{\text{техн}} = 4$); финансовый результат низкий из-за недостаточной грузовой базы) ($T_{\text{экон}} = 4$).

Весовые коэффициенты определены экспертной оценкой со следующими значениями $w_{\text{тех}} = 0,3$; $w_{\text{техн}} = 0,3$; $w_{\text{экон}} = 0,4$, таким обра-

зом, $E(s_t, a_t) = 5,2$ для сценария поиска грузовой базы. Таблица эффективности для всех $s_t$ и $a_t$ строится аналогично, с учетом особенностей каждого состояния и действия (табл. 1).

Таблица 1. Интегральные показатели этапов жизненного цикла эксплуатации МИЛ

| Варианты | Поиск грузовой базы | Модернизация | Консервирование | Демонтаж |
|---|---|---|---|---|
| Поиск грузовой базы | 5,2 | 4,3 | 2,4 | 1,4 |
| Модернизация | 4,3 | 4,1 | 2,3 | 1,3 |
| Консервирование | 2,4 | 2,3 | 2,1 | 1,2 |
| Демонтаж | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,1 |

Значение ценности текущего состояния $s_t$ на шаге $t$ определяется как максимальная ожидаемая эффективность от выбора действия $a_t$, состоящая из текущей интегральной эффективности $E(s_t, a_t)$ и ожидаемой дисконтированной ценности будущих состояний, которая учитывает вероятность перехода в состояние $s_{t+1}$ и его ценности в следующем периоде $V_{t+1}(s_{t+1})$ с использованием уравнения Беллмана [9]:

$$V_t(s_t) = \max_{a_t} [E(s_t, a_t) + \\ + \beta \sum_{t+1} P(s_{t+1} | s_t, a_t) V_{t+1}(s_{t+1}) + V_t(s_t))], \quad (1)$$

где $V_t(s_t)$ — максимальная ценность состояния $s_t$ на шаге $t$;

$\max_{a_t}$ — поиск действия $a_t$, которое максимизирует значение в скобках;

$E(s_t, a_t)$ — интегральный показатель эффективности;

$\beta$ — коэффициент дисконтирования $0 < \beta < 1$, отражающий снижение ценности будущих результатов по сравнению с текущими, выраженных в интегральном показателе;

$P(s_{t+1} | s_t, a_t)$ — вероятность перехода из состояния $s_t$ в состояние $s_{t+1}$, если выбрано действие $a_t$;

$V_{t+1}(s_{t+1})$ — оптимальная ценность состояния $s_{t+1}$ в следующем периоде.

Выражение (1) позволяет определить последовательность действий $a_t$ на каждом шаге времени $t$ (принимаемом равным месяцу), которое максимизирует текущий интегральный показатель эффективности. При этом задан ряд ограничений:

1. Переход между этапами возможен только в один из альтернативных этапов.
2. Из этапа «демонтаж» нет перехода в альтернативные этапы.
3. Этап «модернизации» может быть реализован из «поиска грузовой базы» или «консервирования».
4. Начальное состояние известно $s_1$.
5. Временной горизонт является конечным.

Для решения представленной задачи использован метод динамического программирования. Поиск оптимальной стратегии $\pi$ состоит в инициализации функции эффективности $V(s_t) = E(s_t)$ для конечного момента времени $T$ и итеративном определении значения $V(s_t)$ для всех состояний $s_t$, с использованием разработанной программы на языке программирования Python (библиотеки numpy для расчетов и matplotlib для построения графиков).

**Этап 2.** Определение вероятности перехода между этапами жизненного цикла:

$$P_{ij}(t) = P(s_{t+1} = j \mid s_t = i, a_t), \quad (3)$$

где $P_{ij}(t)$ — вероятность перехода из состояния $i$ в состояние $j$ в момент $t$;

$s_t$ — текущее состояние;

$s_{t+1}$ — следующее состояние, позволяющее определить эффективность выбранного этапа жизненного цикла эксплуатации МИЛ.

**Этап 3.** Эффективность функционирования МИЛ определяется накоплением значений эффек-

тивности всех решений на выбранном горизонте планирования по выражению:

$$E_T = \sum_{t=0}^{T} \sum_{s \in S} \max_{a_t} [E(s_t, a_t) + \\ + \beta \sum_{s'} P(s' | s, a_t) V_{t+1}(s')]. \quad (4)$$

**Этап 4.** Модельные эксперименты и отбор решений. Построение графиков, отражающих динамическое значение интегрального показателя эффективности и вероятности перехода между этапами.

## 2. Определение интегрального показателя эффективности эксплуатации МИЛ на различные горизонты планирования

Решение задачи для определения интегрального показателя эффективности эксплуатации МИЛ на различные горизонты планирования на основе выражений (1) — (4) реализовано с помощью программы на языке программирования Python (библиотеки numpy для этапов 1–3 и matplotlib для этапа 4).

В качестве исходных данных был определен набор показателей для МИЛ: коэффициент надежности железнодорожной инфраструктуры; грузонапряженность; финансовый результат. Проведен комплекс модельных экспериментов для краткосрочного (12 месяцев), среднесрочного (до 5 лет) и долгосрочного планирования (30 лет) для условий полигона Октябрьской железной дороги, результаты моделирования представлены в табл. 2.

Для краткосрочного горизонта планирования наиболее эффективным этапом жизненного цикла эксплуатации МИЛ является «модернизация», что связано с высоким потенциалом линии и возможностью роста эффективности за счет небольших вложений в инфраструктуру. Вероятность перехода между сценариями отсутствует. Этапы жизненного цикла эксплуатации МИЛ «консервация» или «демонтаж» на этом горизонте планирования показывают низкую эффективность. На краткосрочном горизонте планирования целесообразно осуществлять мероприятия по «привлечению грузовой базы» и «модернизации» линии.

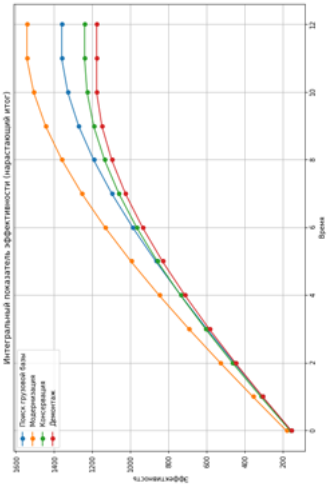
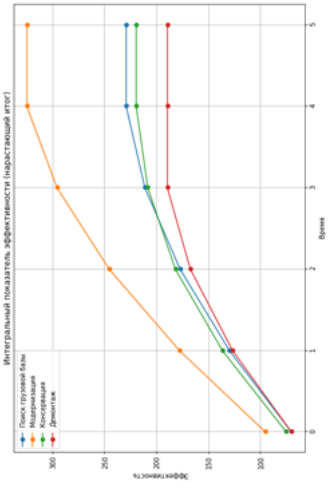
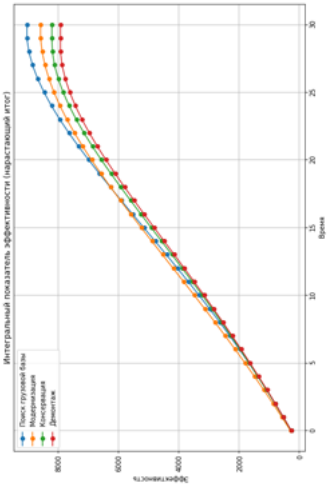
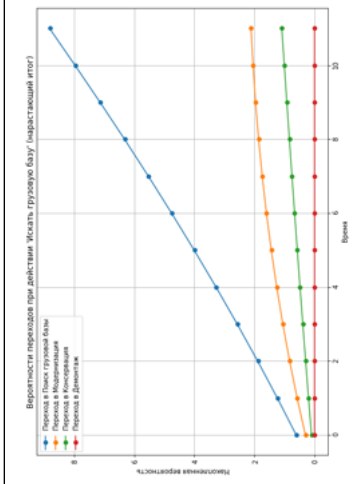
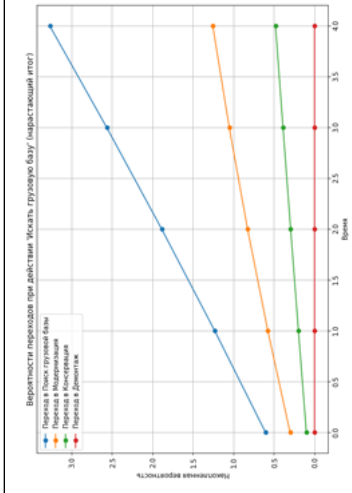
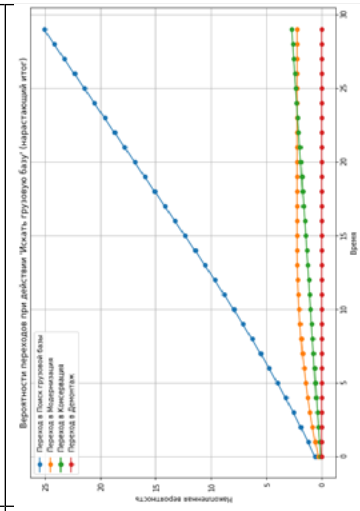
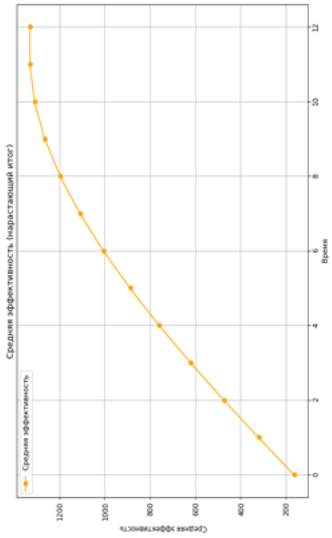
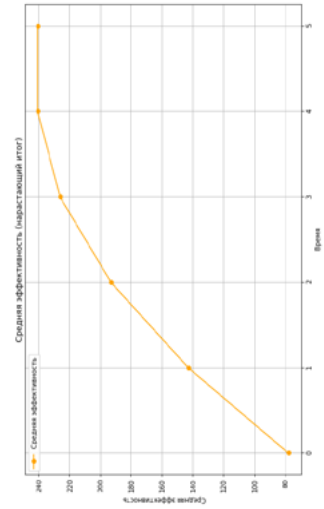
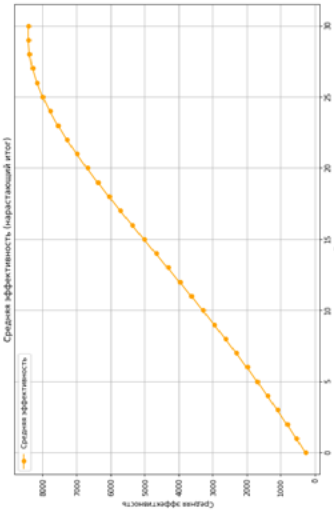
Для среднесрочного горизонта планирования наиболее эффективным является «модернизация» технического оснащения МИЛ. На горизонте 2–3 лет появляется возможность перехода между «поиском грузовой базы» и «консервированием», но «поиск грузовой базы» имеет большее значение интегрального показателя эффективности по сравнению с «консервированием». «Консервирование» начинает показывать свою эффективность при уменьшении грузовой базы.

Для долгосрочного горизонта планирования «поиск грузовой базы» имеет наибольшее значение интегрального показателя эффективности. «Модернизация» начинает терять свою эффективность при низком спросе на перевозки и пересекается со сценарием «консервирования» на горизонте планирования 20–25 лет, что может быть учтено при разработке долгосрочной программы развития МИЛ. «Консервация» и «демонтаж» становятся обоснованными, когда спрос на транспортировку минимален, а «модернизация» неэффективна.

## Заключение

Предложена модель задачи определения эффективности функционирования МИЛ на различных этапах жизненного цикла с применением динамического программирования на краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный горизонт планирования с учетом технических, технологических и экономических показателей работы МИЛ. Наиболее перспективным вариантом функционирования МИЛ является поиск новой грузовой базы, что повышает общий спрос на перевозки.

Таблица 2. Результаты моделирования

| Горизонт планирования | Краткосрочный (12 месяцев) | Среднесрочный (5 лет) | Долгосрочный (30 лет) |
|---|---|---|---|
| Интегральный показатель эффективности |  |  |  |
| Вероятность перехода между сценариями |  |  |  |
| Эффективность функционирования МИЛ |  |  |  |

Результаты моделирования целесообразно использовать при разработке программ повышения эффективности эксплуатации МИЛ на различные горизонты планирования для развития железнодорожной транспортной системы и поддержания экономической активности в регионах.

## Список источников

1. Вакуленко С. П. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий: монография / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова, Д. Ю. Роменский и др.; под ред. С. П. Вакуленко. — М.: ВИНИТИ РАН, 2018. — 218 с.

2. Шарапов С. Н. Классификация и специализация железнодорожных линий — основа оптимизации эксплуатационных расходов / С. Н. Шарапов, М. В. Лялько // Железнодорожный транспорт. — 2016. — № 7. — С. 50–60.

3. Числов О. Н. К вопросу моделирования инфраструктурно-технологического взаимодействия в транспортных узлах / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева // Вестник транспорта Поволжья. — 2023. — № 3(99). — С. 86–91.

4. Тимухина Е. Н. Повышение экономической эффективности функционирования существующих систем железнодорожного транспорта за счет применения уточненного подхода к расчету перерабатывающей способности обслуживающих устройств / Е. Н. Тимухина, Н. В. Кащеева, В. С. Колокольников, А. А. Кощеев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 2(49). — С. 26–33.

5. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении порядка закрытия железнодорожных путей общего пользования, в том числе малоинтенсивных линий и участков» от 30 мая 2023 года № 198.

6. Осинцев Н. А. Концепция гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкуров, С. Н. Корнилов и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 1(93). — С. 90–104.

7. Ковалев К. Е. Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодеятельных линиях / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 2. — С. 252–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267.

8. Ковалев К. Е. Оценка рисков при эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 4(96). — С. 161–172.

9. Беллман Р. Динамическое программирование / Беллман Р.; пер. с англ. И. М. Андреевой и др.; под общ. ред. Н. Н. Воробьева. — М.: Изд-во иностр. лит., 1960. — 400 с.

Дата поступления: 27.02.2025
Решение о публикации: 12.04.2025

**Контактная информация:**
КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич — канд. техн. наук; kovalev@pgups.ru
НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, доц.; novitchihin@bk.ru

# Modelling the Functioning of Low-Intensity Railway Lines at Different Phases of Their Life Cycle

**K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Modelling the Functioning of Low-Intensity Railway Lines at Different Phases of Their Life Cycle // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 308–315. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-308-315

## Summary

**Purpose:** To improve the efficiency of the rail network by developing a tool to select between options for the operation of low-intensity rail lines. **Methods:** Methods of control theory, theory of transport processes, system analysis and dynamic programming were applied. **Results:** A toolkit has been developed for the integrated assessment of the efficiency of low-intensity railway lines for different planning horizons. **Practical significance:** The proposed toolkit allows the forecasting of alternative phases of the life cycle of low-intensity railway lines based on an integrated set of technical, technological and economic indicators.


**Keywords:** Low-intensity railway lines, dynamic programming, transport network, transport performance indicators.

## References


1. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Yu., Romenskiy D. Yu. et al. *Effektivnost' ekspluatatsii i obsluzhivaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy: monografiya; pod red. S. P. Vakulenko* [Efficiency of operation and maintenance of low-intensity railway lines: monograph; edited by S. P. Vakulenko]. Moscow: VINITI RAN Publ., 2018, 218 p. (In Russian)

2. Sharapov S. N., Lyal'ko M. V. Klassifikatsiya i spetsializatsiya zheleznodorozhnykh liniy — osnova optimizatsii ekspluatatsionnykh raskhodov [Classification and specialization of railway lines — the basis for optimizing operating costs]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2016, Iss. 7, pp. 50–60. (In Russian)

3. Chislov O. N., Mizgireva E. E. K voprosu modelirovaniya infrastrukturno-tekhnologicheskogo vzaimodeystviya v transportnykh uzlakh [On the issue of modeling infrastructure and technological interaction in transport hubs]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region]. 2023, Iss. 3(99), pp. 86–91. (In Russian)

4. Timukhina E. N., Kashcheeva N. V., Kolokol'nikov V. S., Koshcheev A. A. Povyshenie ekonomicheskoy effektivnosti funktsionirovaniya sushchestvuyushchikh sistem zheleznodorozhnogo transporta za schet primeneniya utochnennogo podkhoda k raschetu pererabatyvayushchey sposobnosti obsluzhivayushchikh ustroystv [Improving the economic efficiency of existing railway transport systems by applying a refined approach to calculating the processing capacity of service devices]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Railway Engineering]. 2019, Iss. 2(49), pp. 26–33. (In Russian)

5. *Prikaz Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii "Ob utverzhdenii poryadka zakrytiya zheleznodorozhnykh putey obshchego pol'zova-niya, v tom chisle malointensivnykh liniy i uchastkov" ot 30 maya 2023 goda № 198* [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation "On approval of the procedure for closing public railways, including low-intensity lines and sections" dated May 30, 2023 № 198]. (In Russian)

6. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N., Mishkurov P. N., Kornilov S. N. et al. Kontseptsiya gibridnoy mnogokriterial'noy modeli ustoychivoy tsepi postavok [Concept of a hybrid multicriteria model of a sustainable supply chain]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering]. 2024, Iss. 1(93), pp. 90–104. (In Russian)

7. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Kompleksnyy sinergetiko-indikatornyy podkhod k upravleniyu protsessami perevozok na intensivnykh i malodeyatel'nykh liniyakh [Integrated synergetic-indicator approach to managing transportation processes on intensive and low-intensity lines]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2021, vol. 7, Iss. 2, pp. 252–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267. (In Russian)

8. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Otsenka riskov pri ekspluatatsii malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy [Risk assessment in the operation of low-intensity railway lines]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State University of Railway Engineering]. 2024, Iss. 4(96), pp. 161–172. (In Russian)

9. Bellman R. *Dinamicheskoe programmirovanie; per. s angl. I. M. Andreevoy i dr.; pod obshch. red. N. N. Vorob'eva* [Dynamic programming; trans. from English by I. M. Andreeva et al.; under the general editorship of N. N. Vorobyov]. Moscow: Izd-vo inostr. lit. Publ., 1960, 400 p. (In Russian)


Received: February 27, 2025
Accepted: April 12, 2025

**Author's information:**
Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering; kovalev_kostia@mail.ru,
Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novitchihin@bk.ru

УДК 004.772

# Методика комплексной оценки качества функционирования сети передачи данных киберфизических систем ОАО «РЖД»

**А. А. Привалов [1], А. М. Болдинов [2]**

[1]Военная ордена Жукова академия войск национальной гвардии Российской Федерации, Российская Федерация, 198206, Санкт-Петербург, ул. Л. Пилютова, 1
[2]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Привалов А. А., Болдинов А. М.* Методика комплексной оценки качества функционирования сети передачи данных киберфизических систем ОАО «РЖД» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 316–328. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-316-328

## Аннотация

**Цель:** Разработка методики оценки качества функционирования сети передачи данных (СПД) киберфизической системы (КФС) ОАО «РЖД» в условиях кибервоздействий злоумышленников и возможных технических отказов. **Методы:** Методика построена на базе частных и обобщенных математических моделей. Включает в себя: математическую модель радиоканала с учетом процессов установления и поддержания соединения, модель кибервоздействия типа «отказ в обслуживании», модель обнаружения кибервоздействия с последующим восстановлением процесса передачи данных, модель передачи данных по различным маршрутам, модель узла связи в условиях кибервоздействий и возможных технических отказов, модель передачи данных по проводным каналам связи с использованием протокола TCP, а также комплексную модель СПД КФС ОАО “РЖД” в условиях кибервоздействий злоумышленников и технических отказов. **Результаты:** Разработанная методика позволяет оценивать качество функционирования СПД КФС ОАО “РЖД” в условиях кибервоздействий и технических отказов. Выработаны направления по предотвращению срывов передачи данных объектам управления КФС. Методика представлена в виде блок-схемы алгоритма, в которой каждый блок иллюстрирует расчет функции распределения времени на основе частных математических моделей. **Практическая значимость:** Предложенная методика предназначена для комплексной оценки качества функционирования СПД КФС ОАО «РЖД» в условиях кибервоздействий и технических отказов. Она может быть полезна научно-исследовательским организациям и предприятиям, занимающимся разработкой и совершенствованием беспилотных и роботизированных систем, поскольку обеспечивает подходы для разработки надежных и устойчивых сетей передачи данных.

**Ключевые слова:** Сеть передачи данных, сеть связи, методика, оценка качества функционирования, математическая модель.

## Введение

Железнодорожный транспорт является объектом критической информационной инфраструктуры (КИИ) и подвержен кибервоздействиям [1]. Сети передачи данных (СПД) обеспечивают оперативную и достоверную связь между объектами железнодорожного транспорта, а в киберфизических системах (КФС) играют ключевую роль в поддержании их работоспособности. В настоящее время отсутствуют методики, позволяющие оценивать вероятность своевременной доставки данных в СПД КФС ОАО «РЖД», что подчерки-

вает необходимость разработки подходов к комплексной оценке качества их функционирования.

Существуют исследования, посвященные аспектам защищенности СПД, анализу процессов функционирования сети и ее компонентов в различных условиях. Однако вопросы своевременной доставки данных часто остаются вне рассмотрения.

В работе [2] были предложены показатели устойчивости, основанные на связности графов. Сеть связи декомпозировалась на составные элементы, а устойчивость определялась вероятностью наличия хотя бы одного пути с требуемым качеством обслуживания (QoS).

В работе [3] представлена универсальная метрика для оценки эффективности сетей связи, основанная на соотношении полезного эффекта к затратам. Показатели качества были распределены по классам согласно заданным критериям, а в итоге получен обобщенный показатель Ливн, применимый для оценки объема сети. Однако при расчетах не учитывались важнейшие показатели, такие как время доставки данных и надежность.

Основным результатом работы [4] является методика оценки устойчивости сети специального назначения, включающая обобщенный показатель устойчивости функционирования. Однако в этой методике отсутствует учет кибервоздействий злоумышленников, что не позволяет использовать ее для комплексной оценки надежности и безопасности связи в сетях специального назначения.

Исследования [5–7] посвящены оценке качества функционирования телекоммуникационных сетей, но вопросы надежности передачи данных остались вне рассмотрения. Между тем требования к СПД могут существенно различаться в зависимости от их назначения. В частности, СПД КФС предъявляют особенно высокие требования к надежности и безопасности, которые превышают стандарты, применяемые к менее критичным объектам. Анализ работ [2–7] показывает, что оценка вероятности передачи данных за время, не превышающее заданное, в них не проводилась.

Согласно данным работы [8], уровень исходной защищенности СПД зависит прежде всего от ее технических и эксплуатационных характеристик. В применении к СПД КФС ОАО «РЖД» можно выделить факторы, снижающие ее защищенность:

1. Распределенность сети: СПД КФС ОАО «РЖД» охватывает несколько регионов, что делает ее уязвимой к внешним воздействиям и снижает уровень безопасности.

2. Многоточечный доступ к сетям общего пользования: СПД КФС имеет многочисленные точки доступа к сети общего пользования, используемой для обмена данными между подразделениями железнодорожного транспорта. Это повышает риск утечек и атак, снижая общий уровень защищенности.

3. Разнообразие операций с данными: СПД КФС выполняет широкий спектр операций, включая модификацию, обработку и передачу данных, что создает множество потенциальных точек уязвимости.

4. Интеграция со сторонними СПД: поскольку СПД КФС получает и передает данные между различными железнодорожными службами, она интегрирована в общую СПД, в которую могут входить сторонние системы, увеличивая риск несанкционированного доступа.

Эти особенности подчеркивают необходимость разработки методики оценки качества функционирования СПД КФС с учетом специфики ее работы и требований, предъявляемых к объектам КИИ.

Согласно [9, 10], информационная безопасность определяется как состояние защищенности передаваемой информации, обеспечиваемое мерами по поддержанию ее конфиденциально-

сти, целостности и доступности при передаче, обработке и хранении в СПД. В условиях возможных кибервоздействий [11] и технических отказов возникает необходимость оценки вероятностно-временных характеристик передачи данных.

Разработка методики комплексной оценки качества функционирования СПД КФС ОАО «РЖД» в условиях кибервоздействий и технических отказов является актуальной задачей. Существующие методы управления информационной безопасностью часто оказываются недостаточными для эффективного противодействия угрозам, связанным с блокированием или нарушением доставки данных. Это может приводить к сбоям в управлении перевозками, а в случае КФС — к серьезным последствиям вплоть до аварий и катастроф, поскольку именно через СПД осуществляется управление ее объектами.

Таким образом, необходимо разработать методику, позволяющую комплексно оценивать качество функционирования СПД в условиях киберугроз и технических сбоев. Для комплексной оценки качества функционирования СПД КФС необходимо учитывать вероятность своевременной передачи данных за время, не превышающее заданное.

СПД КФС ОАО «РЖД» обеспечивает передачу трафика различных категорий срочности. К сообщениям 1-й категории срочности относятся команды управления и критические команды. К данным 2-й категории срочности и ниже относятся данные о состоянии пути, карты маршрута и другая служебно-техническая информация. Согласно требованиям руководящих документов [12–15], для заданного времени своевременной передачи данных $T_{зад}$ устанавливаются ограничения. Для данных 1-й категории срочности: $T_{зад} \leq 1\ (с)$ с заданной вероятностью $P_{св} = 0,999$. Для данных 2-й категории срочности и ниже: $T_{зад} \leq 5\ (с)$ с заданной вероятностью $P_{св} = 0,99$.

В настоящее время отсутствуют методики расчета, удовлетворяющие указанным требованиям. Поэтому актуальной задачей является разработка методики, способной комплексно оценивать качество функционирования СПД КФС ОАО «РЖД» в условиях кибервоздействий злоумышленников и возможных технических отказов.

## Структура и содержание методики

Исходные данные, используемые в методике, соответствуют нормативным и руководящим документам, а также требованиям ГОСТ по защите информации [8, 16–20]. Эти данные описывают: конфигурацию защищаемой СПД КФС ОАО «РЖД», принципы и возможности функционирования СОВ, алгоритмы работы СОВ, состояние среды общего доступа. Часть исходных данных была получена в результате моделирования функционирования СПД КФС ОАО «РЖД» в условиях кибервоздействий злоумышленников с использованием [21–25].

В техническом задании (ТЗ) на разработку информационных систем (ИС) установлены требования к своевременности предоставления запрашиваемой (или выдаваемой принудительно) выходной информации. Оцениваемые показатели, характеризующие надежность и своевременность передачи данных (и/или выполнения технологических операций), не должны быть хуже заданных значений. При этом показатели должны учитывать специфику системы [17].

Основным показателем оценки выбрана вероятность своевременной передачи данных за время, не превышающее заданное: $P_{св}\left\{t_{пер} \leq T_{зад}\right\}$. Это позволяет разработать методику оценки качества функционирования СПД КФС в условиях кибервоздействий и возможных технических отказов.

Критерий оценки: $P_{св}\left\{t_{пер} \leq T_{зад}\right\}$. Выбранный показатель рассчитывается с использованием разработанных авторами частных моделей [21–25].

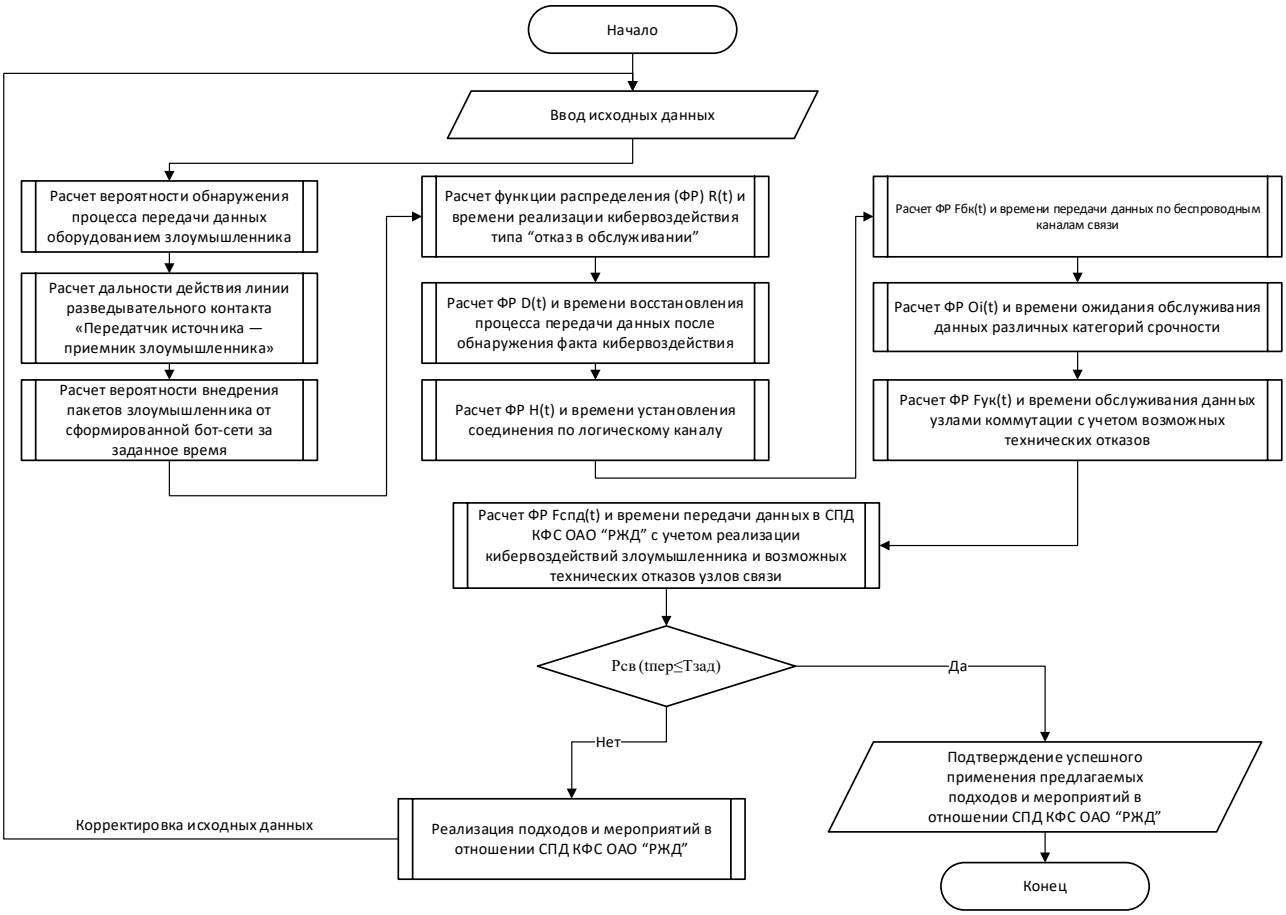



**Рис. 1.** Блок-схема алгоритма методики комплексной оценки качества функционирования СПД КФС ОАО «РЖД»

Последовательность вычисления показателя вероятности своевременной доставки данных представлена на рис. 1 в виде блок-схемы алгоритма.

Методика определения комплексной оценки функционирования СПД КФС ОАО «РЖД» содержит следующие блоки:

**Блок 1:** ввод исходных данных.

**Блок 2:** расчет вероятности обнаружения передачи данных злоумышленником. Вероятность определяется с учетом технических мер защиты, реализованных в СПД КФС ОАО «РЖД», с использованием нормативных документов [8, 16–20].

**Блок 3:** расчет дальности действия линии разведывательного контакта «Передатчик источника — приемник злоумышленника» определяется энергией (мощностью) передатчика и может быть рассчитана с помощью следующей формулы [26]:

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \lambda^2 \eta}{(4\pi)^2 \delta_{\min} R T_{\Sigma} \Delta f L}},$$

где $P_{\text{пер}}$ — мощность передатчика;

$G_{\text{пер}}$ — коэффициент усиления антенны передатчика;

$G_{\text{пр}}$ — коэффициент усиления антенны приемника;

$\lambda$ — длина волны передатчика;

$\eta$ — коэффициент потерь в среде распространения;

$\delta_{\min}$ — минимально допустимое превышение сигнала над шумом по мощности;

$R$ — постоянная Больцмана;

$T_{\Sigma}$ — суммарная шумовая температура на входе приемника;

$\Delta f$ — полоса сигнала;

$L$ — коэффициент запаса на неучитываемые факторы (обычно лежит в пределах от 3 до 10).

**Блок 4:** расчет вероятности внедрения пакетов злоумышленника от сформированной бот-сети за заданное время, при условии, что поступившие пакеты от бот-сети сразу поступают на обслуживание. Вероятность рассчитывается с учетом технических мер защиты, реализуемых в СПД типовой КФС ОАО «РЖД», с использованием [8, 16–20].

Вероятность внедрения пакетов данных злоумышленника рассчитывается с использованием [17]:

$$P_{\text{внедр}} = e^{-\sigma T_{\text{п.з}}}(1+\sigma T_{\text{п.з}}),$$

где $\sigma$ — частота поступления пакетов данных злоумышленника от сформированной бот-сети;

$T_{\text{п.з}}$ — заданное время.

**Блок 5:** расчет функции распределения $R(t)$ и времени реализации кибервоздействия типа «отказ в обслуживании». Функцию распределения целесообразно представить в виде гамма-функции, используя параметры формы и масштаба, кроме того, функции распределения остальных процессов представим аналогичным образом.

Функция распределения:

$$R(t) = \frac{\chi^{\psi}}{\Gamma(\psi)}\int_0^t t^{\psi-1}e^{-\chi t}dt,$$

где $\chi = \dfrac{M_{1r}}{D_r}$ — параметр масштаба;

$\psi = \dfrac{M_{1r}^2}{D_r}$ — параметр формы;

$M_{1r}$ — математическое ожидание реализации кибервоздействия;

$D_r$ — дисперсия реализации кибервоздействия.

**Блок 6:** расчет функции распределения $D(t)$ и времени восстановления процесса передачи данных после обнаружения факта кибервоздействия.

Функция распределения:

$$D(t) = \frac{K^W}{\Gamma(W)}\int_0^t t^{W-1}e^{-Kt}dt,$$

где $K$ — параметр масштаба;

$W$ — параметр формы.

**Блок 7:** расчет функции распределения $H(t)$ и времени установления соединения по логическому каналу [21].

Функция распределения:

$$H(t) = \frac{\varsigma^{\upsilon}}{\Gamma(\upsilon)}\int_0^t t^{\upsilon-1}e^{-\varsigma t}dt,$$

где $\nu$ — параметр формы;

$\varsigma$ — параметр масштаба.

**Блок 8:** расчет функции распределения $F_{\text{бк}}(t)$ и времени передачи данных по беспроводным каналам связи [21, 22].

Функция распределения:

$$F_{\text{бк}}(t) = \frac{\lambda^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}\int_0^t t^{\alpha-1}e^{-\lambda t}dt,$$

где $\alpha$ — параметр формы;

$\lambda$ — параметр масштаба.

**Блок 9:** расчет функции распределения $O_i(t)$ и времени ожидания обслуживания данных различных категорий срочности [23].

Функция распределения:

$$O_i(t) = \frac{\mu^{\beta}}{\Gamma(\beta)}\int_0^t t^{\beta-1}e^{-\mu t}dt, i = 1, I,$$

где $\beta$ — параметр формы;

$\mu$ — параметр масштаба;

$i$ — категория срочности передаваемых данных.

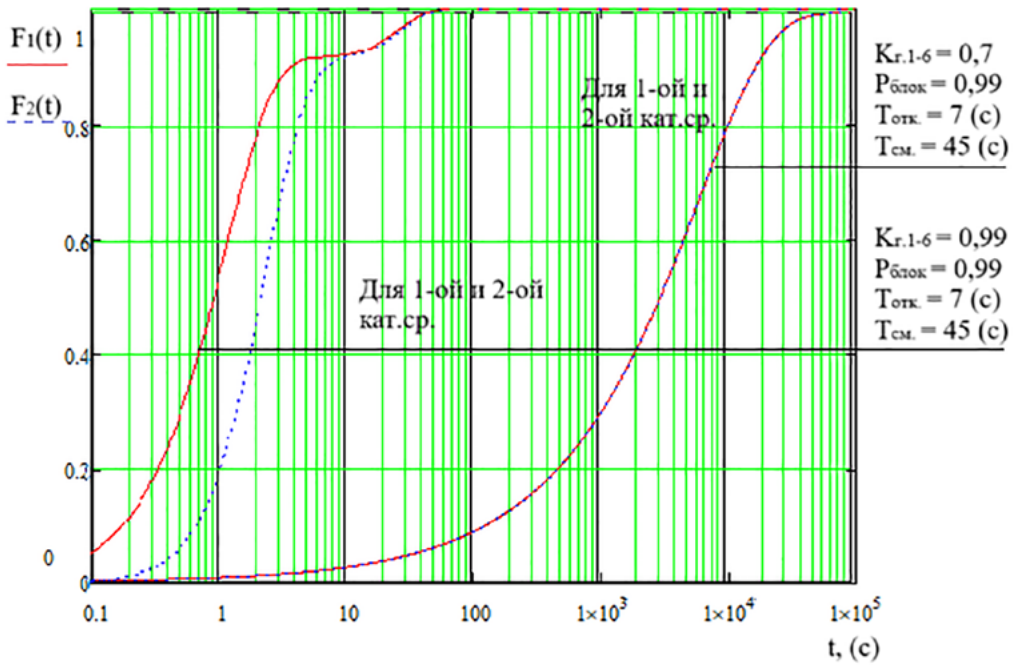



**Рис. 2.** Вероятностно-временные характеристики своевременной доставки данных для 1-й и 2-й категорий срочности в различных условиях

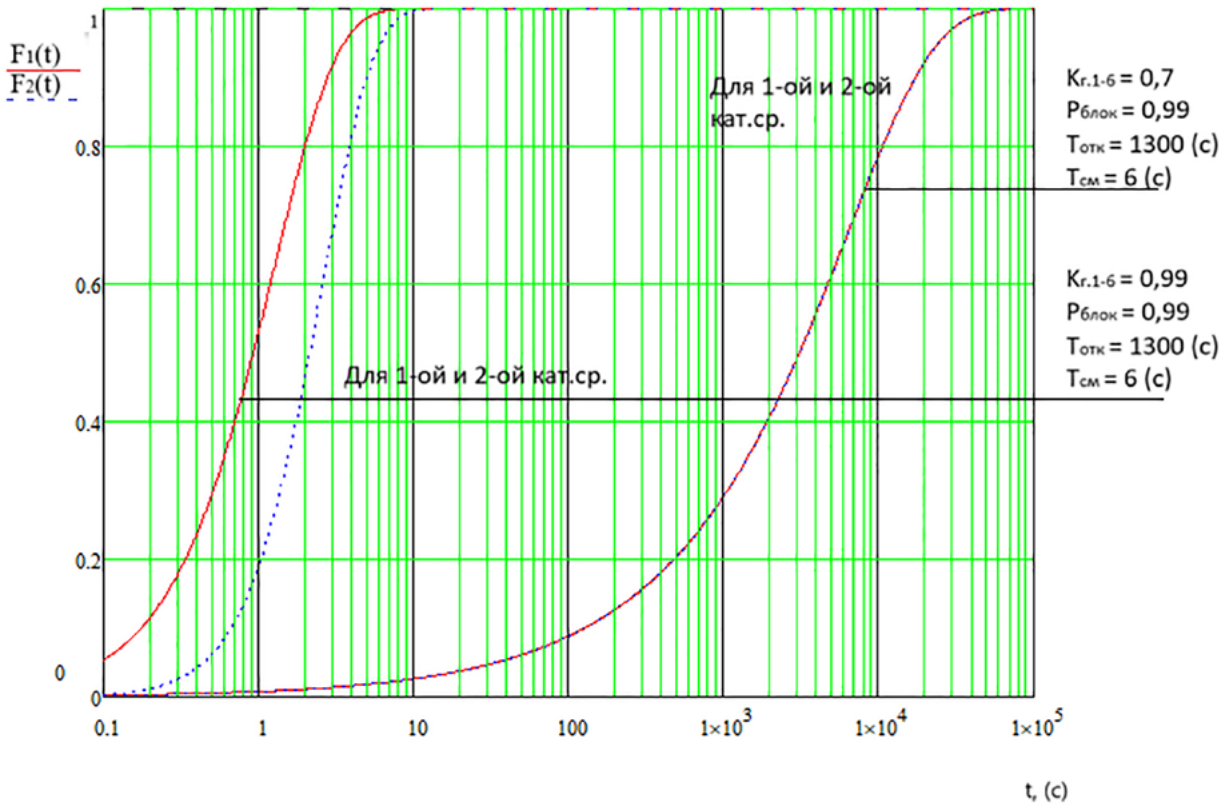



**Рис. 3.** Вероятностно-временные характеристики своевременной доставки данных для 1-й и 2-й категорий срочности в различных условиях

**Блок 10:** расчет функции распределения $F_{\text{ук}}(t)$ и времени обслуживания данных узлами коммутации с учетом возможных технических отказов.

Функция распределения:

$$F_{\text{ук}}(t) = \frac{Z^E}{\Gamma(E)} \int_0^t t^{E-1} e^{-Zt} dt,$$

где $E$ — параметр формы;

$Z$ — параметр масштаба.

**Блок 11:** расчет функции распределения $F_{\text{спд}}(t)$ и времени передачи данных в СПД КФС ОАО «РЖД» с учетом кибервоздействий злоумышленника и технических отказов узлов связи [24, 25]. Результаты расчета представлены на рис. 2, 3.

Получим итоговую функцию распределения:

$$F_{\text{спд}}(t) = \frac{N^M}{\Gamma(M)} \int_0^t t^{M-1} e^{-Nt} dt,$$

где $M$ — параметр формы;

$N$ — параметр масштаба.

**Блок 12:** расчет показателя оценки вероятности своевременной передачи данных за время, не превышающее заданное $P_{\text{св}}\left\{t_{\text{пер}} \le T_{\text{зад}}\right\}$. Расчет вероятности своевременной передачи за время является функцией распределения, полученной в блоке 11. В соответствии с [17], для систем, в которых возможны отказы при передаче данных, дополнительно учитываются показатели, характеризующие вероятность их потери в процессе обслуживания. Это актуализирует задачу разработки оригинальных математических моделей. Выполняется сравнение вычисленных значений из блока 11 с установленными нормативами. Полученный показатель $P_{\text{св}}\left(t_{\text{пер}}\right)$ сопоставляется с требуемыми значениями: для сообщений 1-й категории срочности $T_{\text{зад}} = 1(\text{с})$ при $P_{\text{св}} = 0,999$, для сообщений 2-й категории срочности $T_{\text{зад}} = 5(\text{с})$ при $P_{\text{св}} = 0,99$. Если условие выполняется, осуществляется переход к блоку 13, где подтверждается применимость предложенных подходов и мероприятий в СПД КФС ОАО «РЖД». В противном случае необходимо внедрение дополнительных мер, направленных на сокращение времени передачи данных, с последующей корректировкой исходных данных.

Вероятностно-временные характеристики своевременной доставки данных для 1-й и 2-й категорий срочности представлены на рис. 2, 3.

Результаты, полученные с использованием предложенной методики оценки качества функционирования СПД КФС ОАО «РЖД» в условиях кибервоздействий злоумышленника и возможных технических отказов, показывают, что показатель вероятности своевременной доставки данных за заданное время для двух категорий срочности не соответствует требованиям руководящих документов.

При времени реализации кибервоздействия $T_{\text{отк}} = 7(c)$, времени реализации смены маршрута $T_{\text{см}} = 45(\text{с})$ и различных значениях коэффициентов готовности узлов связи $K_{\text{г.1–6}} = 0,7$ и $K_{\text{г.1–6}} = 0,99$ получим: время передачи данных $t_{\text{пер}} = 63\,000(\text{с}) \le T_{\text{зад}} = 1(\text{с})$ с заданной вероятностью $P_{\text{св}} = 0,999$ для 1-й категории срочности, $t_{\text{пер}} = 41\,000(\text{с}) \le T_{\text{зад}} = 5(\text{с})$ с заданной вероятностью $P_{\text{св}} = 0,99$ для 2-й категории срочности, $t_{\text{пер}} = 40(\text{с}) \le T_{\text{зад}} = 1(\text{с})$ с заданной вероятностью $P_{\text{св}} = 0,999$ для 1-й категории срочности, $t_{\text{пер}} = 38(\text{с}) \le T_{\text{зад}} = 5(\text{с})$ с заданной вероятностью $P_{\text{св}} = 0,99$ для 2-й категории срочности.

При $T_{\text{отк}} = 1300(\text{с})$, $T_{\text{см}} = 6(\text{с})$ и различных значениях коэффициентов готовности узлов связи $K_{\text{г.1–6}} = 0,7$ и $K_{\text{г.1–6}} = 0,99$ получим: $t_{\text{пер}} = 63\,000(c) \le T_{\text{зад}} = 1(\text{с})$ с заданной вероятностью $P_{\text{св}} = 0,999$ для 1-й категории срочности, $t_{\text{пер}} = 41\,000(\text{с}) \le T_{\text{зад}} = 5(\text{с})$ с заданной вероятностью $P_{\text{св}} = 0,99$ для 2-й категории

срочности, $t_{\text{пер}} = 8(\text{с}) \le T_{\text{зад}} = 1(\text{с})$ с заданной вероятностью $P_{\text{св}} = 0,999$ для 1-й категории срочности, $t_{\text{пер}} = 8,6(\text{с}) \le T_{\text{зад}} = 5(\text{с})$ с заданной вероятностью $P_{\text{св}} = 0,99$ для 2-й категории срочности.

Разработанная методика оценки качества функционирования СПД КФС ОАО «РЖД» в условиях кибервоздействий злоумышленников и возможных технических отказов позволяет не только оценить показатель вероятности своевременной доставки данных за заданное время, но и выбрать рациональные мероприятия, направленные на снижение времени доставки данных. Кроме того, методика позволяет выработать организационно-технические предложения по повышению защищенности СПД КФС ОАО «РЖД».

**Заключение**

1. Разработана методика оценки качества функционирования СПД КФС ОАО «РЖД», функционирующая в условиях кибервоздействий злоумышленников и возможных технических отказов. Методика отличается возможностью определения показателя оценки вероятности своевременной доставки данных за заданное время $P_{\text{св}}\left\{T_{\text{пер}} \le T_{\text{зад}}\right\}$.

2. Поскольку СПД КФС функционирует в составе общетехнологической СПД ОАО «РЖД» и использует ее ресурсы, в сети передается разнородный трафик, что увеличивает время передачи данных по маршрутам. Для предотвращения увеличения времени передачи одним из предлагаемых направлений является организация выделенной СПД, использующей канальный ресурс общетехнологической СПД ОАО «РЖД». Это приведет к тому, что передаваемый трафик станет однородным, а самоподобие трафика исчезнет.

3. В случае организации выделенной СПД сеть становится детерминированной, а число маршрутов передачи данных ограничивается. Это позволяет ограничить время передачи трафика объектам управления КФС. Следовательно, время передачи данных по маршрутам будет определяться временем передачи критической информации, так как оно связано с реакцией КФС на предотвращение аварийных ситуаций и минимальным временем прохождения информации по маршруту. Эти ограничения позволяют внедрить временные метки.

4. Для управления объектами КФС передаваемый трафик имеет отличительные характеристики: пакеты обладают однородной структурой и ограниченным коротким размером. Данные признаки позволяют отличать пакеты данных, поступившие от бот-сети злоумышленника, и изолировать их.

5. Однако даже в случае организации выделенной сети доступ злоумышленника к ней сохраняется. Злоумышленник способен копировать структуру пакетов, передаваемых в СПД, для организации атаки типа «отказ в обслуживании» (DDoS). В соответствии с этим необходимо использовать методы аутентификации по принципу «свой-чужой». Для этого в структуру пакета включается опознавательная группа, адрес которой изменяется по определенным правилам. Эти правила всегда опережают действия злоумышленника по отправке пакетов в сеть.

6. Местоположение каждого узла связи и базовой станции в СПД строго известно. Это позволяет рассчитывать время прохождения трафика по заданному маршруту с учетом задержек при прохождении узлов связи. Таким образом, становится возможной аутентификация по положению в пространстве.

7. Использование интеллектуальных агентов в СПД обеспечивает обнаружение аномалий при строго ограниченном трафике. При попытке передачи пакетов злоумышленника уровень аномалий резко возрастает, что приводит к оповещению системы обнаружения вторжений о несанкционированном доступе в СПД. В этом случае

необходимо принимать меры по аутентификации проходящего трафика.

8. При высоких значениях времени восстановления УК снижается общая надежность СПД. Для своевременной доставки данных необходимо проводить комплекс мероприятий для снижения времени восстановления процесса передачи данных, для мониторинга целесообразно применять интеллектуальных агентов.

## Список источников

1. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 № 187-ФЗ.

2. Михайлов Р. Л. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов / Р. Л. Михайлов, С. И. Макаренко // РТС. — 2013. — № 4(12). — С. 69–79.

3. Карганов В. В. Показатель оценки эффективности систем связи и их элементов / В. В. Карганов, А. Г. Расчесова, В. А. Кудряшов // Информатика, телекоммуникации и управление. — 2016. — № 1(236). — С. 7–14.

4. Одоевский С. М. Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой / С. М. Одоевский, П. В. Лебедев // Системы управления, связи и безопасности. — 2021. — № 1. — С. 152–189.

5. Бабиков В. Н. Разработка моделей и методик оценки эффективности комплексной системы защиты информации: дисс. … канд. техн. наук: 05.13.19 / В. Н. Бабиков. — СПб., 2006. — 147 с.

6. Бухарин В. В. Способ защиты информационно-вычислительных сетей от компьютерных атак / В. В. Бухарин, А. В. Кирьянов, Ю. И. Стародубцев // Труды МАИ: электронный научный журнал. — 2012. — № 57.

7. Захарченко С. С. Показатели эффективности выявления уязвимостей при использовании метода проверки на модели / С. С. Захарченко, А. А. Корниенко, С. Е. Ададуров // Труды IV-й Международной научно-практической конференции «Интеллекттранс-2014». — 2014. — С. 211–213.

8. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных (выписка). Утверждена заместителем директора ФСТЭК России 15.02.08. — 70 с.

9. ГОСТ Р 53953. Электросвязь железнодорожная. Термины и определения. — М., 2010. — 52 с.

10. Стандарт ОАО «РЖД». Управление информационной безопасностью. Общие положения. СТО РЖД 1.18.002—2009. — 30 с.

11. Шелухин О. И. Обнаружение вторжений в компьютерные сети (сетевые аномалии). Учебное пособие для вузов: учебное пособие / О. И. Шелухин, Д. Ж. Сакалема, А. С. Филинова. — М.: Горячая линия-Телеком, 2013. — 220 с.

12. ГОСТ Р 50922—2017. Информационная технология. Управление качеством обслуживания в сетях связи.

13. ГОСТ Р 51323—2009. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности информации. Защита от несанкционированного доступа к информации.

14. СТО РЖД 718048.1—2014. Комплексные системы управления движением поездов. Требования к проектированию, строительству и эксплуатации.

15. СТО РЖД 718048.2—2014. Комплексные системы управления движением поездов. Требования к средствам связи и передачи данных.

16. Шабалин Н. Г. Концепция информационной подсистемы многоуровневой системы управления и обеспечения безопасности движения поездов (АСУ МС) / Н. Г. Шабалин; под ред. Н. Г. Шабалина. — М.: ВНИИУП, 2003. — 56 с.

17. ГОСТ РВ 51987—2002. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Типовые требования и показатели качества функционирования информационных систем. Общие положения. — М.: Госстандарт России, 2002. — 54 с.

18. Концепция обеспечения кибербезопасности информационных и управляющих систем в ОАО «РЖД» (проект редакция 1.0). — М.: ОАО «РЖД», 2013. — 285 с.

19. Модель угроз и нарушителя безопасности персональных данных, обрабатываемых в типовых информационных системах персональных данных отрасли. — М., 2010. — 48 с.

20. Специальные требования и рекомендации по технической защите конфиденциальной информации (СТР-К). Решение Коллегии Гостехкомиссии России № 7.2/02.03.2001.

21. Болдинов А. М. Математическая модель канала управления стандарта радиосвязи GSM-R / А. М. Болдинов, А. А. Привалов, А. А. Привалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — Т. 19. — № 4. — С. 743–751.

22. Привалов А. А. Математическая модель процесса передачи команд управления по радиоканалам автоматизированных систем / А. А. Привалов, А. А. Привалов, А. М. Болдинов // Информация и космос. — 2023. — № 4. — С. 71–83.

23. Makhmudov F. Mathematical Model of the Process of Data Transmission over the Radio Channel of Cyber-Physical Systems / F. Makhmudov, A. Privalov, A. Privalov et al. // Mathematics. — 2024. — Vol. 12. — Iss. 10. — P. 1452.

24. Привалов А. А. Математическая модель функционирования сети передачи данных киберфизической системы в условиях кибервоздействия злоумышленника / А. А. Привалов, А. М. Болдинов, Е. В. Скуднева, А. А. Привалов // Информация и космос. — 2024. — № 3. — С. 74–84.

25. Болдинов А. М. Комплексная модель сети передачи данных киберфизической системы / А. М. Болдинов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции в 4 т., Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2024 года. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2024. — С. 117–121.

26. Ярочкин В. И. Информационная безопасность: учебник для студентов вузов / В. И. Ярочкин. — М.: Академический Проект; Гаудеамус, 2-е изд. — 2004. — 544 с.

Дата поступления: 02.03.2025
Решение о публикации: 10.04.2025

**Контактная информация:**
ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич — д-р воен. наук, проф.; aprivalov@inbox.ru
БОЛДИНОВ Алексей Максимович — аспирант; 23boldinov98@gmail.com

## A Methodology for a Comprehensive Assessment of the Quality of the Data Transmission Network Functioning of Cyber–Physical Systems at JSCo "Russian Railways"

**A. A. Privalov[1], A. M. Boldinov[2]**

[1]Military Order of Zhukov Academy of the National Guard Troops of the Russian Federation, 1, L. Pilyutova Str., Saint Petersburg, 198206, Russian Federation
[2]Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Privalov A. A., Boldinov A. M. A Methodology for a Comprehensive Assessment of the Quality of the Data Transmission Network Functioning of Cyber-Physical Systems at JSCo "Russian Railways". *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 316–328. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-316-328

## Summary

**Purpose:** To develop a methodology for assessing the quality of data transmission network functioning (DTN) of cyber-physical systems (CPS) at JSCo "RZD" in the event of cyberattacks by malicious actors and possible technical failures. **Methods:** The authors used specific and general mathematical models. These included a mathematical model of the radio channel, incorporating connection establishment and maintenance processes; a cyberattack model of the "Denial of Service" type; a model for detecting cyberattacks, followed by the restoration of data transmission; and a model for data transmission via various routes; a model of a communication node in the context of cyberattacks and potential technical failures; a model for data transmission over wired communication channels using the TCP protocol, as well as a comprehensive model of the DTN of the CPS at JSCo "RZD" in the event of malicious cyberattacks and technical failures. **Results:** The methodology developed allows for the evaluation of the quality of DTN functioning of the CPS at JSCo "RZD" in the event of cyberattacks and technical failures. Measures to prevent disruptions in data transmission to the CPS control objects have been identified. The methodology is presented in the form of a flowchart algorithm, where each block illustrates the calculation of time distribution functions based on specific mathematical models. **Practical significance:** The proposed methodology is intended for a comprehensive assessment of the quality of DTN functioning of the CPS at JSC "RZD" in the event of cyberattacks and technical failures. It is particularly beneficial for research organizations and companies involved in the development and improvement of unmanned and robotic systems, as it provides the approaches for designing reliable and resilient data transmission networks.


**Keywords:** Data transmission network, communication network, methodology, quality of functioning assessment, mathematical model.

## References


1. *Federal'nyy zakon "O bezopasnosti kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii" ot 26.07.2017 № 187-FZ* [Federal Law "On the Security of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation" dated July 26, 2017 № 187-FZ]. (In Russian)
2. Mikhaylov R. L., Makarenko S. I. *Otsenka ustoychivosti seti svyazi v usloviyakh vozdeystviya na nee destabiliziruyushchikh faktorov* [Assessment of the Stability of a Communication Network under the Impact of Destabilizing Factors]. RTS, 2013, Iss. 4(12), pp. 69–79. (In Russian)
3. Karganov V. V., Raschesova A. G., Kudryashov V. A. Pokazatel' otsenki effektivnosti sistem svyazi i ikh elementov [Indicator for Assessing the Efficiency of Communication Systems and Their Elements]. *Informatika, telekommunikatsii i upravlenie* [Informatics, Telecommunications and Management]. 2016, Iss. 1(236), pp. 7–14. (In Russian)
4. Odoevskiy S. M., Lebedev P. V. Metodika otsenki ustoychivosti funktsionirovaniya sistemy tekhnologicheskogo upravleniya infokommunikatsionnoy set'yu spetsial'nogo naznacheniya s zadannoy topologicheskoy i funktsional'noy strukturoy [Methodology for assessing the sustainability of the functioning of the technological control system of a special-purpose infocommunication network with a given topological and functional structure]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, Communications and Security Systems]. 2021, Iss. 1, pp. 152–189. (In Russian)
5. Babikov V. N. *Razrabotka modeley i metodik otsenki effektivnosti kompleksnoy sistemy zashchity informatsii: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.19* [Development of models and methods for assessing the effectiveness of an integrated information security system: diss. ... Cand. Sciences: 05.13.19]. St. Petersburg, 2006, 147 p. (In Russian)
6. Bukharin V. V., Kir'yanovA. V., Starodubtsev Yu. I. Sposob zashchity informatsionno-vychislitel'nykh setey ot komp'yuternykh atak [Method for protecting information and computing networks from computer attacks]. *Trudy MAI: elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Proceedings of MAI: electronic scientific journal]. 2012, Iss. 57. (In Russian)
7. Zakharchenko S. S., Kornienko A. A., Adadurov S. E. Pokazateli effektivnosti vyyavleniya uyazvimostey pri ispol'zovanii metoda proverki na modeli [Performance

indicators of vulnerability detection using the model checking method]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Intellekttrans-2014"* [Proceedings of the IV-th International scientific and practical conference "Intellecttrans-2014"]. 2014, pp. 211–213. (In Russian)

8. *Bazovaya model' ugroz bezopasnosti personal'nykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh personal'nykh dannykh (vypiska). Utverzhdena zamestitelem direktora FSTEK Rossii 15.02.08* [Basic model of threats to personal data security during their processing in personal data information systems (extract). Approved by the Deputy Director of the FSTEC of Russia on 15.02.08]. 70 p. (In Russian)

9. *GOST R 53953. Elektrosvyaz' zheleznodorozhnaya. Terminy i opredeleniya* [GOST R 53953. Railway telecommunications. Terms and definitions]. Moscow, 2010, 52 p. (In Russian)

10. *Standart OAO "RZhD". Upravlenie informatsionnoy bezopasnost'yu. Obshchie polozheniya. STO RZhD 1.18.002—2009* [Standard of JSC "Russian Railways". Information security management. General provisions. STO RZD 1.18.002—2009]. 30 p. (In Russian)

11. Shelukhin O. I., Sakalema D. Zh., Filinova A. S. *Obnaruzhenie vtorzheniy v komp'yuternye seti (setevye anomalii). Uchebnoe posobie dlya vuzov: uchebnoe posobie* [Detection of intrusions in computer networks (network anomalies). Textbook for universities: textbook]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2013, 220 p. (In Russian)

12. *GOST R 50922—2017. Informatsionnaya tekhnologiya. Upravlenie kachestvom obsluzhivaniya v setyakh svyazi* [GOST R 50922—2017. Information technology. Quality of service management in communication networks]. (In Russian)

13. *GOST R 51323—2009. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti informatsii. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii* [GOST R 51323—2009. Information technology. Methods and means of ensuring information security. Protection against unauthorized access to information]. (In Russian)

14. *STO RZhD 718048.1—2014. Kompleksnye sistemy upravleniya dvizheniem poezdov. Trebovaniya k proektirovaniyu, stroitel'stvu i ekspluatatsii* [STO RZhD 718048.1—2014. Integrated train control systems. Requirements for design, construction and operation]. (In Russian)

15. *STO RZhD 718048.2—2014. Kompleksnye sistemy upravleniya dvizheniem poezdov. Trebovaniya k sredstvam svyazi i peredachi dannykh* [STO RZD 718048.2—2014. Integrated train control systems. Requirements for communication and data transmission facilities]. (In Russian)

16. Shabalin N. G. *Kontseptsiya informatsionnoy podsistemy mnogourovnevoy sistemy upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov (ASU MS); pod red. N. G. Shabalina* [Concept of the information subsystem of the multi-level train control and safety system (ACS MS); edited by N. G. Shabalin]. Moscow: VNIIUP Publ., 2003, 56 p. (In Russian)

17. *GOST RV 51987—2002. Informatsionnaya tekhnologiya. Kompleks standartov na avtomatizirovannye sistemy. Tipovye trebovaniya i pokazateli kachestva funktsionirovaniya informatsionnykh sistem. Obshchie polozheniya* [GOST RV 51987—2002. Information technology. Set of standards for automated systems. Typical requirements and performance indicators for information systems. General provisions]. Moscow: Gosstandart Rossii Publ., 2002, 54 p. (In Russian)

18. *Kontseptsiya obespecheniya kiberbezopasnosti informatsionnykh i upravlyayushchikh sistem v OAO "RZhD" (proekt redaktsiya 1.0)* [Concept of ensuring cybersecurity of information and control systems in JSC Russian Railways (draft version 1.0)]. Moscow: OAO "RZhD", 2013, 285 p. (In Russian)

19. *Model' ugroz i narushitelya bezopasnosti personal'nykh dannykh, obrabatyvaemykh v tipovykh informatsionnykh sistemakh personal'nykh dannykh otrasli* [Model of threats and violators of security of personal data processed in typical information systems of personal data of the industry]. Moscow, 2010, 48 p. (In Russian)

20. *Spetsial'nye trebovaniya i rekomendatsii po tekhnicheskoy zashchite konfidentsial'noy informatsii (STR-K). Reshenie Kollegii Gostekhkomissii Rossii № 7.2/02.03.2001* [Special requirements and recommendations for technical

protection of confidential information (STR-K). Decision of the Board of the State Technical Commission of Russia № 7.2/02.03.2001]. (In Russian)

21. Boldinov A. M., Privalov A. A., Privalov A. A. Matematicheskaya model' kanala upravleniya standarta radiosvyazi GSM-R [Mathematical model of the control channel of the GSM-R radio communication standard]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, vol. 19, Iss. 4, pp. 743–751. (In Russian)

22. Privalov A. A., Privalov A. A., Boldinov A. M. Matematicheskaya model' protsessa peredachi komand upravleniya po radiokanalam avtomatizirovannykh sistem [Mathematical model of the process of transmitting control commands via radio channels of automated systems]. *Informatsiya i kosmos* [Information and Space]. 2023, Iss. 4, pp. 71–83. (In Russian)

23. Makhmudov F., Privalov A. et al. Mathematical Model of the Process of Data Transmission over the Radio Channel of Cyber-Physical Systems. Mathematics, 2024, vol. 12, Iss. 10, p. 1452.

24. Privalov A. A., Boldinov A. M., Skudneva E. V., Privalov A. A. Matematicheskaya model' funktsionirovaniya seti peredachi dannykh kiberfizicheskoy sistemy v usloviyakh kibervozdeystviya zloumyshlennika [Mathematical Model of the Operation of the Data Transmission Network of a Cyber-Physical System under the Conditions of an Intruder's Cyber Impact]. *Informatsiya i kosmos* [Information and Space]. 2024, Iss. 3, pp. 74–84. (In Russian)

25. Boldinov A. M. Kompleksnaya model' seti peredachi dannykh kiberfizicheskoy sistemy [Complex model of the data transmission network of a cyber-physical system]. *Aktual'nye problemy infotelekommunikatsiy v nauke i obrazovanii: cbornik nauchnykh statey XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy i nauchno-metodicheskoy konferentsii v 4 t., Sankt-Peterburg, 27–28 fevralya 2024 goda* [Actual problems of infotelecommunications in science and education: collection of scientific articles of the XIII International scientific-technical and scientific-methodical conference in 4 volumes, St. Petersburg, February 27–28, 2024]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet telekommunikatsiy im. prof. M. A. Bonch-Bruevicha Publ., 2024, pp. 117–121. (In Russian)

26. Yarochkin V. I. *Informatsionnaya bezopasnost': uchebnik dlya studentov vuzov, 2-e izd.* [Information security: textbook for university students, 2nd ed]. Moscow: Akademicheskiy Proekt; Gaudeamus Publ., 2004, 544 p. (In Russian)

Received: March 02, 2025
Accepted: April 10, 2025

**Author's information:**
Andrey A. PRIVALOV — Dr. Sci. in Military, Professor; aprivalov@inbox.ru
Aleksey M. BOLDINOV — Postgraduate Student; 23boldinov98@gmail.com

УДК 629.4.045

# Инновационная технология перевозок как инструмент расширения возможностей использования фитинговых платформ для перевозки рельсов и длинномерного проката

**А. С. Кононенко[1], С. В. Мозгрин[2], А. А. Присмотрова[1], А. Х. Юлдашев[1]**

[1]ООО «ВНИЦТТ», Российская Федерация, 197046, Санкт-Петербург, Петроградская наб., 22, лит. А
[2]АО «РЖД Логистика», Российская Федерация, 107078, Москва, ул. Маши Порываевой, 34

**Для цитирования:** *Кононенко А. С., Мозгрин С. В., Присмотрова А. А., Юлдашев А. Х.* Инновационная технология перевозок как инструмент расширения возможностей использования фитинговых платформ для перевозки рельсов и длинномерного проката // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 329–340. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-329-340

## Аннотация

**Цель:** На основе обзора существующих способов перевозки рельсов провести анализ, выявить достоинства и недостатки, определить наиболее перспективный способ перевозки для дальнейшей разработки. Показать возможность применения существующих фитинговых платформ без модернизации с увеличением их функционального назначения. Провести разработку, включая расчеты и испытания, многооборотного комплекта крепления (далее — МКК) рельсов на серийной фитинговой платформе модели 13-6903. Обеспечить надежное крепление груза при условии нагружения рамы и фитинговых упоров от рельсов, загруженных с применением МКК, не больше, чем от контейнеров. **Методы:** Разработка и испытания МКК и платформы в соответствии с ГОСТ 33211—2014, Техническими условиями размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах № ЦМ-943, Техническими условиями размещения и крепления грузов (приложение 3 к СМГС). **Результаты:** Выбран и обоснован перспективный способ перевозки рельсов длиной 25 м, не требующий применения специального подвижного состава. Проведена разработка МКК, по результатам испытаний и опытной перевозки подтверждены его основные показатели: реализована возможность применения фитинговой платформы для перевозки рельсов, обеспечена надежность крепления груза и безопасность перевозки, исключено применение одноразовых реквизитов крепления, реализована возможность перемещения порожнего МКК любым видом транспорта, удобство компактного складирования и хранения, обеспечена простота конструкции (без применения технически сложных и дорогостоящих элементов), взаимозаменяемость элементов МКК, легкость ремонта и замены отдельных составных частей. **Практическая значимость:** Применение МКК позволяет вывести на качественно новый уровень услугу по транспортировке 25-метровых рельсов и длинномерного проката.

**Ключевые слова:** Перевозка рельсов, многооборотный комплект крепления, МКК, фитинговая платформа, платформа для контейнеров.

На сети железных дорог в связи с проектами строительства и модернизации инфраструктуры существует высокая потребность в перевозке рельсов длиной 12,5 и 25 м, а также длинномерного металлопроката по железным дорогам. В статье проработана идея о новом способе перевозки рельсов и длинномерного проката, предложенная АО «РЖД Логистика» [1], по применению многооборотного комплекта крепления, установленного на серийно выпускаемом контейнерном вагоне-платформе модели 13-6903 [2].

## 1. Обзор и технический анализ способов перевозки длинномерных грузов

На первом этапе работы был выполнен обзор и сравнительный технический анализ известных и реализованных, а также предложенного АО «РЖД Логистика», способов перевозки рельсов. На основе обзора проведена оценка актуальности применения МКК на грузовом железнодорожном подвижном составе. Существующие способы перевозки рельсов, а также их положительные и отрицательные эффекты отражены в табл. 1.

Из представленного обзора способов перевозки рельсов разной номинальной длины следует, что рельсы длиной 12,5 м можно перевезти автомобильным или железнодорожным транспортом в зависимости от объема и расстояния перевозки, а также сезона, состояния

Таблица 1. Оценка актуальности применения МКК на грузовом железнодорожном подвижном составе

| Показатели перевозки и факторы, влияющие на перевозку рельсов | Эффективность способов перевозки рельсов различной длины, м | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Автотранспорт (тралы, телескопические тралы) | | Ж/д транспорт | | | | | | |
| | | | Полувагон | Вагон-платформа универсальный | Вагон-платформа универсальный в сцепе из двух и более вагонов с МКК | | Вагон-платформа (длиннобазный) для контейнеров одиночный с МКК | Вагон-платформа (длиннобазный) для контейнеров в сцепе из двух и более вагонов с МКК | |
| | 12,5 | 25 | 12,5 | 12,5 | 25 | 25–100 | 25 | 25 | 25–100 |
| Возможность перевозки рельсов | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Возможность перевозки сверхдлинномерных грузов* | | | | | | + | | | + |
| Грузоподъемность**, т, не более | 40 | 120 | 75 | 77,5 | 97,5 | 389 | 68,3 | 120 | 234 |
| Мобильность | + | + | – | – | – | – | – | – | – |
| Скорость доставки | + | + | – | – | – | – | – | – | – |
| Сохранность груза | – | – | + | + | + | + | + | + | + |
| Зависимость от погодных условий | – | – | + | + | + | + | + | + | + |
| Стоимость перевозки на малых плечах | + | – | + | – | – | – | – | – | – |
| Стоимость перевозки на больших плечах | – | – | + | + | + | + | + | + | + |
| Зависимость стоимости перевозок от сезона | – | – | + | + | + | + | + | + | + |
| Влияние ж/д тарифа на стоимость перевозки | | | + | + | – | – | + | – | – |
| Потребность в одноразовых реквизитах крепления (растяжки, прокладки, увязки, бруски и т. д.) | – | – | – | – | + | + | + | + | + |
| Плохое состояние автодорог и отсутствие автодорог | – | – | | | | | | | |
| | Н | Н | | | | | | | |
| Разрешение на перевозку негабаритного груза | | – | | | | | | | |

Примечание:
* Длина свыше 25 м.
** Масса груза без учета МКК.
\+ — положительный эффект
– — отрицательный эффект
Н — применение невозможно

Таблица 2. Типы перевозимых рельсов с применением МКК

| Тип перевозимых рельсов*** | Показатели | | |
|---|---|---|---|
| | Количество рельсов на вагоне с МКК, шт. | Масса погонная рельса, кг/м | Расчетная загрузка без учета массы тары МКК** (при длине рельса 25 м), т |
| РП 65 ГОСТ Р 51045 [4], Р65 ГОСТ Р 51685 [5] | 42 | 64,88 | 68,12 |
| Р65К ГОСТ Р 51685 [6]* | | 64,67 | 67,90 |
| РП60Е1 ГОСТ Р 51045, 60Е1 EN 13674-1 [7] | | 60,21 | 63,22 |
| 60Е2 EN 13674-1 | | 60,03 | 63,03 |

* Тип рельсов по ранее выпущенному стандарту.
** Максимальная масса тары МКК составляет 6,2 т.
*** К перевозке допускается другой длинномерный металлопрокат с поперечным сечением, симметричным относительно вертикальной оси профиля, имеющим характеристики, сопоставимые с характеристиками сечения рельсов, а также длиной 25 м с максимальной загрузкой вагона 68,3 т.

дорог и срочности. Для рельсов длиной 25 м наиболее предпочтительным способом является перевозка на длиннобазной платформе, в первую очередь в связи с более надежным креплением груза и отсутствием необходимости применения сложной технологии погрузки с использованием одноразовых реквизитов крепления [3].

Наиболее массовой длиннобазной платформой длиной 80 футов, с осевой нагрузкой 25 тс и увеличенной грузоподъемностью на сети является платформа модели 13-6903. Грузоподъемность вагонов-платформ составляет 74,5 т, (это до 6 т больше, чем у аналогов с осевой нагрузкой 23,5 тс, что позволяет дополнительно перевезти до четырех 25-метровых рельсов), а их парк на начало 2025 года составляет более 4300 вагонов. Платформа предназначена для перевозки крупнотоннажных контейнеров, и применение МКК позволяет расширить номенклатуру перевозимых грузов, дополняя, но не ограничивая его функциональное назначение. Типы перевозимых рельсов на вагоне с применением МКК приведены в табл. 2.

Таким образом, платформа 13-6903 с использованием МКК при максимальной загрузке позволяет осуществить перевозку 42 рельсов длиной 25 м, что обеспечивает общую длину нити 1050 м, или 525 м пути.

## 2. Особенности конструкции

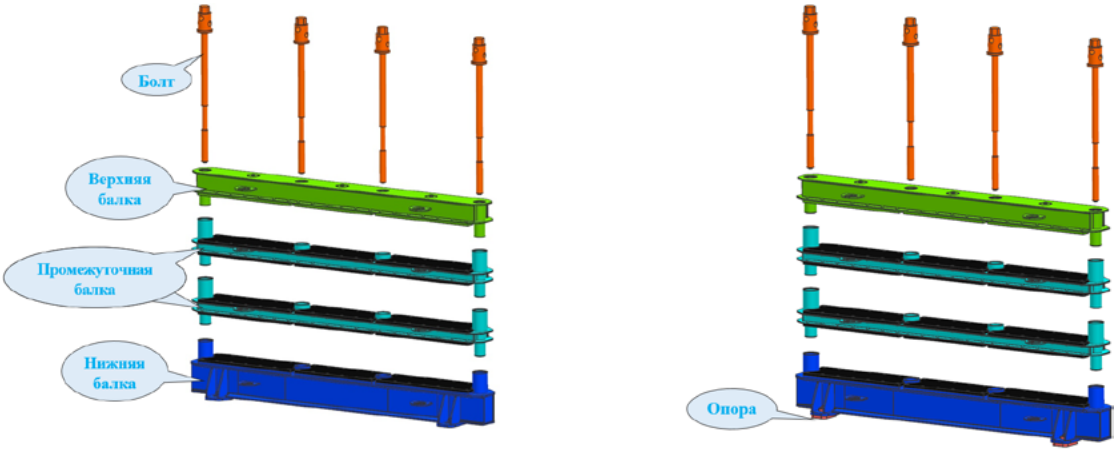
МКК имеет быстросъемную конструкцию без применения сварки, болтовых соединений, увязочных и тому подобных средств для крепления к вагону. Фиксация МКК на вагоне производится за счет взаимодействия штатных фитинговых упоров, которыми оборудован вагон, с элементами МКК. Таким образом, удержание МКК осуществляется только весом груза, аналогично контейнерам.

Общий вид вагона, загруженного рельсами с применением МКК, показан на рис. 1. Состав промежуточной и концевой секций показан на рис. 2. Общий вид изготовленного опытного образца концевой секции показан на рис. 3.

МКК состоит из двух концевых и трех промежуточных секций, каждая из которых состоит из нижней балки, двух промежуточных балок, верхней балки и болтов. Концевая секция отличается наличием на нижних балках дополнительных опор, которые компенсируют разницу высот верха боковой балки и углового фитингового упора, обеспечивая устойчивое положение нижних балок (промежуточные секции нижними балками опираются полностью на двойные фитинговые упоры).

МКК позволяет разместить 42 рельса, как видно из рис. 1, в три яруса (по 14 шт. в одном ярусе).

**Рис. 1.** Общий вид вагона с установленным МКК и рельсами




*а* *б*

**Рис. 2.** Состав секции МКК:
*а* — промежуточная секция, *б* — концевая секция


**Рис. 3.** Общий вид опытного образца концевой секции

Погрузка осуществляется поярусно, начиная с установки нижних балок на вагон с последующей укладкой каждого яруса груза и балок между ними. Для обеспечения сохранности груза и надежного удержания на вагоне в конструкции каждой секции предусмотрены фрикционные пластины, изготовленные из резины. Специальные болты после завершения погрузки сквозь отверстия в балках каждой секции вкручиваются в гайки, закрепленные в нижних балках, и затягиваются определенным моментом. Таким образом, за счет силы сжатия болтов и упругих свойств резины компенсируется разность по высоте рельсов одного яруса (до 3 мм), что обеспечивает фиксацию каждого рельса. Кроме этого, резиновые пластины легко демонтируются для замены, а также обладают более стабильными и предсказуемыми характеристиками при различных погодных условиях (по сравнению, например, с древесиной).

Для облегчения работ и исключения возможных ошибок при погрузке по краям балок предусмотрены направляющие ограничители в виде труб разного диаметра, которые при установке заходят друг в друга и обеспечивают правильное расположение балок. В средней части балок для обеспечения правильной укладки груза также предусмотрены специальные ограничители.

Таким образом, разработанное МКК обладает следующими преимуществами:

− отсутствие вмешательства в конструкцию серийного вагона;

− воздействие от МКК с грузом на вагон не превышает воздействия от контейнеров всех типов, разрешенных к перевозке на вагоне;

− обеспечение прочности и безопасности использования МКК на всех этапах эксплуатации;

− удобство использования, обслуживания и ремонтопригодность МКК, обеспечение механизации и автоматизации погрузки/разгрузки;

− обеспечение надежной фиксации груза на вагоне без использования дополнительных средств крепления и увязки.

## 3. Расчетная проверка

На первом этапе расчетными методами выполнена проверка МКК и рамы платформы на воздействие полного спектра сил, возникающего при различных режимах нагружения во время движения в составе поезда и проведения погрузо-разгрузочных работ.

При разработке МКК расчетная часть включала в себя:

− оценку воздействия МКК на раму вагона;

− расчет прочности МКК;

− расчет усилия затяжки болтов, обеспечивающих надежное удержание и безопасную перевозку рельсов.

### *3.1. Оценка воздействия МКК на раму вагона*

В рамках оценки воздействия МКК на вагон определялись изгибающие моменты в характерных сечениях рамы вагона от воздействия МКК с рельсами и сравнение их с изгибающими моментами от воздействия контейнеров, загруженных по наиболее неблагоприятным с точки зрения сопротивления усталости схемам.

Для расчета изгибающих моментов рама вагона рассматривалась как балка на двух опорах. Для оценки максимальных моментов были выбраны характерные сечения рамы вагона, соответствующие сечениям по осям пятников (шкворневые сечения) и местам опирания на фитинговые упоры.

Расположение характерных сечений рамы вагона представлено на рис. 4.

Расчет изгибающих моментов производился для следующих схем загрузки контейнерами:

− загрузка двумя контейнерами типа 1ААА, 1АА. 1А массой 37 т каждый (Схема А);

− загрузка четырьмя контейнерами 1СС или 1С, два контейнера массой 25,25 т каждый установлены в консольных частях вагона, два контейнера массой 12 т каждый — в центральной части (Схема Б);

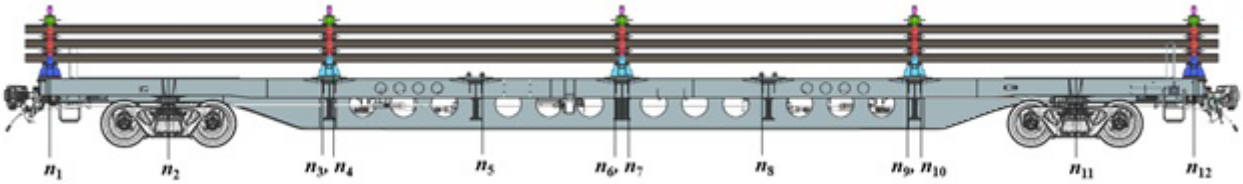



**Рис. 4.** Расположение характерных сечений рамы вагона

– загрузка тремя контейнерами 1СС или 1С, два контейнера массой 36 т каждый установлены в консольных частях вагона, один контейнер массой 2,5 т — в центральной части (Схема В);

– загрузка четырьмя контейнерами 1СС или 1С массой 16,625 т каждый (Схема Г).

С учетом симметричности конструкции и прикладываемых нагрузок относительно поперечной оси вагона, изгибающий момент в произвольном сечении рамы $n_i$ в общем случае можно определить по формуле:

$$M_{ni} = \sum M_j, \tag{1}$$

где $M_j$ — изгибающий момент в сечении $n_i$ от соответствующей нагрузки, определяемый по формуле:

$$M_j = \begin{cases} 0, \text{если } L_j \geq l_{ni} \\ N_j\left(l_{ni} - L_j\right), \text{если } L_j < l_{ni} \end{cases}, \tag{2}$$

где $L_j$ — расстояние от первого сечения до места приложения соответствующей нагрузки;

$l_{ni}$ — расстояние от первого сечения до рассматриваемого сечения $n_i$;

$N_j$ — вертикальные нагрузки (с учетом направления действия) от веса груза, действующие на раму вагона.

В качестве таких нагрузок рассматриваются:

– $R$ — реакция в пятнике;

– $N$ — нагрузка от веса груза.

Реакция в пятнике для любой из групп схем загрузок определяется по формуле:

$$R = \frac{mg}{2}, \tag{3}$$

где $m$ — масса перевозимого груза (включая массу МКК) в соответствии со схемой загрузки;

$g$ — ускорение свободного падения

Нагрузка от действия груза при перевозке контейнеров определяется по формуле:

$$N_j = \frac{m_к g}{2}, \tag{4}$$

где $m_к$ — масса контейнера.

При определении изгибающих моментов от действия МКК с грузом к раме вагона прикладывались сосредоточенные нагрузки в местах расположения фитинговых упоров.

В результате расчетов были получены значения изгибающих моментов для характерных сечений рамы вагона и построены эпюры изгибающих моментов для рассматриваемых схем загрузки (см. рис. 5). С целью максимально равномерного распределения нагрузки схема загрузки рельсов с применением МКК подобрана таким образом, чтобы расположение секций МКК и опирание груза соответствовало расположению фитингов контейнеров длиной 20 футов.

На рис. 5 видно, что воздействие рельсов с МКК на раму платформы не превышает воздействия контейнеров. Таким образом, конструкция платформы не требует усиления для обеспечения перевозки рельсов с применением МКК.

### *3.2. Расчет усилия затяжки болтов*

Для предотвращения смещения рельсов относительно МКК при соударениях вагонов или резком торможении требуется обеспечить достаточное прожатие резиновых пластин для компенсации разности высот рельсов (рельсы могут

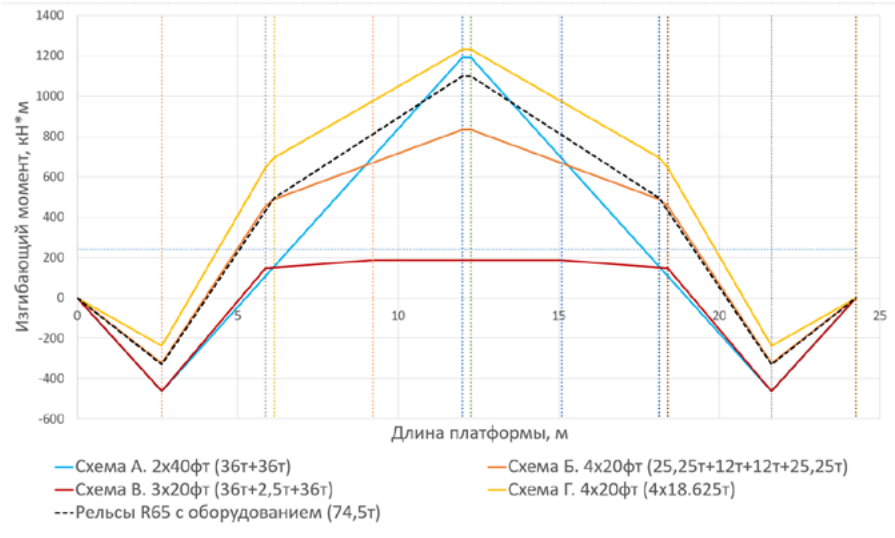



**Рис. 5.** Эпюры изгибающих моментов

иметь разную высоту как в пределах допусков при изготовлении, так и вследствие износа в эксплуатации) и достаточную силу трения для удержания каждого рельса, о чем говорилось ранее.

По результатам расчета минимального общего усилия затяжки болтов выбиралось их количество для каждой секции, диаметр, шаг резьбы и момент затяжки. Усилие затяжки болтов далее использовалось для расчета прочности элементов МКК.

### *3.3. Расчет прочности*

Расчет прочности элементов МКК проводился для двух наиболее критичных (с точки зрения величин возникающих напряжений) расчетных случаев:

1. На МКК действуют силы собственного веса, веса рельсов и силы затяжки болтов.

2. МКК подвергается действию ударных нагрузок в автосцепку вагона.

На рис. 6 представлена расчетная модель с сеткой конечных элементов секции комплекта и основными силами, действующими при соударении (силы трения, реакции опор рельсов в местах контакта с балками и т. п. не показаны). Между рельсами и резиновыми пластинами заданы условия контактного взаимодействия. Болты, стягивающие секцию, смоделированы при помощи стержневых элементов.

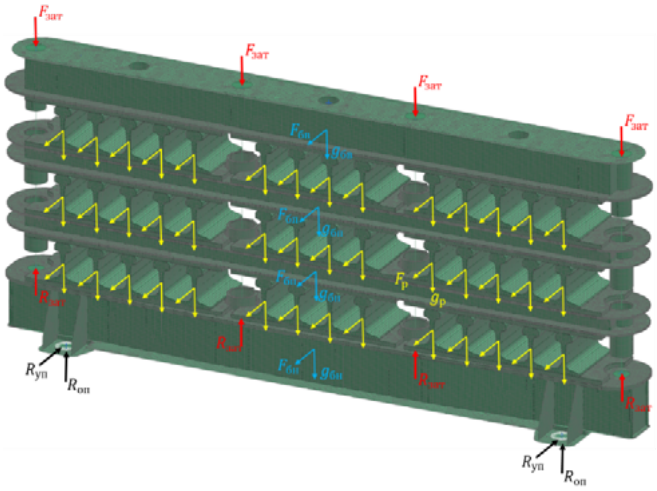
Допускаемые напряжения для стальных элементов МКК определены согласно ГОСТ 33211 [8] и равны 195 МПа для первого расчетного случая и 325 МПа для второго расчетного случая. Напряжения в стальных элементах и резиновых пластинах в пределах допускаемых значений (рис. 7).

Наиболее нагруженной по второму расчетному случаю является нижняя балка, которая кроме инерционных нагрузок от рельсов при соударении одновременно воспринимает вес груза с учетом дополнительной вертикальной силы от «клевка», возникающего при соударении (рис. 7).

Результаты расчетов прочности подтверждают, что напряжения в элементах МКК не превышают допускаемые значения.

## 4. Испытания

Для допуска МКК к эксплуатации совместно с вагоном необходимо было подтвердить его соответствие требованиям ГОСТ 33211—2014 [8], технических условий [9] и [10] в части своего функционального назначения. Для подтверждения был проведен целый комплекс испытаний МКК, который включал в себя:




$F_{зат}$ — сила затяжки болта, $F_{бв}$ — сила инерции балки верхней, $F_{бп}$ — сила инерции балки промежуточной, $F_{бн}$ — сила инерции балки нижней, $F_р$ — сила инерции рельса, $g_{бв}$ — ускорение свободного падения балки верхней, $g_{бп}$ — ускорение свободного падения балки промежуточной, $g_{бн}$ — ускорение свободного падения балки нижней, $g_{бр}$ — ускорение свободного падения рельса, $R_{зат}$ — реакция от затяжки болта, $R_{уп}$ — реакция упорная от взаимодействия с фитинговым упором, $R_{оп}$ — реакция опоры

**Рис. 6.** Общий вид расчетной модели с сеткой конечных элементов и основными силами, действующими при соударении

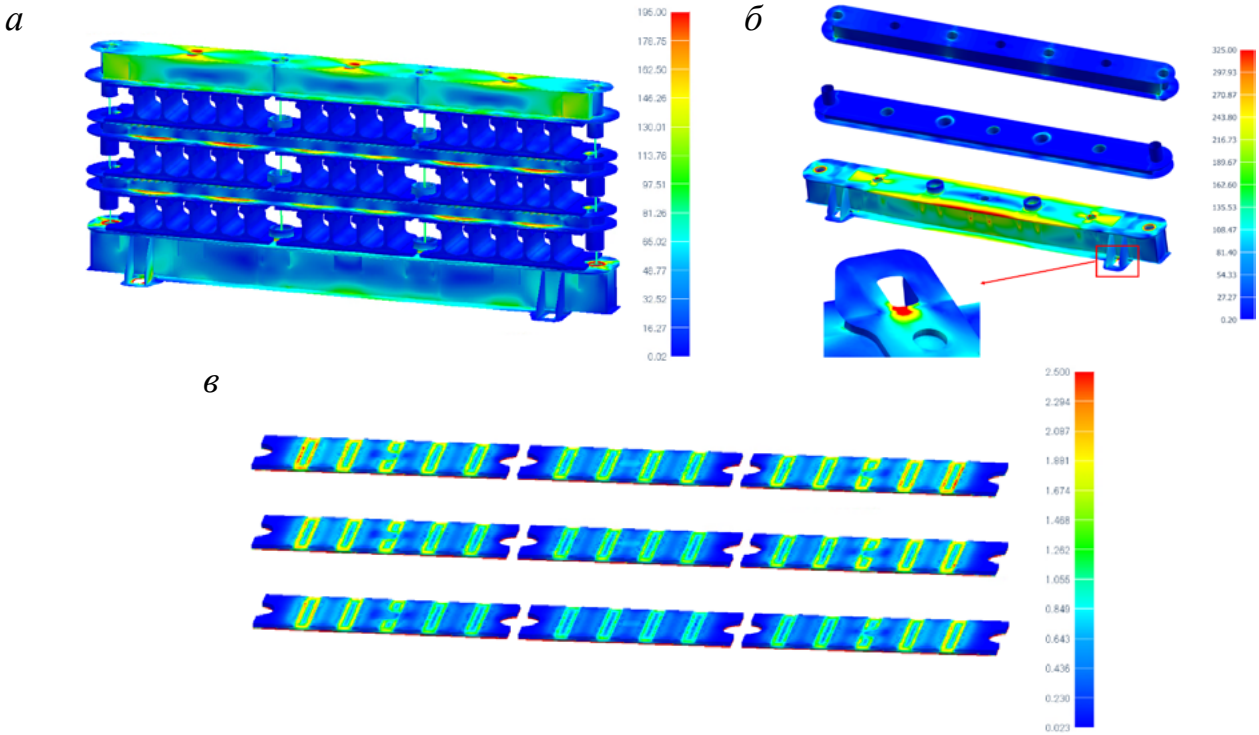



**Рис. 7.** Распределение эквивалентных напряжений в элементах МКК, МПа: *а* — напряжения от действия собственного веса, веса груза с учетом коэффициента вертикальной динамики и усилия затяжки болтов; *б* — напряжения от действия сил при соударении вагона с МКК и рельсами; *в* — напряжения в резиновых пластинах

**Рис. 8.** Функциональные и статические испытания на прочность

– испытания по определению габаритных и присоединительных размеров МКК (испытания проводились без вагона и груза);

– статические испытания на прочность;

– испытания на прочность при соударении;

– функциональные испытания.

При статических испытаниях на прочность использовался вагон-платформа модели 13-6903, загруженный испытуемым МКК и рельсами типа Р65 длиной 25 м (42 шт.), при этом масса брутто вагона составила 99,5 т. При испытаниях была проведена экспериментальная проверка прочности и устойчивости металлоконструкции МКК и отдельных его элементов при действии статических нагрузок, предусмотренных ГОСТ 33211—2014 [8]. Совместно со статическими испытаниями на прочность были проведены функциональные испытания (см. рис. 8), при которых проводилась проверка установки нижних балок на вагон (в части взаимодействия с фитинговыми упорами), проверка удобства и безопасности проведения работ при погрузке и разгрузке рельсов, закрепление груза при помощи болтов.

При испытаниях на прочность при соударении также использовался вагон, загруженный испытуемым МКК и рельсами, с массой брутто 99,5 т. При испытаниях была проведена экспериментальная проверка прочности и устойчивости металлоконструкции МКК и отдельных его элементов при действии динамических нагрузок от соударения, предусмотренных ГОСТ 33211—2014 [8]. Соударения производились по двум схемам. Первая схема была реализована путем накатывания вагона-бойка на вагон с испытуемым МКК и рельсами, находившийся в сцепе с вагоном-подпором, который, в свою очередь, был сцеплен с подпором (представляет собой железобетонный блок, оборудованный автосцепным устройством). Вторая схема была реализована путем накатывания вагона-бойка в свободностоящий вагон с испытуемым МКК с последующим накатом в вагон-подпор, сцепленный с подпором.

Согласно полученным положительным результатам по итогу проведенного комплекса испытаний, МКК подтвердил свое функциональное назначение согласно требованиям нормативных документов.

Дополнительно совместно с испытаниями МКК был проведен комплекс испытаний и самой платформы для подтверждения возможности расширения номенклатуры перевозимых грузов. В связи с тем, что конструкция серийного вагона для применения МКК не изменяется, для подтверждения прочности был предусмотрен следующий объем испытаний:

– испытания по оценке возможности прохождения кривых малого радиуса (так как груз выступает за лобовые листы рамы вагона);

– статические испытания на прочность;

– испытания на прочность при соударении.

В ходе испытаний вагона были получены положительные результаты, которые подтвер-

**Рис. 9.** Соударение платформы с испытуемым МКК и рельсами при испытаниях проверки надежности размещения и крепления груза

дили прочностные характеристики и безопасность конструкции.

Кроме вышеописанного комплекса испытаний МКК и вагона была проведена проверка надежности размещения и крепления груза в соответствии с требованиями технических условий [9] и [10]. В рамках данной проверки проведена серия соударений, при которых вагон с испытуемым МКК и рельсами накатывался на «стенку» в виде груженых вагонов (см. рис. 9). При испытаниях фиксировались скорость накатывания вагона с испытуемым МКК, а также изменение положения груза с помощью нанесенных на него меток.

На завершающем этапе комплекса испытаний проведена опытная перевозка по сети железных дорог вагона-платформы модели 13-6903, загруженного рельсами с применением МКК по проекту местных технических условий. По результатам перевозки подтверждена надежность нового способа размещения и крепления груза и утвержден проект местных технических условий согласно требованиям [9] и [10].

## Заключение

Проведенные испытания и результаты опытной перевозки подтвердили основные показатели разработанного комплекта крепления:

– обеспечена возможность применения для перевозки рельсов обычной контейнерной платформы;

– упрощено проведение погрузо-разгрузочных операций;

– увеличена надежность крепления груза и безопасность перевозки;

– исключено применение одноразовых реквизитов крепления;

– обеспечена возможность перемещения порожнего МКК любым видом транспорта, а также удобство компактного складирования и хранения;

– обеспечена простота конструкции (без применения технически сложных и дорогостоящих элементов);

– обеспечена взаимозаменяемость элементов МКК, легкость ремонта и замены отдельных составных частей.

Применение МКК позволяет вывести на качественно новый уровень услугу по транспортировке 25-метровых рельсов и длинномерного проката.

## Список источников

1. Патент RU 2828628 Российская Федерация. Многооборотный комплект крепления для перевозки рельсов и длинномерного проката: заявл. 13.10.2023, опубл. 14.10.2024, Бюл. № 29 / С. В. Мозгрин.

2. Платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров, модель 13-6903. — URL: https://www.uniwagon.com/products/platforms _for_the_transportation_of_large-capacity_containers/platform_for_the_transportation_ of_large-capacity_containers_13-6903/ (дата обращения: 03.02.2025)

3. Мозгрин С. В. Модульная концепция использования фитинговых платформ для расширения номенклатуры перевозимых контейнеров / С. В. Мозгрин // Вестник ВНИИЖТ. — 2018. — Т. 77. — № 3. — С. 177–181.

4. ГОСТ Р 51045—2014. Рельсы для путей промышленного железнодорожного транспорта. Общие технические условия.

5. ГОСТ Р 51685—2022. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия.

6. ГОСТ Р 51685—2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия.

7. EN 13674-1. Железные дороги. Путь. рельсы. Часть 1. Рельсы Виньоля 46 кг/м и более.

8. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам.

9. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах, утв. МПС Российской Федерации 27 мая 2003 г. № ЦМ-943.

10. Технические условия размещения и крепления грузов, Приложение 3 к СМГС.

Дата поступления: 07.03.2025
Решение о публикации: 07.04.2025

**Контактная информация:**
КОНОНЕНКО Александр Сергеевич — главный конструктор, руководитель отдела «Платформы»; akononenko@tt-center.ru
МОЗГРИН Сергей Владимирович — начальник отдела технических решений проектной логистики; mozgrinsv@rzdlog.ru
ПРИСМОТРОВА Алена Алексеевна — инженер-конструктор 1 категории отдела «Платформы»; aprismotrova@tt-center.ru
ЮЛДАШЕВ Азамат Хусанович — младший инженер-исследователь научно-исследовательской дирекции; ayuldashev@tt-center.ru

## Innovative Transport Technology As a Tool for Expanding Rail and Long Product Flat Car Operation

**A. S. Kononenko[1], S. V. Mozgrin[2], A. A. Prismotrova[1], A. Kh. Yuldashev[1]**

[1]"VNITTC" LLC, 22, lit. A, Petrogradskaya Emb., Saint-Petersburg, 197046, Russian Federation
[2]"RZD Logistics" JSC, 34, Mashi Poryvaevoy str., Moscow, 107078, Russian Federation

**For citation:** Kononenko A. S., Mozgrin S. V., Prismotrova A. A., Yuldashev A. Kh. Innovative Transport Technology As a Tool for Expanding Rail and Long Product Flat Car Operations // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 329–340. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-329-340

### Summary

**Purpose:** To analyse and identify the advantages and disadvantages of rail transportation operations based on a review of existing methods; to determine the most promising transportation method for further development. To demonstrate the possibility of using the existing flat cars with improved functionality without modernization. To develop a re-usable rail fastener unit (hereafter referred to as RFU) and to carry out calculations and tests on a 13-6903 standard fitting platform model. To ensure that the by means of RFU doesn't exceed the load from the containers. **Methods:** Development and testing of the RFU and fitting platform in accordance with GOST 33211-2014, "Specifications for placing and securing freight rail wagons and containers" No. CM-943, "Specifications

for placing and securing of cargo" (Annex 3 to the Agreement on International Carriage of Goods by Rail). **Results:** A promising method for the transportation of 25-m long rails that does not require any special railway vehicles has been selected and validated. An RFU has been developed and its basic parameters have been confirmed based on the results of tests and trial operation. A possibility of using container flat wagons for rails transportation has been demonstrated. The load has been securely fastened and transport safety has been ensured. The use of disposable fasteners has been avoided. The possibility of transporting an empty RFU by any means of transport was demonstrated, as was the convenience of compact stacking and storage. The simplicity of the design (without the use of technically sophisticated and expensive components), the interchangeability of the RFU components and the ease of repair and replacement of individual elements have been demonstrated. **Practical significance:** The use of the RFU takes the handling of 25m rails and long products to a whole new level.

**Keywords:** Rail transportation, re-usable fastener unit (RFU), flat car/fitting platform, container flatcar.

## References

1. Mozgrin S. V. *Mnogooborotnyy komplekt krepleniya dlya perevozki rel'sov i dlinnomernogo prokata* [Multi-turn fastening kit for transportation of rails and long rolled products]. Patent RF, no. 2828628, 2024. (In Russian)

2. *Platforma dlya perevozki krupnotonnazhnykh konteynerov, model' 13-6903* [Platform for transportation of large-capacity containers, model 13-6903]. Available at: https://www.uniwagon.com/products/platforms _for_the_ transportation_of_large-capacity_containers/platform_for_ the_transportation_ of_large-capacity_containers_13-6903/ (accessed: February 3, 2025). (In Russian)

3. Mozgrin S. V. Modul'naya kontseptsiya ispol'zovaniya fitingovykh platform dlya rasshireniya nomenklatury perevozimykh konteynerov [Modular concept of using container platforms to expand the range of transported containers]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT]. 2018, vol. 77, Iss. 3, pp. 177–181. (In Russian)

4. *GOST R 51045—2014. Rel'sy dlya putey promyshlennogo zheleznodorozhnogo transporta. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST R 51045—2014. Rails for industrial rail transport. General specifications]. (In Russian)

5. *GOST R 51685—2022. Rel'sy zheleznodorozhnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST R 51685–2022. Railway rails. General specifications]. (In Russian)

6. *GOST R 51685—2013. Rel'sy zheleznodorozhnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST R 51685—2013. Railway rails. General specifications]. (In Russian)

7. *EN 13674-1. Zheleznye dorogi. Put'. rel'sy. Chast' 1. Rel'sy Vin'olya 46 kg/m i bolee* [EN 13674-1. Railways. Track. Rails. Part 1. Vignoles rails 46 kg/m and over]. (In Russian)

8. *GOST 33211—2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST 33211—2014. Freight wagons. Requirements for strength and dynamic qualities]. (In Russian)

9. *Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya gruzov v vagonakh i konteynerakh, utv. MPS Rossiyskoy Federatsii 27 maya 2003 g. № TsM-943* [Technical conditions for the placement and securing of goods in wagons and containers, approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation on May 27, 2003, No. CM-943]. (In Russian)

10. *Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya gruzov, Prilozhenie 3 k SMGS* [Technical conditions for the placement and securing of goods, Appendix 3 to SMGS]. (In Russian)

Received: March 07, 2025
Accepted: April 07, 2025

**Author's information:**
Alexander S. KONONENKO — Chief Design Engineer, Head of "Flat Cars" Division; akononenko@tt-center.ru
Sergei V. MOZGRIN — Head of Logistics & Engineering Division; mozgrinsv@rzdlog.ru
Alyona A. PRISMOTROVA — 1st Category Design Engineer, "Flat Cars" Division; aprismotrova@tt-center.ru
Azamat Kh. YULDASHEV — Junior R&D Engineer, R&D Department; ayuldashev@tt-center.ru

УДК: 621.331.3.025.1

# Повышение эффективности электроснабжения южной части Ирака за счет формирования единой энергосистемы

**М. Д. Д. Алсултан[1,2], М. В. Шевлюгин[1]**

[1]Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Российская Федерация, 127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9
[2]Университет Кербелы, Ирак, Кербела

**Для цитирования:** *Алсултан М. Д. Д., Шевлюгин М. В.* Повышение эффективности электроснабжения южной части Ирака за счет формирования единой энергосистемы // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 341–350. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-341-350

## Аннотация

**Цель:** Электроэнергетическая система южной части Ирака играет ключевую роль в обеспечении региона энергией, необходимой для его социально-экономического развития. Однако существующая инфраструктура характеризуется децентрализованным расположением питающих центров, которые функционируют с ограниченной координацией между собой. Это приводит к нестабильности энергоснабжения, частым отключениям электроэнергии; потерям энергии при транспортировке; ограничению интеграции возобновляемых источников энергии (например, солнечной и ветровой). **Методы:** Одним из эффективных решений для преодоления этих проблем является объединение (закольцовывание) питающих центров энергосистемы, представляющее собой объединение всех питающих центров в единую сеть. **Результаты:** Этот подход позволит значительно повысить устойчивость энергосистемы к перегрузкам и аварийным отключениям, обеспечив бесперебойную подачу электроэнергии в регионе. В статье рассматриваются основные преимущества закольцовывания, включая снижение энергопотерь, оптимизацию распределения нагрузки, экономическую эффективность и интеграцию новых источников энергии, в том числе возобновляемых. Особое внимание уделяется техническим аспектам реализации, таким как строительство новых линий электропередачи, модернизация подстанций, внедрение цифровых технологий управления и подготовка квалифицированных кадров. **Практическая значимость:** Объединение различных центров снабжения, расположенных в южной части Ирака, в единую взаимосвязанную энергосистему представляет собой чрезвычайно важный маневр, направленный на укрепление энергетической безопасности в этом конкретном регионе, который столкнулся с многочисленными проблемами в области энергоснабжения и распределения энергии. Этот инновационный подход не только повысит надежность и стабильность энергоснабжения в регионе, но и заложит прочную основу для устойчивого и продолжительного экономического роста и инициатив в области развития, необходимых для будущего процветания региона. Успешное осуществление этого амбициозного проекта требует значительных инвестиционных ресурсов и согласованных усилий многих заинтересованных сторон, однако существенные преимущества, которые он обещает дать в долгосрочной перспективе, делают его не только необходимым, но и исключительно обнадеживающим для общего развития региона. Такая интеграция имеет серьезные последствия, поскольку она не только решает неотложные энергетические проблемы, но и открывает путь к созданию более устойчивой инфраструктуры, способной поддерживать различные виды экономической деятельности и повышать качество жизни местного населения.

**Ключевые слова:** Электроснабжение, кольцевая сеть, потери электроэнергии, надежность энергоснабжения, дефицит мощности, синхронизация потребления, энергетическая эффективность.

## Введение

Объединенные (кольцевые) электрические сети — это тип электрической сети, в которой энергия имеет возможность передаваться по кольцу линий электропередачи. Замкнутые сети представляют собой сети, в которых электроэнергия доставляется к потребителям как минимум с двух сторон. Это позволяет обеспечить высокую надежность и отказоустойчивость системы, так как при повреждении одного из элементов сети подача электроэнергии может быть перенаправлена по другим линиям и кольцо продолжит функционировать [1].

В случае выхода из строя какого-либо участка радиальных (не кольцевых) сетей многие потребители остаются без электричества, что является значительным недостатком таких сетей. В связи с этим для обеспечения надежного электроснабжения важных потребителей, которым нельзя позволить длительные перерывы в электроснабжении, используются замкнутые сети [2–6].

Существуют различные типы замкнутых сетей, включая простые, где нагрузки питаются только с двух сторон, и сложные, где электроэнергия может подаваться к узловым точкам с трех и более сторон [7, 8].

## Объединение энергосистемы

Объединение питающих центров в кольцевую систему, помимо надежности электроснабжения, несет еще очень важную функцию — возможность маневра и перераспределения потребляемых и генерирующих мощностей в режиме реального времени для компенсации их дефицита и избытка [9, 10]. На рис. 1. изображена схема объединения различных центров питания в единую энергетическую систему на карте Южного Ирака (ЭЭС). зеленым цветом показаны предлагаемые ЛЭП для закольцовывания энергосистемы

Рис. 2 представляет изменение показателей питания и потребления для каждой энергетической системы (ЭС) в течение суток, обозначает различные энергетические системы по районам. Некоторые линии демонстрируют резкие изменения в конкретные часы, что может быть связано с изменением нагрузки или потребностей в этих регионах.

Следует отметить, что полное объединение питающих центров всех районов южной части Ирака (рис. 2) не решает проблемы дефицита мощности, особенно в утреннее и вечернее время. В связи с этим из экономических и технических факторов была предложена методика ранжирования районов энергопотребления в виде целевой функции по трем параметрам:

1. Синхронизация времени генерации и потребления энергии в объединенных районах. При этом в одно и то же время сумма генерирующих мощностей объединенных районов должна соответствовать сумме мощностей потребителей тех же районов (выражение 1) [11]:

$$P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{ген}} = P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{пот}}, \tag{1}$$

где $P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{ген}}$ — мощность генерации электроэнергии в конкретный момент времени.

$P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{пот}}$ — мощность потребления электроэнергии в конкретный момент времени.

2. Снижение дефицита мощности в объединенных районах (выражение 2) [11]:

$$\Delta P(t)_{\text{эл.э}} = P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{ген}} - P(t)_{\text{эл.э}}^{\text{пот}} = \\ = \sum_{i=1}^{n} P(t)_{i}^{\text{ген}} - \sum_{j=1}^{m} P(t)_{j}^{\text{пот}}, \tag{2}$$

где $\Delta P(t)_{\text{эл.э}}$ — дефицит мощности в конкретный момент времени.

$n$ — количество регионов южного Ирака;

$P(t)_{i}^{\text{ген}}$ — мощность генерации электроэнергии в конкретный момент времени $i$-того региона южного Ирака;

$P(t)_{j}^{\text{пот}}$ — мощность потребления электроэнергии в конкретный момент времени $j$-того региона южного Ирака.

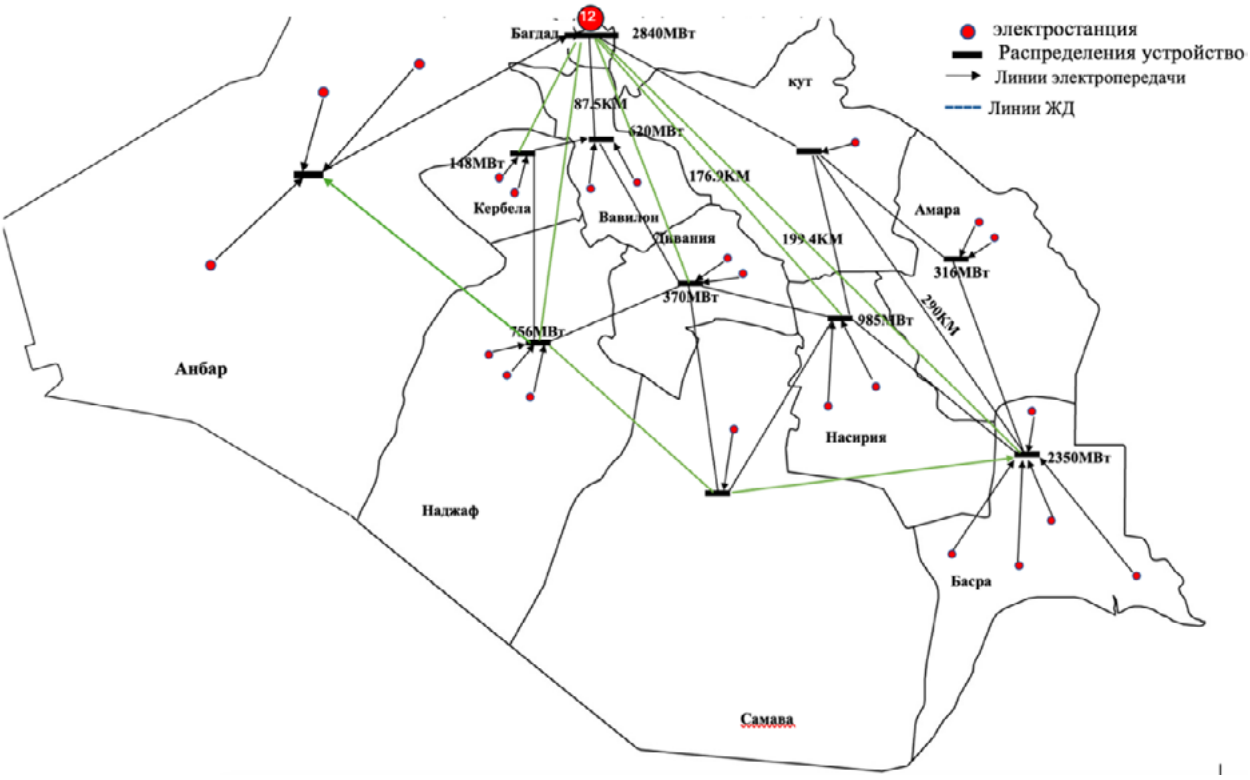



**Рис. 1.** Объединение питающих центров в единую ЭЭС

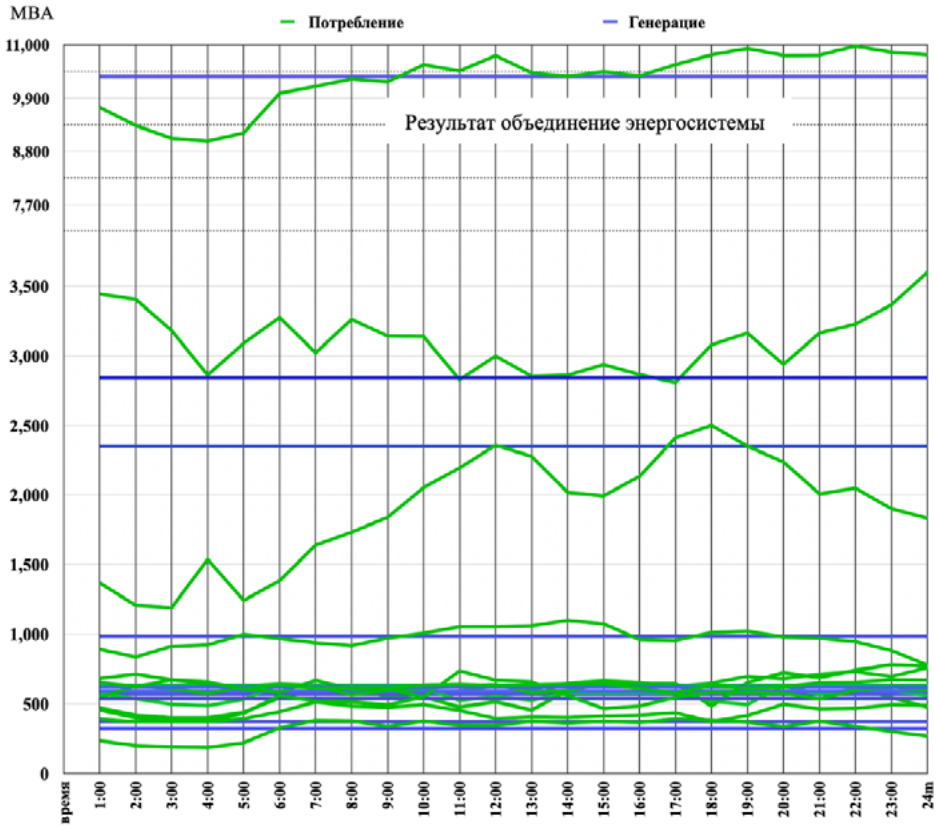



**Рис. 2.** Показание питания и потребления каждой ЭС и результат объединения ЭЭС всех районов южной части Ирака (МВА/ч)

Как следствие, выровняются годовые значения выработки и потребления электроэнергии (выражение 3), а также снизится общий ее дефицит (выражения 4 и 5) [11].

$$A_{\text{эл.э}}^{\text{год. ген}} = A_{\text{эл.э}}^{\text{год. пот}}, \quad (3)$$

где $A_{\text{эл.э}}^{\text{год. ген}}$ — годовая выработка электроэнергии южной части Ирака.

$A_{\text{эл.э}}^{\text{год. пот}}$ — годовое потребление электроэнергии южно9й части Ирака.

$$D_{\text{эл.э}}^{\text{год}} = A_{\text{эл.э}}^{\text{год. ген}} + A_{\text{эл.э}}^{\text{год. имп}} - A_{\text{эл.э}}^{\text{год. пот}}, \quad (4)$$

где $D_{\text{эл.э}}^{\text{год}}$ — дефицит электроэнергии в год;

$A_{\text{эл.э}}^{\text{год. ген}}$ — энергия генерации в год;

$A_{\text{эл.э}}^{\text{год. имп}}$ — энергия импорта в год;

$A_{\text{эл.э}}^{\text{год. пот}}$ — потребление энергии в год.

$$D_{\text{эл.э}}^{\text{год}} = \sum_{i=1}^{n} \int_0^{T_{\text{год}}} P(t)_i^{\text{ген}}\, dt + \sum_{j=1}^{m} \int_0^{T_{\text{год}}} P(t)_j^{\text{имп}}\, dt - \\ - \sum_{k=1}^{h} \int_0^{T_{\text{год}}} P(t)_k^{\text{пот}}\, dt, \quad (5)$$

где $P(t)_i^{\text{ген}}$ — мощность генерации электроэнергии в конкретный момент времени *i*-того региона южного Ирака;

$P(t)_j^{\text{пот}}$ — мощность потребления электроэнергии в конкретный момент времени *j*-того региона южного Ирака;

$P(t)_j^{\text{имп}}$ — мощность импорта электроэнергии в конкретный момент времени *j*-того региона южного Ирака.

3. Снижение протяженности ЛЭП в объединенных районах (близость регионов друг к другу).

Общая математическая форма целевой функции для определения приоритетных районов для объединения ЭЭС имеет следующий вид [11]:

$$f(t,p,l)^{\text{объед}} = \\ = \begin{cases} t_i^{\text{ген}} = t_i^{\text{пот}} \\ \sum_{i=1}^{n} P(t)_i^{\text{ген}} - \sum_{j=1}^{m} P(t)_j^{\text{пот}} \to \min \\ \sum_{k=1}^{h} L_{\text{к}}^{\text{ЛЭП}} \to \min \end{cases} \quad (6)$$

где $P(t)_i^{\text{ген}}$ — мощность генерации электроэнергии в конкретный момент времени *i*-того региона южного Ирака;

$P(t)_j^{\text{пот}}$ — мощность потребления электроэнергии в конкретный момент времени *i*-того региона южного Ирака;

$t_i^{\text{ген}}$ — конкретный момент времени при генерации энергии;

$t_i^{\text{пот}}$ — конкретный момент времени при потреблении энергии;

*n* — количество регионов южного Ирака.

На рис. 3 и 4 представлен пример объединения трех районов Ирака (Анбар — Наджав — Басра). По суммарным графикам генерации и потребления энергии видно, что дефицит мощности сведен к минимуму, а близость расположения районов друг к другу позволяет снизить капитальные затраты на строительство ЛЭП.

На рис. 4 демонстрируется эффект от объединения энергосистем (ЭЭС) трех районов южной части Ирака. На основе данных графиков и анализа можно выделить следующие ключевые аспекты:

– объединение позволяет минимизировать дефицит электроэнергии за счет эффективного перераспределения мощности между районами. Это особенно важно в условиях, когда отдельные регионы сталкиваются с дефицитом в утренние и вечерние часы [12, 13];

– благодаря близкому расположению районов друг к другу снижается протяженность линий электропередачи (ЛЭП). Это приводит к уменьшению потерь энергии при транспортировке [14, 15];

**Рис. 3.** Объединение ЭЭС трех районов южной части Ирака

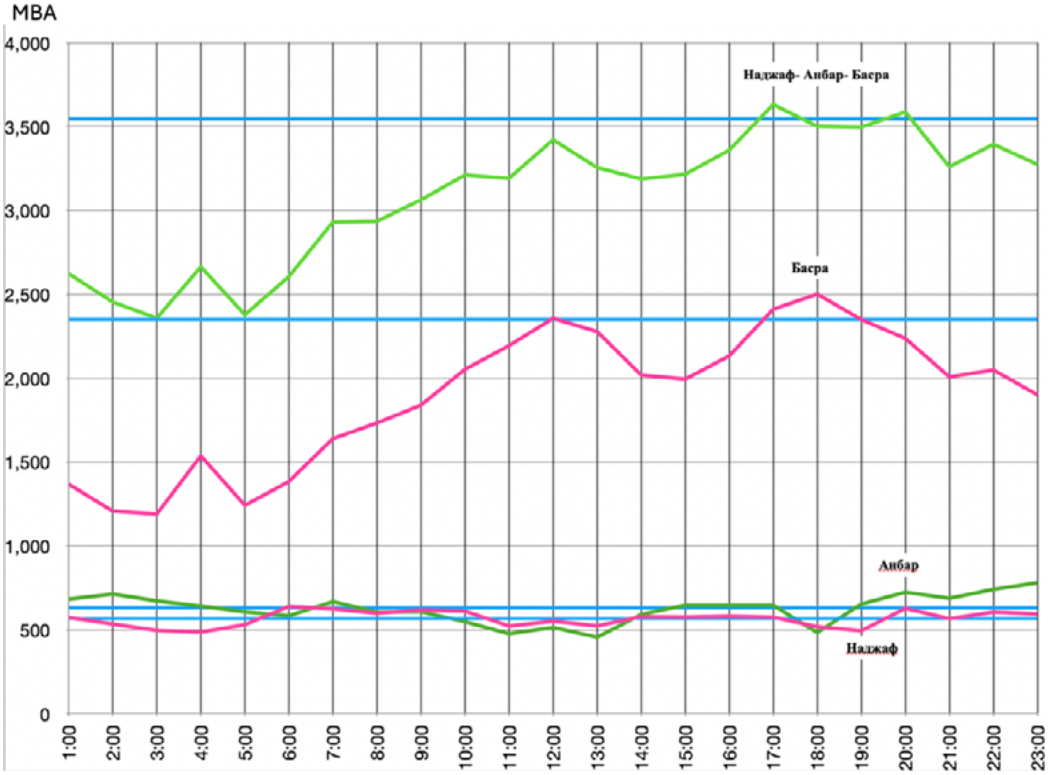



**Рис. 4.** Эффект мощности от объединения ЭЭС трех районов южной части Ирака (МВА/ч)

– суммарные графики показывают синхронизацию генерации и потребления, что способствует выравниванию нагрузок в системе. При объединении три региона действуют как единая сеть, что дает возможность компенсировать локальные пики нагрузки [16, 17];

– сокращение капитальных затрат на строительство новых ЛЭП связано с оптимальным использованием существующей инфраструктуры и снижением необходимости резервирования мощностей;

– в случае аварии на одной из линий энергия может быть перенаправлена через другие участки сети, что обеспечивает более стабильное энергоснабжение.

## Заключение

Объединение питающих центров южной части Ирака в единую кольцевую энергетическую систему представляет собой важный шаг к повышению надежности и эффективности энергоснабжения региона. Реализация данной концепции позволяет сократить потери электроэнергии, оптимизировать распределение нагрузок и интеграцию возобновляемых источников энергии. Кроме того, кольцевые сети обеспечивают устойчивость к перегрузкам и аварийным ситуациям, что значительно повышает энергетическую безопасность региона [18–20].

Стратегическое значение данного проекта заключается не только в улучшении текущих условий энергоснабжения, но и в создании базы для долгосрочного экономического развития региона. Хотя проект требует значительных усилий и инвестиций, его потенциальные выгоды делают его крайне перспективным [21].

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой экономически оптимальных решений для внедрения кольцевых сетей, учетом региональных особенностей и продвижением инновационных технологий управления энергосистемами [22].

## Список источников

1. Al-Hamadani S. Solar energy as a potential contributor to help bridge the gap between electricity supply and growing demand in Iraq: A review / S. Al-Hamadani // International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS). — 2020. — Vol. 9. — Pp. 302–312. — DOI: 10.11591/ijaas.v9.i4.pp302-312.

2. Barth D. Optimization of electrical network configuration: Complexity and algorithms for ring topologies / D. Barth, T. Mautor, A. De Moissac, D. Watel et al. // Theoretical Computer Science. — 2021. — Vol. 859. — Pp. 162–173.

3. Beiranvandi H. A resilience-oriented restoration framework for multi-area active distribution network following a disaster / H. Beiranvandi, A. Samanfar, M. Doostizadeh, R. Saki // IET Renewable Power Generation. — 2024. — Vol. 18. — Pp. 3810–3824. — DOI: org/10.1049/rpg2.13042.

4. Biller M. Protection algorithms for closed-ring grids with distributed generation / M. Biller, J. Jaeger // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2022. — Vol. 37. — Pp. 4042–4052. DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3144004.

5. Stumbrger M. Permanent closed-loop operation as a measure for improving power supply reliability in a rural medium voltage distribution network / M. Stumbrger, M. Roser, M. Pintaric, B. Polajzer // 19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'21) — Almeria (Spain), 28th to 30th July 2021. — Vol. 19. — Pp. 523–527. — DOI: 10.24084/repqj19.335.

6. Mosaed I. M. A new analytical approach of cost benefit analysis for automated medium voltage closed ring distribution networks / I. M. Mosaed, S. Hasan // 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). — Cairo, 17–19 December 2020. — IEEE, 2019. — Pp. 1095–1100. — DOI: 10.1109/mepcon47431.2019.9007985.

7. De Groot R. J. W. Closed-ring operation of medium voltage distribution grids: theory meets practice / R. J. W. De Groot, J. Morren, J. G. Slootweg // 23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2015). — Lyon 15–18 June 2015. — Pp. 1–5.

8. Survilo J. Enhancement and comparison of simple types of closed networks / J. Survilo, J. Rozenkrons // Latvian journal of physics and technical sciences. — 2009. — Vol. 46. — Pp. 36–50. — DOI: 10.2478/v10047-009-0016-z.

9. Simpson-Porco J. W. Voltage collapse in complex power grids / J. W. Simpson-Porco, F. Dörfler, F. Bullo // Nature communications. — 2016. — Vol. 7. — P. 10790. — DOI: 10.1038/ncomms10790.

10. Javaid S. Real-time power supply and demand mediation algorithm for Energy on Demand system / S. Javaid, T. Kato // 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW). — Taipei 12–14 June 2017. — IEEE, 2017. — Pp. 191–192. — DOI: 10.1109/ICCE-China.2017.7991060.

11. Шевлюгин М. В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореф. дисс. … д-ра техн. наук / М. В. Шевлюгин. — М., 2013. — 48 с.

12. Gao Y. Study on the optimal allocation of resources for regional integrated energy stations based on the interconnection of multiple operators / Y. Gao, Q. Li, Y. Yang, L. Zhang // Second International Conference on Energy, Power, and Electrical Technology (ICEPET 2023). — Kuala Lumpur 25 September 2023. — SPIE, 2023. — Vol. 12788. — Pp. 298–307. — DOI: 10.1117/12.3004272.

13. Sehrawat S. A cost optimal alternative for district power supply through an integrated system / S. Sehrawat, A. Srivastava, A. Mishra, K. Shukla et al. // 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE). — Patiala 17–19 November 2016. — IEEE, 2016. — Pp. 1–6. — DOI: 10.1109/IICPE.2016.8079343.

14. Salman H. M. Review on Causes of Power Outages and Their Occurrence: Mitigation Strategies / H. M. Salman, J. Pasupuleti, A. H. Sabry // Sustainability. — 2023. — Vol. 15. — P. 15001. — DOI: 10.3390/su152015001.

15. Fanti M. P. A district energy management based on thermal comfort satisfaction and real-time power balancing / M. P. Fanti, A. M. Mangini, M. Roccotelli, W. Ukovich // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. — 2015. — Vol. 12. — Pp. 1271–1284. — DOI: 10.1109/TASE.2015.2472956.

16. King D. M. Power distribution management based on distributed networking protocol analytics / D. M. King, R. D. King // U.S. Patent and Trademark Office. — 2024. — № 11,989,069.

17. Gaur G. Demand side management in a smart grid environment / G. Gaur, N. Mehta, R. Khanna, R. Kaur // 2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC). — Singapore 23–26 July 2017. — IEEE, 2017. — Pp. 227–231. — DOI: 10.1109/ICSGSC.2017.8038581.

18. Serrano-Arévalo T. I. The impact of circular economy indicators in the optimal planning of energy systems / T. I. Serrano-Arévalo, F. A. Díaz-Alvarado, J. Tovar-Facio, J. M. Ponce-Ortega // Sustainable Production and Consumption. — 2024. — Vol. 44. — Pp. 234–249. — DOI: 10.1016/j.spc.2023.12.018.

19. Jawad I. M. Enhancing and improving the performance of the Iraqi super grid 400kV by connection distributed generation based on optimization techniques / I. M. Jawad, W. S. Majeed // AIP Conference Proceedings. — AL-Samawa 26–27 May 2021. — AIP Publishing, 2021. — Vol. 2404. — DOI: 10.1063/5.0071004.

20. Abass A. Z. Load Flow and Transient Stability Analyses for an Integrated Solar Combined Cycle Station in Iraqi Southern by Using ETAP / A. Z. Abass, D. A. Pavlyuchenko, A. V. Prokopov, S. H. Zozan // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. — 2021. — Vol. 14. — Pp. 5–16. — DOI: 10.17516/1999-494X-0285.

21. Li Z. Optimal Operation of Integrated Energy System Considering Power Supply Reliability / Z. Li, S. Lin, J. Tan // 2024 7th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE). — Yangzhou 26–28 April 2024. — IEEE, 2024. — Pp. 1468–1473. — DOI: 10.1109/CEEPE62022.2024.10586490

22. Zlobina N. Impact of energy economy development on the region's population life quality / N. Zlobina, O. Kondrakov, E. Merkulova, E. Muratova et al. //E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2019. — Vol. 110. — P. 02106. — DOI: 10.1051/e3sconf/201911002106.

Дата поступления: 23.03.2025
Решения о публикации: 22.04.2025

**Контактная информация:**
АЛСУЛТАН Мохаммед Джафар Джасим — аспирант; 1144648@edu.rut-miit.ru
ШЕВЛЮГИН Максим Валерьевич — д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой «Электроэнергетика транспорта»; mx_sh@mail.ru

# Improving the Efficiency of Electricity Supply in the Southern Part of Iraq Through the Formation of a Unified Energy System

**M. J. J. Alsultan[1,2], M. V. Shevlyugin[1]**

[1]Russian University of Transport, 9, bld 9, GSP-4, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation
[2]University of Karbala, Karbala, Iraq

**For citation:** Alsultan M. J. J., Shevlyugin M. V. Improving the Efficiency of Electricity Supply in the Southern Part of Iraq Through the Formation of a Unified Energy System // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 341–350. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-341-350

## Summary

**Purpose:** The electricity system of southern Iraq plays a key role in providing the region with the energy it needs for its socio-economic development. However, the existing infrastructure is characterized by decentralized feeder centres that operate with limited coordination among themselves. This leads to energy supply instability and frequent blackouts; loss of energy during transportation; limited integration of renewable energy sources (e.g., solar and wind). **Methods:** One of the most effective solutions to overcome these problems is to unify (loop) the power supply centres. This involves integrating all feeder centres into a single network. **Results:** This approach will significantly increase the resilience of the power system to overloads and emergency shutdowns ensuring uninterrupted power supply in the region. The article provides a comprehensive overview of the key benefits of looping, including reduced energy losses, optimized load sharing, cost-effectiveness and the integration of new energy sources including renewables. Key focus areas include the technical aspects of implementation, such as the construction of new transmission lines, the modernization of substations, the introduction of digital control technologies and the training of qualified personnel. **Practical significance:** The integration of feeder centres located in southern Iraq into a single interconnected power system is a critical manoeuvre aimed at strengthening energy security in this region, which is facing numerous challenges in the field of energy supply and distribution. This innovative approach will enhance the reliability and stability of the region's energy supply and lay the foundation for sustainable economic growth and initiative development, which are essential for the region's future prosperity. The successful implementation of this ambitious project requires significant investment of resources and a concerted effort by many stakeholders. However, the significant benefits it promises in the long term make it not only necessary but also extremely promising for the overall development of the region. This integration has significant potential, offering solutions to urgent energy challenges while also paving the way for more sustainable infrastructure that can support various economic activities and enhance the quality of life for local populations.

**Keywords:** Power supply, loop network, energy losses, reliability of power supply, power shortage, synchronization of consumption, energy efficiency.

## References

1. Al-Hamadani S. Solar energy as a potential contributor to help bridge the gap between electricity supply and growing demand in Iraq: A review. International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS), 2020, vol. 9, pp. 302–312. DOI: 10.11591/ijaas.v9.i4.pp302-312.

2. Barth D., Mautor T., Moissac De A., Watel D. et al. Optimization of electrical network configuration: Complexity and algorithms for ring topologies. Theoretical Computer Science, 2021, vol. 859, pp. 162–173.

3. Beiranvandi H., Samanfar A., Doostizadeh M., Saki R. A resilience-oriented restoration framework for multi-area active distribution network following a disaster. IET Renewable Power Generation, 2024, vol. 18, pp. 3810–3824. DOI: org/10.1049/rpg2.13042.

4. Biller M., Jaeger J. Protection algorithms for closed-ring grids with distributed generation. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, vol. 37, pp. 4042–4052. DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3144004.

5. Stumbrger M., Roser M., PintaricM., Polajzer B. Permanent closed-loop operation as a measure for improving power supply reliability in a rural medium voltage distribution network. 19th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'21) — Almeria (Spain), 28th to 30th July 2021, vol. 19, pp. 523–527. DOI: 10.24084/repqj19.335.

6. Mosaed I. M., Hasan S. A new analytical approach of cost benefit analysis for automated medium voltage closed ring distribution networks. 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, 17–19 December 2020, IEEE, 2019, pp. 1095–1100. DOI: 10.1109/mepcon47431.2019.9007985.

7. De Groot R. J. W., Morren J., Slootweg J. G. Closed-ring operation of medium voltage distribution grids: theory meets practice. 23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2015), Lyon 15–18 June 2015, pp. 1–5.

8. Survilo J., Rozenkrons J. Enhancement and comparison of simple types of closed networks. Latvian journal of physics and technical sciences, 2009, vol. 46, pp. 36–50. DOI: 10.2478/v10047-009-0016-z.

9. Simpson-Porco J. W., Dörfler F., Bullo F. Voltage collapse in complex power grids. Nature communications, 2016, vol. 7, p. 10790. DOI: 10.1038/ncomms10790.

10. Javaid S., Kato T. Real-time power supply and demand mediation algorithm for Energy on Demand system. 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), Taipei 12–14 June 2017, IEEE, 2017, pp. 191–192. DOI: 10.1109/ICCE-China.2017.7991060.

11. Shevlyugin M. V. *Energosberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuemye s ispol'zovaniem nakopiteley energii: avtoref. disc. … d-ra tekhn. nauk* [Energy-saving technologies in railway transport and subways implemented using energy storage devices: author's abstract. diss. … Doctor of Engineering Sciences]. Moscow, 2013, 48 p. (In Russian)

12. Gao Y., Li Q., Yang Y., Zhang L. Study on the optimal allocation of resources for regional integrated energy stations based on the interconnection of multiple operators. Second International Conference on Energy, Power, and Electrical Technology (ICEPET 2023). — Kuala Lumpur 25 September 2023, SPIE, 2023, vol. 12788, pp. 298–307. DOI: 10.1117/12.3004272.

13. Sehrawat S., Srivastava A., Mishra A., Shukla K. et al. A cost optimal alternative for district power supply through an integrated system. 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE), Patiala 17–19 November 2016, IEEE, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IICPE.2016.8079343.

14. Salman H. M., Pasupuleti J., Sabry A. H. Review on Causes of Power Outages and Their Occurrence: Mitigation Strategies. Sustainability, 2023, vol. 15, p. 15001. DOI: 10.3390/su152015001.

15. Fanti M. P., Mangini A. M., Roccotelli M., Ukovich W. A district energy management based on thermal comfort satisfaction and real-time power balancing. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, vol. 12, pp. 1271–1284. DOI: 10.1109/TASE.2015.2472956.

16. King D. M., King R. D. Power distribution management based on distributed networking protocol analytics. U.S. Patent and Trademark Office, 2024, № 11,989,069.

17. Gaur G., Mehta N., Khanna R., Kaur R. Demand side management in a smart grid environment. 2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC), Singapore 23–26 July 2017, IEEE, 2017, pp. 227–231. DOI: 10.1109/ICSGSC.2017.8038581.

18. Serrano-Arévalo T. I., Díaz-Alvarado F. A., Tovar-Facio J., Ponce-Ortega J. M. The impact of circular economy indicators in the optimal planning of energy systems. Sustainable Production and Consumption, 2024, vol. 44, pp. 234–249. DOI: 10.1016/j.spc.2023.12.018.

19. Jawad I. M., Majeed W. S. Enhancing and improving the performance of the Iraqi super grid 400kV by connection distributed generation based on optimization techniques. AIP

Conference Proceedings, AL-Samawa 26–27 May 2021, AIP Publishing, 2021, vol. 2404. DOI: 10.1063/5.0071004.

20. Abass A. Z., Pavlyuchenko D. A., Prokopov A. V., Zozan S. H. Load Flow and Transient Stability Analyses for an Integrated Solar Combined Cycle Station in Iraqi Southern by Using ETAP. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2021, vol. 14, pp. 5–16. DOI: 10.17516/1999-494X-0285.

21. Li Z., Lin S., Tan J. Optimal Operation of Integrated Energy System Considering Power Supply Reliability. 2024 7th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Yangzhou 26–28 April 2024, IEEE, 2024, pp. 1468–1473. DOI: 10.1109/CEEPE62022.2024.10586490

22. Zlobina N., Kondrakov O., Merkulova E., Muratova E. et al. Impact of energy economy development on the region's population life quality. E3S Web of Conferences, EDP Sciences, 2019, vol. 110, p. 02106. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002106.

Received: March 23, 2025
Accepted: April 22, 2025

**Author's information:**
Mohammed J. J. ALSULTAN — Postgraduate Student; 1144648@edu.rut-miit.ru
Maxim V. SHEVLYUGIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Head of the Department Electric Power Engineering of Transport; mx_sh@mail.ru

УДК 629.4.087

# Исследование температурных диапазонов эксплуатации подвижного состава в контексте оценки возможности образования влаги в пневматической сети

**С. В. Шведун, Д. К. Александров, Е. Н. Тресцова**

ООО «ВСМ-Сервис», Обособленное подразделение ОП Лиговское, Российская Федерация, 192007, Санкт-Петербург, Лиговский пр., 254, лит. В

**Для цитирования:** *Шведун С. В., Александров Д. К., Тресцова Е. Н.* Исследование температурных диапазонов эксплуатации подвижного состава в контексте оценки возможности образования влаги в пневматической сети // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 351–361. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-351-361

## Аннотация

**Цель:** Исследовать закономерности процесса конденсации влажного атмосферного воздуха в замкнутом объеме пневматических устройств и соединительной арматуры железнодорожного подвижного состава после его сжатия в компрессорной установке. Провести анализ соотношения температуры наружного воздуха, пневматической сети и температуры точки росы в основных диапазонах эксплуатации подвижного состава. Дать оценку степени образования влаги внутри арматуры трубопроводов пневматической тормозной сети железнодорожного подвижного состава в исследованных температурных диапазонах. **Методы:** Алгоритм исследования процессов конденсации влаги в пневматической сети железнодорожного подвижного состава; сравнение расчетных значений точки росы и температуры поверхности узлов пневматической сети тягового подвижного состава для рабочего диапазона наружных температур в зависимости от относительной влажности атмосферного воздуха. **Результаты:** Теоретически исследован механизм образования влаги на внутренней поверхности главных резервуаров и соединительной арматуры в зависимости от изменения метеорологических условий, оценено ее возможное негативное влияние на безопасность и эффективность эксплуатации подвижного состава. С применением теоретических основ термодинамики и теплопередачи проведены расчеты и составлена диаграмма соотношения температур атмосферного воздуха, точки росы и поверхности устройств пневматической сети. С использованием составленной диаграммы произведено зонирование температурных рядов атмосферного воздуха и внутренней поверхности устройств пневматической сети поезда, определены границы температурных зон и уровня относительной влажности воздуха, при которых образование влаги не может негативно повлиять на безопасность и эффективность эксплуатации подвижного состава. **Практическая значимость:** Произведена адаптация исследованных закономерностей для подбора и тестирования параметров устройств подготовки сжатого воздуха по требуемой относительной влажности воздуха и температуре точки росы. Визуальное представление полученных данных также позволит повысить качество испытания осушительных установок, прошедших текущий и капитальный ремонт, за счет сопоставления уровня точки росы и текущих атмосферных и метеорологических параметров региона эксплуатации.

**Ключевые слова:** Установка осушения сжатого воздуха, компрессорная установка, температура точки росы, парциальное давление пара, относительная влажность воздуха, термодинамика и теплопередача.

В настоящий момент основным приоритетом в экономической политике Российской Федерации является развитие внутреннего машиностроительного, агропромышленного и высокотехнологичного производства на основе имеющихся на территории государства сырьевых и природных запасов.

При этом синхронизация деятельности производственных отраслей и тем самым поэтапное повышение эффективности каждого из направлений отечественной экономики не может быть в полной мере реализовано без развития транспортной инфраструктуры, включающей в себя также железнодорожную сеть общей протяженностью более 85 тыс. км, находящейся на третьем месте в мире среди стран — ведущих экономик мира.

Таким образом, чтобы соответствовать мировым темпам развития экономики, к железнодорожной инфраструктуре государства должны предъявляться особые требования, направленные на организацию бесперебойной работы по доставке грузов и пассажиров [1].

Помимо требований к надежности приводного оборудования тягового подвижного состава особое внимание должно быть уделено обеспечению эффективности применяемых тормозных систем, основным рабочим телом которых является сжатый атмосферный воздух [2].

На основании опыта эксплуатации тягового железнодорожного подвижного состава основными техногенными проблемами обеспечения работоспособного состояния пневматических тормозных систем железнодорожного подвижного состава и обеспечения безопасности железнодорожных перевозок являются:

1) низкая плотность пневматической сети;

2) недостаточная производительность устройств подготовки сжатого воздуха;

3) внутренняя коррозия пневматических устройств;

4) образование заторов внутри пневматической тормозной сети подвижного состава, вызванной замерзанием сконденсированной влаги в период отрицательных температур.

Таким образом, большинство случаев отказа тормозного оборудования подвижного состава будут связанны со снижением эффективности работы сжатого воздуха пневматической системы из-за его утечек в атмосферу вследствие внутренней коррозии и износа мест соединения от циклов температурного расширения-сжатия по причине повышенного содержания влаги в объеме сжатого воздуха.

Для минимизации возможных случаев нарушения работоспособного состояния тормозной системы подвижного состава вследствие коррозии и замерзания необходимо снизить содержание водяного пара в объеме сжатого воздуха и вероятность его конденсации внутри пневматических устройств.

Атмосферный воздух всегда содержит водяной пар. После преодоления предела насыщения (при 100%-ой влажности воздуха) вода выпадает в виде капель, тумана или снега. По мере повышения температуры способность воздуха поглощать влагу возрастает. При сжатии воздуха в компрессорной установке перед его подачей в пневматическую систему происходит его нагрев, тем самым содержание влаги в сжимаемом воздухе повышается, так как увеличивается предел насыщения.

Изменение количественного содержания влаги в сжимаемом воздухе можно представить на конкретном примере с применением сведений из области термодинамики и теплопередачи. Так, при относительной влажности воздуха 80 % и температуре воздуха 30 °С фактическое содержание в нем влаги будет определяться по формуле (1):

$$d_{\text{р.атм}} = \varphi \cdot d_{\text{равн}}, \quad (1)$$

где $d_{р.атм}$ — фактическое влагосодержание атмосферного воздуха;

$d_{равн}$ — равновесное (максимальное) влагосодержание воздуха при относительной влажности воздуха 100 % и температуре окружающего воздуха 30 °С (303,15 К), $d_{равн}$ = 30 г/м$^3$;

φ — относительная влажность воздуха, %

$$d_{р.атм} = 0,8 \cdot 30 = 24 \text{ г / м}^3.$$

Таким образом, при изначально заданных атмосферных параметрах атмосферный воздух объемом 1 м$^3$, сжатый в компрессорной установке до избыточного давления 8 кгс/см$^2$, будет содержать в 8 раз больше влаги, а именно — 192 г. Способность сжатого воздуха вместить такое количество влаги во взвешенном состоянии также будет обусловлена его значительным разогревом — свыше 100 °С (373,15 К).

Далее на выходе компрессорной установки сжатый воздух будет подвержен процессу перехода к тепловому равновесию с окружающим соединительную арматуру пневматической сети подвижного состава атмосферным воздухом [3]. По факту проведенных эмпирических исследований на примере компрессорных установок электропоездов серии ЭС2Г «Ласточка» температура сжатого воздуха в арматуре на выходе из компрессорной установки (штатно оборудованной радиатором-охладителем) составит 50–60 °С (323,15–333,15 К) [4]. В таком состоянии насыщенный сжатый воздух (при его 100%-ой относительной влажности) может содержать только 83 г/м$^3$ водяного пара, в результате чего внутри пневматической арматуры выпадет 192 – 83 = 109 г/м$^3$ жидкой воды. Дальнейшее охлаждение сжатого воздуха до температуры окружающей среды приведет к дополнительной конденсации влаги с многократно возрастающим риском коррозии и замерзания [5].

Таким образом, при достижении сжатым воздухом объемом 1 м$^3$ с избыточным давлением 8 кгс/см$^2$ (0,785 МПа) к моменту достижения теплового равновесия с окружающей средой (30 °С, или 303,15 К) в виде жидкой воды в соединительной арматуре пневматической сети подвижного состава будет сконденсировано 162 г жидкой влаги.

Для более детального описания процесса конденсации влаги в пневматической сети подвижного состава с точки зрения термодинамических параметров исследована термодинамическая модель сжатия атмосферного воздуха со следующими исходными параметрами:

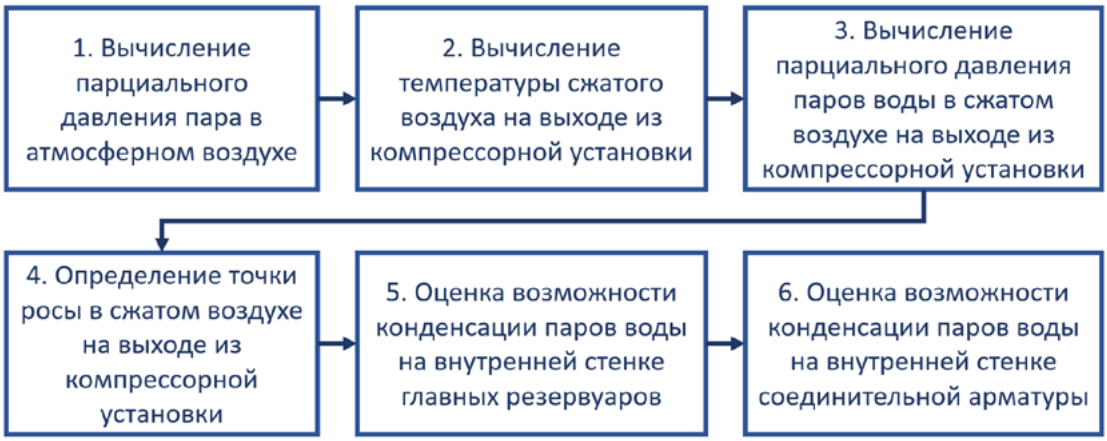



**Рис. 1.** Алгоритм исследования процессов конденсации влаги в пневматической сети железнодорожного подвижного состава

– температура атмосферного воздуха $t_1$ = 30 °С (303,15 К);

– относительная влажность атмосферного воздуха φ = 80 %;

– давление сжатого воздуха после компрессора $P_к$ = 0,785 МПа.

Последовательность теоретических расчетов представлена в виде схемы, приведенной на рис. 1.

Перед описанием теоретических расчетов необходимо отметить, что значения температур приведены как в системе СИ, в Кельвинах, так и в градусах по шкале Цельсия, что обусловлено большей практической применимостью шкалы Цельсия в государственных отраслевых стандартах, а именно в ГОСТ 32202—2013 «Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава и систем испытаний пневматического оборудования железнодорожного подвижного состава. Требования к качеству и методы контроля» [6].

## 1. Парциальное давление пара в атмосферном воздухе

Парциальное давление пара в атмосферном воздухе определяется по формуле (2):

$$P_п = P_{а,н}\, x\varphi\ , \qquad (2)$$

где $P_п$ — парциальное давление пара в атмосферном воздухе, кгс/см$^2$;

$P_{а,н}$ — парциальное давление насыщенного пара при температуре наружного воздуха $t_а$ = 30 °С (303,15 К);

Относительная влажность воздуха φ = 80 %.

В соответствии с данными таблиц насыщенного пара парциальное давление насыщенного пара, соответствующее температуре $t_а$ = 30 °С (303,15 К), равно $P_{а,н}$ = 4243Па [7].

Тогда парциальное давление пара в атмосферном воздухе при температуре 30 °С (303,15 К) и относительной влажности 80 % составит:

$$P_{п,1} = 4243 \cdot 0,8 = 3393,101 \text{ Па}.$$

С учетом допущения, что непосредственно перед поступлением воздуха в компрессорный агрегат его температура увеличивается в среднем на 10 °С, что обусловлено теплообменом между газом и нагретым корпусом компрессорной установки, атмосферный воздух на впускном трубопроводе компрессорного агрегата будет обладать следующими параметрами:

– температура наружного воздуха перед поступлением в компрессор — $T_1$ = 40 °С (313,15 К);

– относительная влажность воздуха φ = 80 %;

– парциальное давление пара в воздухе $P_{п,1}$ = = 3393,101 Па.

## 2. Определение температуры сжатого воздуха на выходе из компрессорной установки

Так как в компрессорной установке происходит адиабатический процесс изменения состояния сжатого воздуха, обусловленного сжатием, нагреванием (вследствие сжатия и трения) и последующим охлаждением в соединительной арматуре, то соотношение между температурами и давлениями будет описываться по формуле (3) [8]:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}, \qquad (3)$$

где $T_1$ — температура атмосферного воздуха на входе в компрессор, К;

$T_2$ — температура сжатого воздуха на выходе из компрессора, К;

$P_1$ — давление атмосферного воздуха на входе в компрессор, МПа ($P_1$ = 0,098 МПа);

$P_2$ — давление сжатого воздуха на выходе из компрессора, МПа ($P_2$ = 0,785 МПа);

$n$ — показатель политропного процесса, для достижения целей исследования значе-

ние коэффициента $n$ = 1,2, соответствующее незначительному колебанию температуры воздуха непосредственно внутри компрессорной установки.

Тогда температура сжатого воздуха на выходе из компрессорной установки будет определяться по выражению:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 313{,}15 \left(\frac{0{,}785}{0{,}098}\right)^{\frac{1{,}2-1}{1{,}2}} =$$
$$= 442{,}6\,\text{K} = 169{,}6\ ^\circ\text{C}.$$

## 3. Определение давления паров воды и температуры точки росы в сжатом воздухе на выходе из компрессорной установки

Для целей исследования принято допущение, что давление паров воды в сжатом воздухе после компрессора пропорционально степени сжатия ε = 8 [9]. Тогда парциальное давление пара в сжатом воздухе определяется по формуле (4):

$$P_{ï,2} = P_{ï,1}\,\varepsilon = 3393{,}101 \cdot 8 = 27\,144{,}808\,\text{Па}. \quad (4)$$

## 4. Определение точки росы в сжатом воздухе на выходе из компрессорной установки

В соответствии с данными таблиц насыщенного пара, температура точки росы, соответствующая парциальному давлению насыщенного пара, $P_{п,2}$= 27 144,808 Па, составляет $t_{p.2}$ = 67 °C (340,15 К) [7].

Таким образом, при температуре сжатого воздуха $t_2$ = 169,6 °C (442,6 К) и температуре точки росы $t_{р.2}$ = 67 °C (340,15 К) конденсация паров влаги из усредненного объема сжатого воздуха происходить не будет.

При этом если в процессе движения подвижного состава температура арматуры и напорных резервуаров вследствие обдува потоками набегающего атмосферного воздуха будет ниже температуры точки росы, то на внутренних стенках герметичного объема может происходить конденсация влаги.

## 5. Оценка возможности конденсации паров воды на внутренней стенке главных резервуаров

Согласно применяемой в исследовании методике, температура внутренней стенки главных резервуаров определяется по формуле (5):

$$t_{\text{пов,гр}} = t_{\text{а}} + \frac{\alpha_{\text{вн, гр}}}{\alpha_{\text{вн, гр}} + \alpha_{\text{нар, гр}}}\left(t_{\text{сж}} - t_{\text{а}}\right), \quad (5)$$

где $t_{\text{пов,гр}}$ — температура стенки главного резервуара, К;

$t_{\text{а}}$ — температура атмосферного воздуха, К;

$t_{\text{сж}}$ — температура сжатого воздуха, К;

$\alpha_{\text{вн,гр}}$ — коэффициент конвективной теплоотдачи от внутренней стенки главного резервуара к сжатому воздуху;

$\alpha_{\text{нар,гр}}$ — коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной стенки главного резервуара к атмосферному воздуху.

Так как коэффициент конвективной теплоотдачи представляет собой сложную функцию от большого числа параметров, которую невозможно представить в виде справочных табличных значений, то для расчета приближенных значений коэффициент в практических целях применяется закон Ньютона — Рихмана, предполагающий постоянство коэффициента α по поверхности теплообмена [10].

Для достижения целей исследования коэффициентам $\alpha_{\text{вн,гр}}$ и $\alpha_{\text{нар,гр}}$, имеющим прямую зависимость от скорости движения воздуха, ориентировочно заданы следующие значения:

$\alpha_{\text{вн,гр}}$ = 1000 Дж/(м$^2$ · К · с);

$\alpha_{\text{нар,гр}}$ = 5000 Дж/(м$^2$ · К ·с).

Тогда

$$t_{\text{пов,гр}} = 303{,}15 + \frac{1000}{1000+5000}\left(442{,}6 - 303{,}15\right) = \\ = 326{,}42\,\text{K} = 53{,}3\,°\text{C}.$$

## 6. Оценка возможности конденсации паров воды на внутренней стенке соединительной арматуры

Температура внутренней стенки соединительной арматуры также определяется по формуле (4), при этом используется скорректированный коэффициент конвективной теплоотдачи от внутренней стенки пневматической арматуры к сжатому воздуху $\alpha_{\text{вн,па}} = 800$ Дж/(м$^2$ · К · с).

Тогда температура внутренней стенки соединительной арматуры определяется по выражению:

$$t_{\text{пов,са}} = 303{,}15 + \frac{800}{800+5000}\left(442{,}6 - 303{,}15\right) = \\ = 322{,}41\,\text{K} = 49{,}2\,°\text{C}.$$

Так как вычисленная температура внутренней стенки главного резервуара и соединительной арматуры ниже температуры точки росы сжатого воздуха, то внутри указанных емкостей будет происходить конденсация влаги.

Для объективной оценки риска повышенной конденсации влаги внутри ограниченного объема пневматической сети железнодорожного подвижного состава проведен аналогичный расчет термодинамических параметров сжатого воздуха на всем диапазоне рабочих температур тягового железнодорожного подвижного состава, характерных для Северо-Западного региона Российской Федерации: от –40 °С до +30 °С при средней влажности воздуха 80 % [11].

Из результатов теоретических расчетов следует, что температура поверхности главного резервуара превышает температуру точки росы только при температуре наружного воздуха в диапазоне от –40 °С до –35 °С. При более высоких температурах внутренней поверхности главного резервуара ее значения будут находиться ниже точки росы, вследствие чего на внутренней поверхности будет образовываться влага. Температура внутренней поверхности соединительной арматуры будет находиться ниже точки росы во всем указанном диапазоне изменения температуры наружного воздуха, вследствие чего в зимнее время в трубопроводах возможна конденсация и замерзание воды, способствующее образованию ледяных пробок без принятия мер со стороны локомотивной бригады по продувке тормозной и напорной магистрали в пути следования, что в современных условиях является неприемлемым.

Убрать необходимость периодического удаления влаги из пневматической сети поезда возможно, если снизить относительную влажность воздуха в ограниченном объеме до значений менее 35 % с применением систем осушения сжатого воздуха.

Из результатов теоретических расчетов для относительной влажности 35 % следует, что образование влаги при скорректированных параметрах относительной влажности сжатого воздуха возможно только в частях соединительной арматуры пневматической сети и ее содержание будет чрезвычайно мало, так как разница температур между температурой точки росы и температурой поверхности не превышает 2,5 %.

При этом пунктом 5.3 раздела 5 ГОСТ 32202—2013 к качеству сжатого воздуха предъявляются еще более ужесточенные требования [6]. Так, температура точки росы при температуре атмосферного воздуха от –40 °С до –20 °С включительно должна находиться на уровне –40 °С, а при температуре атмосферного воздуха выше –20 °С температура точки росы должна соответствовать разности $t_{\text{а}}$ – 20 °С. В условиях реальной эксплуатации подвижного состава таких параметров можно достичь только путем дополнительного

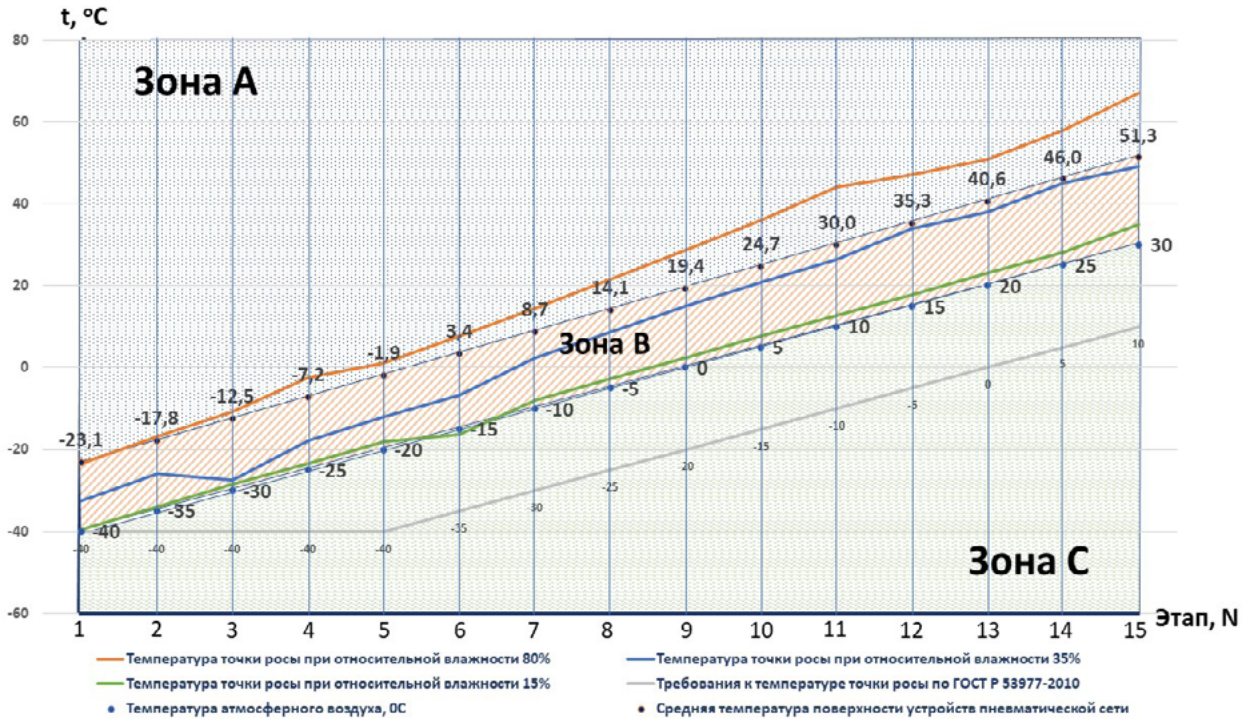



**Рис. 2.** Соотношения температур атмосферного воздуха, точки росы и поверхности устройств пневматической сети

глубокого охлаждения сжатого воздуха после компрессорной установки, что сильно усложнит конструкцию подвижного состава и увеличит требования к обслуживающему персоналу [12].

Для более углубленного исследования требований, предъявляемых к влажностным характеристикам сжатого воздуха, дополнительно исследованы параметры точки росы при относительной влажности сжатого воздуха 15 %.

Из результатов теоретических расчетов для относительной влажности 15 % следует, что температура узлов пневматической сети (соединительной арматуры и главных резервуаров) на всем рабочем диапазоне температур окружающего воздуха будет выше температуры точки росы — конденсации влаги происходить не будет, тем самым достигается приемлемый уровень подготовки сжатого воздуха.

Обобщенные результаты исследования соотношения температуры атмосферного воздуха, средней температуры поверхности устройств пневматической сети, температуры точки росы при относительной влажности воздуха 15 %, 35 %, 80 %, а также требований по температуре точки росы согласно ГОСТ 32202—2013 представлены на рис. 2.

Как видно из содержания рис. 2, линиями, образующими температурный ряд атмосферного воздуха и температурный ряд внутренней поверхности устройств пневматической сети поезда, полученная диаграмма может быть разделена на 3 зоны:

Зона A — комплекс возможных значений температуры точки росы, при которых со 100%-ой вероятностью в пневматической сети поезда будет образовываться конденсат. Нахождение температуры точки росы в данной зоне является неприемлемым в условиях постоянной эксплуатации.

Зона B — комплекс возможных значений точки росы, находящихся между рассматрива-

емыми температурами атмосферного воздуха и расчетными значениями температуры внутренней поверхности устройств пневматической сети поезда, при которых крайне низкая вероятность образования конденсата в приграничной области между Зоной А и Зоной В. Такая вероятность является приемлемой с точки зрения постоянной эксплуатации подвижного состава в условиях знакопеременных температур атмосферного воздуха, характерных для Северо-Западного, Центрального, а также ряда областей Южного региона РФ.

Зона С — комплекс возможных значений точки росы, графически расположенных ниже температуры атмосферного воздуха. Предполагает полное отсутствие конденсата в пневматической сети поезда на всем исследуемом диапазоне значений.

Таким образом, в случае, когда температурный ряд точки росы при относительной влажности 15 % и 35 % находится в пределах Зоны В и Зоны С, качество подготовки сжатого воздуха будет соответствовать эксплуатационным потребностям тягового подвижного состава.

## Выводы

В рамках написания данной статьи сделаны следующие выводы:

1. Теоретически исследован механизм образования влаги на внутренней поверхности главных резервуаров и соединительной арматуры в зависимости от изменения метеорологических условий, оценено ее возможное негативное влияние на безопасность и эффективность эксплуатации подвижного состава.

2. С применением теоретических основ термодинамики и теплопередачи проведены расчеты и составлена диаграмма соотношения температур атмосферного воздуха, точки росы и поверхности устройств пневматической сети.

3. С использованием составленной диаграммы произведено зонирование температурных рядов атмосферного воздуха и внутренней поверхности устройств пневматической сети поезда, определены границы температурных зон и уровня относительной влажности воздуха, при которых образование влаги не может негативно повлиять на безопасность и эффективность эксплуатации подвижного состава.

## Список источников

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р // Консультант Плюс.

2. Крылов В. И. Автоматические тормоза подвижного состава: учебник для техникумов ж.-д. трансп. / В. И. Крылов, В. В. Крылов. — 4-е изд., перераб. и доп. Стереотипное издание. Перепечатка с издания 1983 г. — М.: Альянс, 2014. — 360 с.

3. Мирам А. О. Техническая термодинамика. Тепломассообмен: учебное издание / А. О. Мирам, В. А. Павленко. — М.: Издательство АСВ, 2011. — 352 с.

4. Электропоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ серии ЭС2Г исполнения «Стандарт». Руководство по эксплуатации. Часть 5 ЭС2Г.0.00.000.000-01 РЭ4 // ООО «Уральские локомотивы», 2014. — 245 с.

5. Бурцев С. И. Влажный воздух. Состав и свойства / С. И. Бурцев, Ю. Н. Цветков. — СПб.: СПбГАХПТ, 1998. — 146 с.

6. ГОСТ 32202—2013. Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава и систем испытаний пневматического оборудования железнодорожного подвижного состава. Требования к качеству и методы контроля: Протокол заседания Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации от 27 июня 2013 г. № 57-П // Консультант Плюс.

7. Ефименко Э. Р. Распределение парциального давления водяного пара в толще ограждения: учеб.-метод. пособие к практическим занятиям по курсу «Строительная физика» / Э. Р. Ефименко. — Тольятти: ТГУ, 2010. — 44 с.

8. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. Т. 1: Теория равновесных систем: Термодинамика / И. А. Квасников. — М.: Ленанд, 2022. — 328 с.

9. Гущин А. М. О механизме конденсации влаги в элементах тормозной системы поезда / А. М. Гущин, Е. А. Бондарь, Т. Н. Бузько // Сборник научных трудов ДОНИЖТ. — 2021. — № 62. — С. 66–73.

10. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. — 2-е изд., стереотип. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.

11. Разуваев В. Н. Научно-прикладной справочник «Климат России» / В. Н. Разуваев, О. Н. Булыгина, Н. Н. Коршунова, Л. К. Клещенко и др. // Официальный интернет-портал ВНИИГМИ-МЦД. — URL: http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/ (дата обращения: 18.02.2025).

12. Чайкина К. А. Промышленные технологии, использующие искусственное охлаждение / К. А. Чайкина, М. У. Абдуллаев, А. А. Литовченко, А. В. Делков // Сборник трудов. — Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий, 2020 — С. 149–150.

Дата поступления: 23.03.2025
Решение о публикации: 22.04.2025

**Контактная информация:**
ШВЕДУН Станислав Владимирович — начальник дирекции по ремонту тормозного оборудования; shvedunstas@mail.ru
АЛЕКСАНДРОВ Дмитрий Кириллович — инженер-технолог дирекции по ремонту тормозного оборудования; VL60k-777@yandex.ru
ТРЕСЦОВА Екатерина Николаевна — ведущий инженер-технолог дирекции по ремонту тормозного оборудования; etrestsova@mail.ru

# Research of the Temperature Ranges of Rolling Stock Operation in the Context of Moisture Formation in the Pneumatic System

**S. V. Shvedun, D. K. Alexandrov, E. N. Trestsova**

"VSM-Service" LLC, a Separate Division of the Ligovskoye branch, 254, lit. B, Ligovsky pr., Saint Petersburg, 192007, Russian Federation

**For citation:** *Shvedun S. V., Alexandrov D. K., Trestsova E. N.* A Research of the Temperature Ranges of Rolling Stock Operation in the Context of Moisture Formation in the Pneumatic System // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 351–361. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-351-361

## Summary

**Purpose:** To establish the regularities of the condensation process of moist atmospheric air in the closed pneumatic system and the connecting fittings of railway rolling stock after its compression in a compressor unit. To analyze the ratio of outdoor air temperature, pneumatic system and dew point temperature in the main modes of rolling stock operation. To assess the degree of moisture formation inside the pipelines of the pneumatic brake system of railway rolling stock in the researched temperature ranges. **Methods:** Algorithm for investigating moisture condensation processes in the pneumatic network of railway rolling stock; comparison of calculated dew point values and surface temperature of nodes of the pneumatic network of traction rolling stock for the operating range of outdoor temperatures depending on the relative humidity of atmospheric air. **Results:** The mechanism of moisture formation on the inner surface of the main tanks and connecting fittings has been theoretically investigated, depending on changes in meteorological conditions, and its possible negative impact on the safety and efficiency of rolling stock operation has been assessed. Using the theoretical

foundations of thermodynamics and heat transfer, calculations were carried out and a diagram of the ratio of atmospheric air temperatures, dew points and the surface of pneumatic network devices was compiled. Using the compiled diagram, the temperature ranges of atmospheric air and the inner surface of the train's pneumatic system units were zoned, and temperature zone boundaries and relative humidity levels at which moisture formation could not negatively affect the safety and efficiency of rolling stock operation were determined. **Practical significance:** The studied patterns were adapted to select and test the device parameters for compressed air prepared to the required relative humidity and dew point temperature. The visual representation of the data obtained will also improve the quality of testing of drying installations that have undergone current and major repairs by comparing the dew point level and the current atmospheric and meteorological parameters of the region of operation.

**Keywords:** Compressed air drying, compressor unit, dew point temperature, steam partial pressure, relative humidity, thermodynamics and heat transfer.

## References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda: Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r* [Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030: Order of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2008 № 877-r]. Konsul'tant Plyus. (In Russian)

2. Krylov V. I., Krylov V. V. *Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava: uchebnik dlya tekhnikumov zh.-d. transp., 4-e izd., pererab. i dop. Stereotipnoe izdanie. Perepechatka s izdaniya 1983 g.* [Automatic Brakes of Rolling Stock: Textbook for Technical Schools of Railway Transport, 4th ed., revised. and enlarged. Stereotype edition. Reprint from the 1983 edition]. Moscow: Al'yans Publ., 2014, 360 p. (In Russian)

3. Miram A. O., Pavlenko V. A. *Tekhnicheskaya termodinamika. Teplomassoobmen: uchebnoe izdanie* [Technical Thermodynamics. Heat and Mass Transfer: Textbook]. Moscow: Izdatel'stvo ASV Publ., 2011, 352 p. (In Russian)

4. *Elektropoezd s asinkhronnym tyagovym privodom tipa EGE serii ES2G ispolneniya "Standart". Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' 5 ES2G.0.00.000.000-01 RE4* [Electric train with asynchronous traction drive type EGE series ES2G "Standard" version. Operation manual. Part 5 ES2G.0.00.000.000-01 RE4]. OOO "Ural'skie lokomotivy", 2014, 245 p. (In Russian)

5. Burtsev S. I., Tsvetkov Yu. N. *Vlazhnyy vozdukh. Sostav i svoystva* [Humid air. Composition and properties]. St. Petersburg: SPbGAKhPT Publ., 1998, 146 p. (In Russian)

6. *GOST 32202—2013. Szhatyy vozdukh pnevmaticheskikh sistem zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i sistem ispytaniy pnevmaticheskogo oborudovaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Trebovaniya k kachestvu i metody kontrolya: Protokol zasedaniya Mezhgosudarstvennogo soveta po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii ot 27 iyunya 2013 g. № 57-P* [GOST 32202—2013. Compressed air of pneumatic systems of railway rolling stock and testing systems of pneumatic equipment of railway rolling stock. Quality requirements and control methods: Minutes of the meeting of the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification dated June 27, 2013 № 57-P]. Konsul'tant Plyus. (In Russian)

7. Efimenko E. R. *Raspredelenie partsial'nogo davleniya vodyanogo para v tolshche ograzhdeniya: ucheb.-metod. posobie k prakticheskim zanyatiyam po kursu "Stroitel'naya fizika"* [Distribution of partial pressure of water vapor in the thickness of the fence: textbook-method. manual for practical classes on the course "Construction Physics"]. Tol'yatti: TGU Publ., 2010, 44 p. (In Russian)

8. Kvasnikov I. A. *Termodinamika i statisticheskaya fizika. T. 1: Teoriya ravnovesnykh sistem: Termodinamika* [Thermodynamics and statistical physics. Vol. 1: Theory of equilibrium systems: Thermodynamics]. Moscow: Lenand Publ., 2022, 328 p. (In Russian)

9. Gushchin A. M., Bondar' E. A., Buz'ko T. N. O mekhanizme kondensatsii vlagi v elementakh tormoznoy sistemy poezda [On the mechanism of moisture condensation in elements of the train braking system]. *Sbornik nauchnykh trudov DONIZhT* [Collection of scientific papers of DONIZHT]. 2021, Iss. 62, pp. 66–73. (In Russian)

10. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi, 2-e izd., stereotip.* [Fundamentals of heat transfer, 2nd ed., stereotype]. Moscow: Energiya Publ., 1977, 344 p. (In Russian)

11. Razuvaev V. N., Bulygina O. N., Korshunova N. N., Kleshchenko L. K. et al. *Nauchno-prikladnoy spravochnik "Klimat Rossii"* [Scientific and applied reference book "Climate of Russia"]. Available at: http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/ (accessed: February 18, 2025). (In Russian)

12. Chaykina K. A., Abdullaev M. U., Litovchenko A. A., Delkov A. V. Promyshlennye tekhnologii, ispol'zuyushchie iskusstvennoe okhlazhdenie [Industrial technologies using artificial cooling]. *Sbornik trudov* [Collection of works]. Krasnoyarsk: Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologiy Publ., 2020, pp. 149–150. (In Russian)

Received: March 23, 2025
Accepted: April 22, 2025

**Author's information:**
Stanislav V. SHVEDUN — Head of the Directorate for the Repair of Brake Equipment; shvedunstas@mail.ru
Dmitry K. ALEXANDROV — Process Engineer, Directorate for the Repair of Brake Equipment; VL60k-777@yandex.ru
Ekaterina N. TRESTSOVA — Leading Process Engineer, Directorate for the repair of brake equipment; etrestsova@mail.ru

УДК 625.12

# Об эффективности применения балочных транспортеров при строительстве высокоскоростных железнодорожных магистралей

**И. С. Уланов[1], А. В. Горлов[1], С. Я. Луцкий[2], А. М. Черкасов[2], Б. А. Варченко[2], А. И. Штейн[3]**

[1]ООО «НПС Скоростные технологии», Российская Федерация, 121087, г. Москва, ул Барклая, 6, стр. 5
[2]Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Российская Федерация, 127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова 9, стр. 9
[3]Частный независимый эксперт без аффилиации

**Для цитирования:** *Уланов И. С., Горлов А. В., Луцкий С. Я., Черкасов А. М., Варченко Б. А., Штейн А. И.* Об эффективности применения балочных транспортеров при строительстве высокоскоростных железнодорожных магистралей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 362–372. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-362-372

## Аннотация

**Цель:** Анализ особенностей, проблем и примеров мировой практики применения балочных транспортеров, разработка рекомендаций по их использованию на строительстве объектов инфраструктуры ВСМ. Исследование и расчет устойчивости земляного полотна для принятия решения о возможности применения балочных транспортеров. **Методы:** Проведение геотехнических расчетов прочности и устойчивости земляного полотна с учетом возможных нагрузок от прохода балочного транспортера. Анализ результатов геотехнических исследований и поверочных расчетов. **Результаты:** Рекомендации по повышению эффективности применения балочных транспортеров, ускорению процесса и снижению трудозатрат при монтаже тяжелых балочных конструкций. Выводы о дополнениях нормативных требований к организации процесса перевозки, технологии подготовки земляного полотна и его основания. Указана необходимость исследования стабильности грунтов, контроля качества подъездного пути, организации мониторинга и поверочных расчетов перед началом производства работ в целях профилактики рисков деформаций земляного полотна. **Практическая значимость:** Геотехнические исследования и методика поверочных расчетов, приведенные в данной работе, позволяют определить критические зоны возможной потери устойчивости земляного полотна и разработать меры по их укреплению. Включение в проектную практику результатов исследования позволит обеспечить нормативное качество перевозок тяжелых конструкций ВСМ, безопасную эксплуатацию балочных транспортеров, снизить риски, связанные с деформацией земляного полотна, и сократить сроки строительства.

**Ключевые слова:** Высокоскоростная железнодорожная магистраль, балочный транспортер, напряженно-деформированное состояние, деформация, геотехнические исследования.

## Введение

Строительство высокоскоростных железных дорог связано с необходимостью инновационных и высокотехнологичных решений, одним из которых является применение балочных транспортеров при постройке инженерных сооружений. Эти устройства играют ключевую роль в транспортировке и установке крупногабаритных железобетонных балок и пролетных строений мостов, эстакад и других объектов инфраструктуры ВСЖМ. В статье приведен анализ преимуществ и проблем применения балочных транспортеров,

примеры мировой практики их использования, а также риски аварий на участках дорог с недостаточной прочностью грунтов. Данный анализ положен в основу нового исследования и рекомендаций по повышению эффективности применения балочных транспортеров в сложных инженерных условиях.

## Анализ применения балочных транспортеров в мировой практике

Балочные транспортеры нашли широкое применение в мировой практике. В КНР активно применяются балочные транспортеры при строительстве высокоскоростных железных дорог (HSR), в частности на линиях Пекин — Шанхай и Пекин — Гонконг, для укладки тяжелых железобетонных пролетных строений на эстакадах, имеющих протяженность в десятки километров [1].

В Италии использовались балочные транспортеры при строительстве высокоскоростной линии Турин — Милан [2]. Эти машины были особенно эффективны для укладки безбалластных пролетных строений на участках с ограниченным пространством. Их применение снизило воздействие на окружающую среду и позволило сократить сроки завершения проекта.

В Испании и Франции балочные транспортеры широко использовались при строительстве высокоскоростных линий Мадрид — Севилья, Мадрид — Барселона и Лион — Марсель. Транспортеры применялись для монтажа пролетных строений мостов и эстакад, что помогло сократить сроки строительства и уменьшить воздействие на природный ландшафт. Большинство балочных транспортеров имеют грузоподъемность от 400 до 1000 т, что позволяет перемещать крупные железобетонные балки и пролетные строения. Обычно длина транспортера составляет от 50 до 100 м, что позволяет эффективно распределять нагрузку и поддерживать устойчивость при перемещении тяжелых конструкций. Высота подъема конструкций варьируется от 5 до 20 м, позволяя транспортеру поднимать и устанавливать балки на требуемую высоту при сооружении эстакад и мостов. Транспортеры могут иметь колесный ход или перемещаться по специально подготовленным рельсовым путям, что позволяет обеспечивать высокую точность при установке различных конструкций. Производство транспортеров предусматривает модульную структуру — несколько машин могут быть соединены для транспортировки сверхдлинных и сверхтяжелых компонентов. Возможна индивидуальная конфигурация по грузоподъемности, размеру платформы, количеству осей, наличию разнонаправленных колес, режиму привода. Одним из преимуществ балочных транспортеров является значительное увеличение темпов строительства. Эти устройства способны перемещать многотонные балки на большие расстояния, выполняя установку пролетных строений быстрее и эффективнее, чем при использовании традиционных кранов.

Балочные транспортеры оснащены автоматизированными системами управления, что позволяет выполнять монтаж конструкций с высокой точностью. Автоматизированная система управления позволяет оператору точно позиционировать конструктивные элементы, снижает риск аварий и повышает уровень безопасности на объекте.

Балочные транспортеры создают значительную нагрузку на земляное полотно, и для их безопасной эксплуатации требуется оценка соответствия нормам несущей способности грунта. Для минимизации рисков деформаций или потери устойчивости необходимо проведение детальных геотехнических исследований и, возможно, дополнительных работ по подготовке земляного полотна перед использованием транспортеров.

Балочные транспортеры менее эффективны на участках дорог со сложным рельефом, в горных районах или на участках с крутыми склонами. В этих условиях применение транспортеров

может потребовать выполнения дополнительных мероприятий по подготовке дорог и площадок (укрепление основания, установка временных поддерживающих конструкций и др.). Балочные транспортеры представляют собой дорогостоящее оборудование, которое требует высококвалифицированного технического контроля и обслуживания. Первоначальные затраты на его приобретение, установку и обучение персонала могут быть значительными. Внеплановый ремонт такого устройства может вызвать задержки в строительстве и дополнительные расходы, что делает экономическую обоснованность их использования актуальной только для крупных проектов. Работа балочных транспортеров затруднена в условиях неблагоприятной погоды, особенно при сильных ветрах и осадках. Погодные условия могут повлиять на устойчивость транспортера и безопасность перемещаемых конструкций. Это накладывает дополнительные ограничения на график работ и требует учета при разработке проекта организации строительства (ПОС). Известны несколько случаев аварий, вызванных недостаточной прочностью грунта под балочными транспортерами.

В Турции при строительстве высокоскоростной железной дороги Анкара — Стамбул в 2017 году на одном из участков этой линии произошла авария, связанная с потерей стабильности основания под транспортером, перемещающим железобетонную балку для эстакады. Это привело к частичному наклону транспортера и падению балки. Причиной инцидента стала недостаточная несущая способность грунтов, которые не были должным образом укреплены из-за поспешного начала строительных работ без дополнительных геотехнических исследований [3, 4].

Во Вьетнаме на одном из участков строительства метро в Ханое в 2018 году, где также применялся балочный транспортер для перемещения конструкций, произошло проседание земляного полотна, вызвавшее смещение транспортера и падение балки на проезжую часть. В результате проект был приостановлен для проведения дополнительных исследований грунта. После инцидента в проект были внесены изменения, потребовавшие проведения комплексных инженерных и геологических изысканий перед использованием тяжелой техники на каждом новом участке [5].

В Китае при строительстве высокоскоростной магистрали в провинции Хэбэй в 2019 году произошла осадка грунта под балочным транспортером, что привело к потере его устойчивости и обрушению балки. Установлено, что грунты основания участка не были должным образом укреплены, не учтены сезонные изменения их физико-механических характеристик после обильных дождей. Этот инцидент подчеркнул необходимость предварительных геотехнических исследований и расчетов, обосновывающих достаточную прочность или необходимость укрепления земляного полотна при использовании тяжелой строительной техники [6].

Результаты проведенного анализа положены в основу методики геотехнического исследования и мониторинга состояния грунтов в дополнение технологического регламента [7] для принятия обоснованного решения о возможности применения балочных транспортеров при строительстве ВСЖМ.

## Геотехническое исследование и рекомендации по повышению прочности и устойчивости земляного полотна

Для оценки состояния грунтов под технологической нагрузкой выполнено численное моделирование взаимодействия колесного балочного транспортера и земляного полотна. Конструкция земляного полотна (рис. 1) в соответствии нормами [8] по аналогии европейских норм (Ril 836 [9]) состоит (снизу вверх) из:

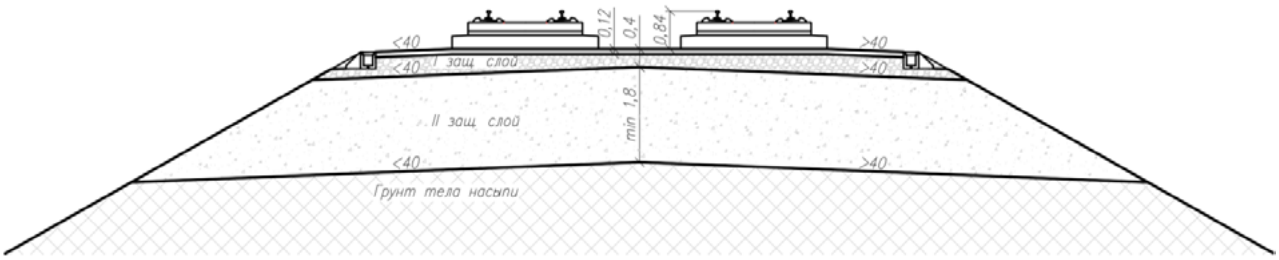



**Рис. 1.** Конструкция земляного полотна

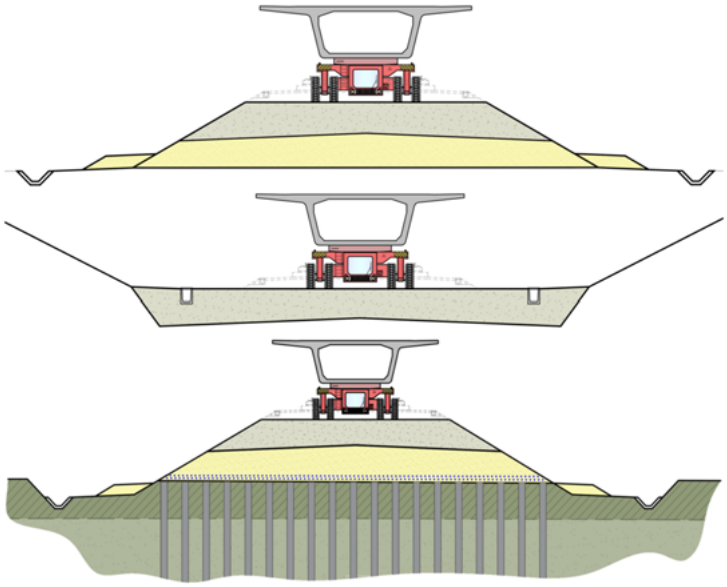


**Рис. 2.** Три варианта конструкции земляного полотна

– тела насыпи;

– второго (морозоустойчивого) защитного слоя (1,8 м);

– первого защитного слоя (0,4 м);

– слоя асфальтобетона (0,12 м).

Рассмотрены три варианта конструкции земляного полотна (рис. 2) и его основания и оценены возможные их деформации при силовом взаимодействии колес балочного транспортера с грунтом второго защитного слоя.

Первый вариант — насыпь высотой около 5 м. Второй защитный слой и тело насыпи отсыпаны из среднего песка на суглинистом прочном основании.

Второй вариант — выемка глубиной около 1 м.

Третий вариант — насыпь на недостаточно прочном основании, усиленном забивными железобетонными сваями длиной 9 м и сечением 35 × 35 см, расположенными по квадратной сетке через 2 м друг от друга.

Проезд колесного балочного транспортера допускается по второму (морозоустойчивому) защитному слою, до укладки верхнего первого защитного слоя.

В качестве расчетного прототипа принят колесный балочный транспортер типа YL900 (рис. 3), который состоит из главной балки, блока колес, стенда-тележки перевозки балки, поворотного механизма, силовой системы, электрической и гидравлической систем [10].

***Первый вариант — насыпь высотой 5 м.*** Необходимо было оценить риск потери устойчивости откоса земляного полотна, а также запас несущей способности грунта второго защитного слоя при проезде балочного транспортера вблизи от его бровки. Были рассмотрены два случая: при


**Рис. 3.** 16-осный балочный транспортер YL900 [11]

положении крайнего колеса транспортера на расстоянии 1 и 2 м от бровки земляного полотна.

При расчетах по 2D-схеме получено, что коэффициент устойчивости $K_y$ равен 1,13 для давления от колеса на грунт через пятно контакта (525 кПа) и 1,33 для распределенного давления по ширине модели (281 кПа) и при положении колеса на расстоянии 1 м от бровки. Для этого случая, при расчете с применением 3D-модели (рис. 4 и 5), устойчивость несколько выше ($K_y$ = 1,45).

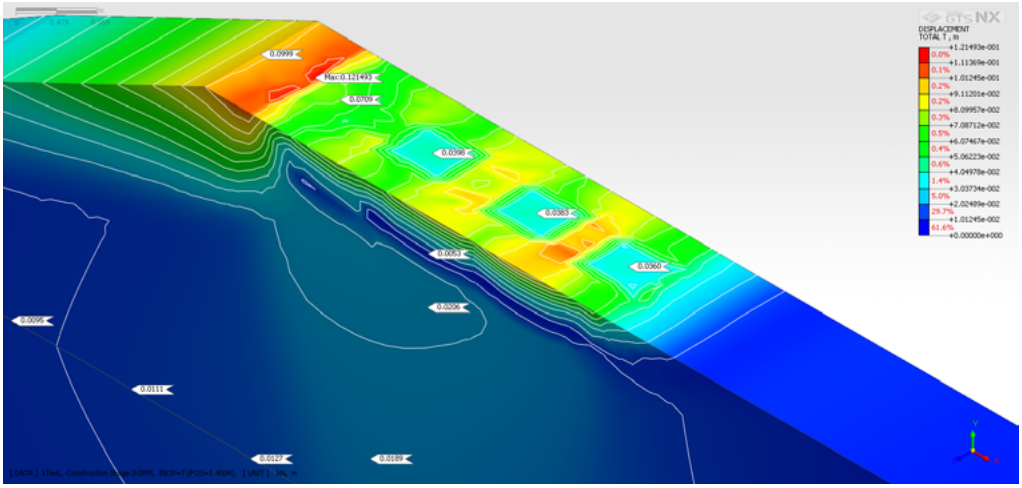


**Рис. 4.** Изополя полных деформаций земляного полотна при положении крайнего колеса балочного транспортера на расстоянии 1 м от бровки при коэффициенте устойчивости ($K_y$), равном 1,45

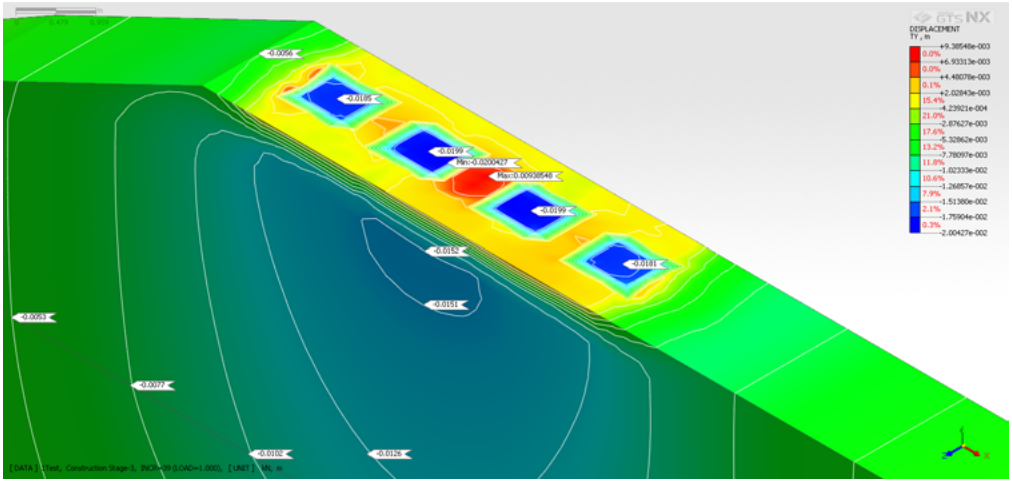


**Рис. 5.** Изополя вертикальных деформаций земляного полотна при положении крайнего колеса балочного транспортера на расстоянии 1 м от бровки, вертикальные деформации под колесом составили около 2 см, с максимальным выпором между колесами около 9 мм

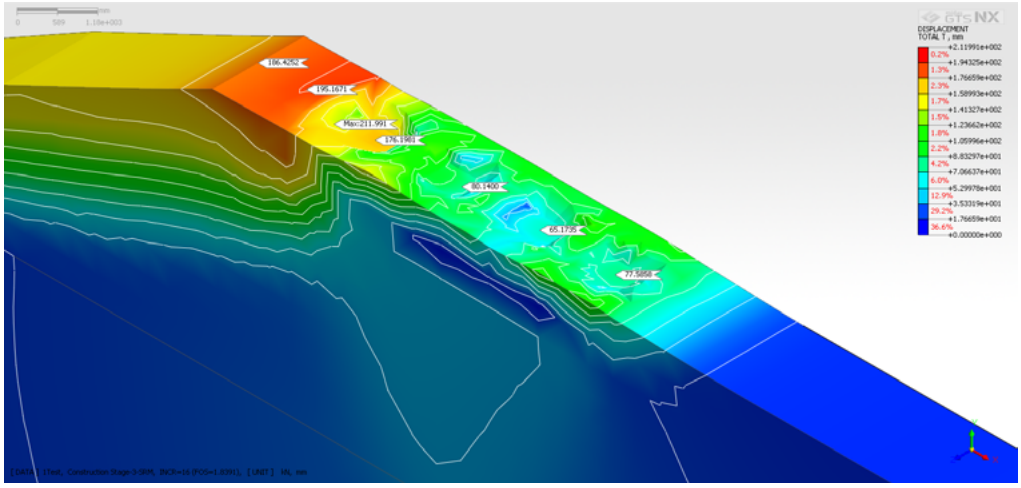


**Рис. 6.** Изополя полных деформаций земляного полотна при положении крайнего колеса балочного транспортера на расстоянии 2 м от бровки при коэффициенте устойчивости ($K_у$), равном 1,84

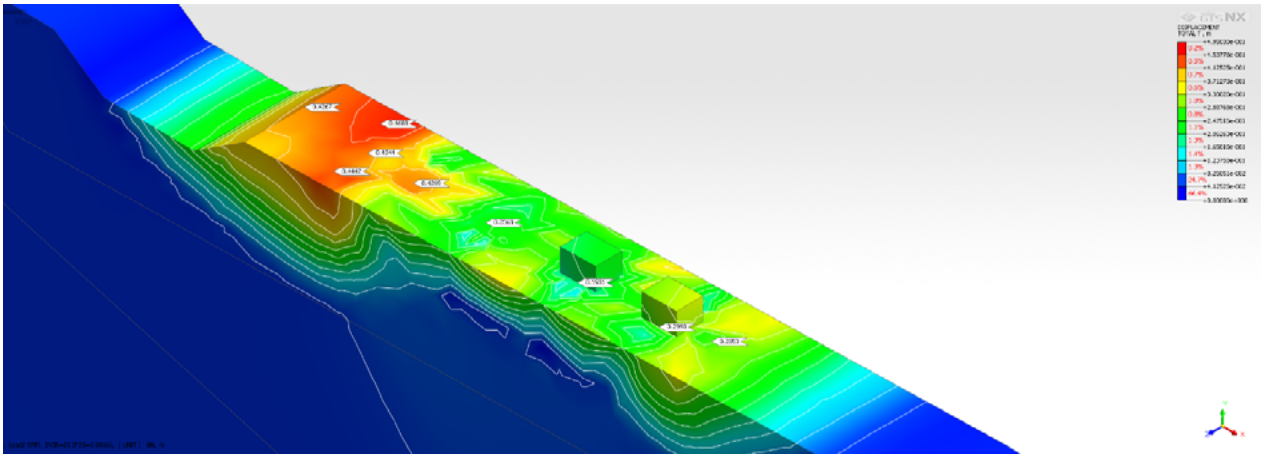


**Рис. 7.** Изополя полных деформаций земляного полотна при положении крайнего колеса балочного транспортера на расстоянии 1 м от бровки. По результатам расчета коэффициент устойчивости равен 2,6 и 3 при расстоянии от колеса до бровки 1 и 2 м соответственно

На рис. 6 показаны результаты расчетов при положении крайнего колеса транспортера на расстоянии 2 м от бровки земляного полотна.

Величина вертикальных деформаций на уровне низа защитного слоя в зоне под колесным транспортером в результате расчетов составила до 1 см. При положении колеса на расстоянии 2 м от бровки устойчивость земляного полотна существенно повышается и, судя по всему, больше соответствует моменту исчерпания несущей способности грунта второго защитного слоя.

***Второй вариант конструкции — выемка глубиной около 1 м.*** Для расчетов устойчивости прочностные параметры грунтов снижаются за счет деления на соответствующий коэффициент надежности по грунту.

Результаты расчетов показали, что вертикальная деформация у бровки составила 11 мм. Боковой выпор в сторону бровки — 8 мм, осадка под ближним к бровке колесом составила 22 мм, под вторым — 24 мм, выпор между колес — до 7 мм. Коэффициент устойчивости равен 2,6 и 3 при расстоянии от колеса до бровки 1 и 2 м соответственно (рис. 7).

***Третий вариант конструкции*** — расчет насыпи на основании, усиленном забивными

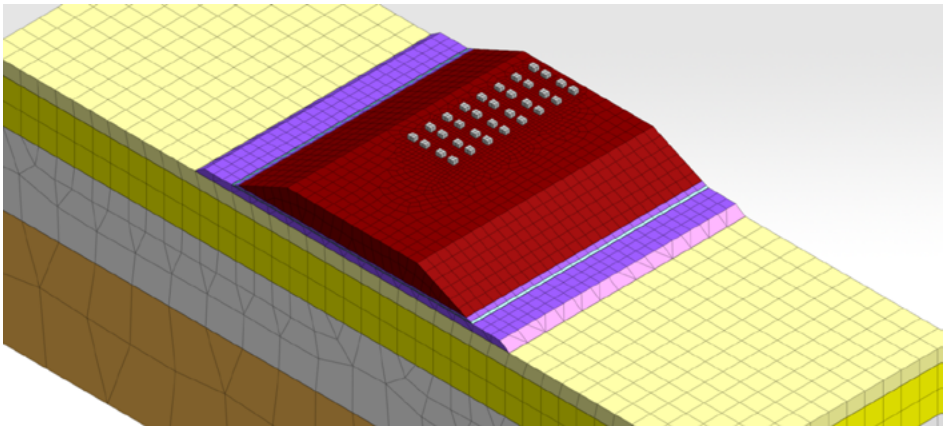


**Рис. 8.** Расчетная модель

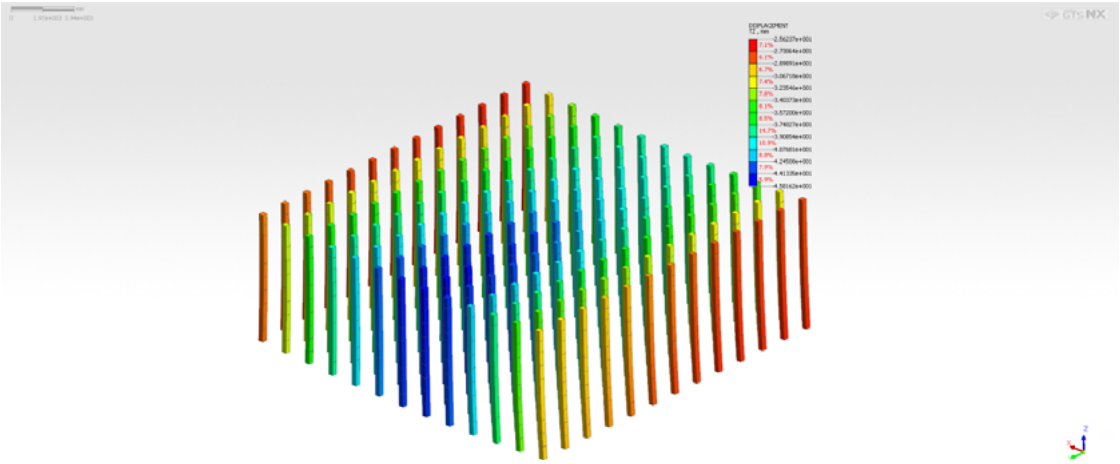


**Рис. 9.** Вертикальная деформация свай после проезда балочного транспортера

сваями длиной 9 м и сечением 35 × 35 см [7]. На рис. 8 приведена расчетная модель для случая проезда балочного транспортера на расстоянии 2 м от бровки второго защитного слоя. Учтена симметрия относительно середины длины балочного транспортера

Результаты расчетов показывают, что горизонтальные напряжения в геосетке гибкого ростверка по оси *X* (поперек пути), вызванные отсыпкой второго защитного слоя земляного полотна, концентрируются над свайными оголовками и не превышают 122 кН/м$^2$. В пересчете на одноосное растяжение геосетки шириной 1 м усилие растяжения не превысит 12,2 кН/м (при моделировании гибкого ростверка расстояние между слоями геосетки принято равным 0,1 м). Горизонтальные напряжения в геосетке гибкого ростверка по оси *X* (поперек пути), вызванные воздействием от проезда балочного транспортера, также концентрируются над свайными оголовками менее нагруженных свай и не превышают 163 кН/м$^2$. В пересчете на одноосное растяжение геосетки шириной 1 м усилие растяжения не превысит 16,3 кН/м. Непосредственно под балочным транспортером усилие растяжения минимально и составляет 3–9 кН/м.

Горизонтальные перемещения гибкого ростверка от воздействия проезда балочного транспортера направлены к середине геосетки и составляют 4,2 мм со стороны менее загруженной подвижной нагрузки и 2,3 мм со стороны, к которой смещен проезд транспортера. На рис. 9 приведено свайное поле в деформированном состоянии. Синим цветом выделена группа свай, имеющих дополнительную вертикальную дефор-

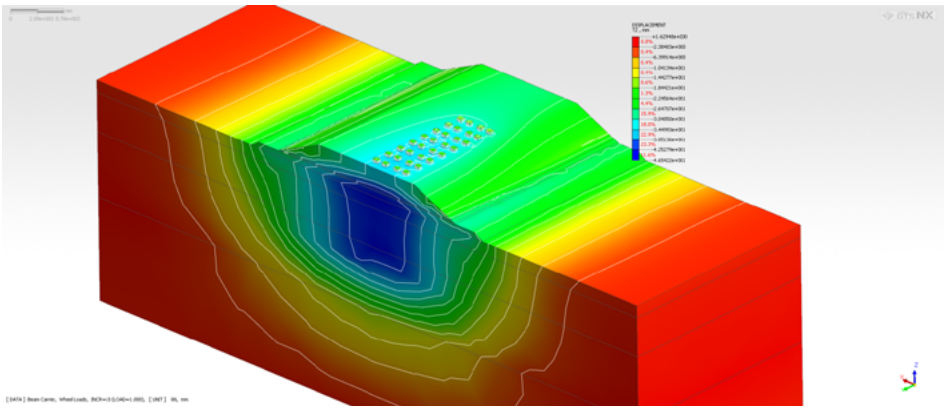


**Рис. 10.** Вертикальные деформации, вызванные проездом балочного транспортера

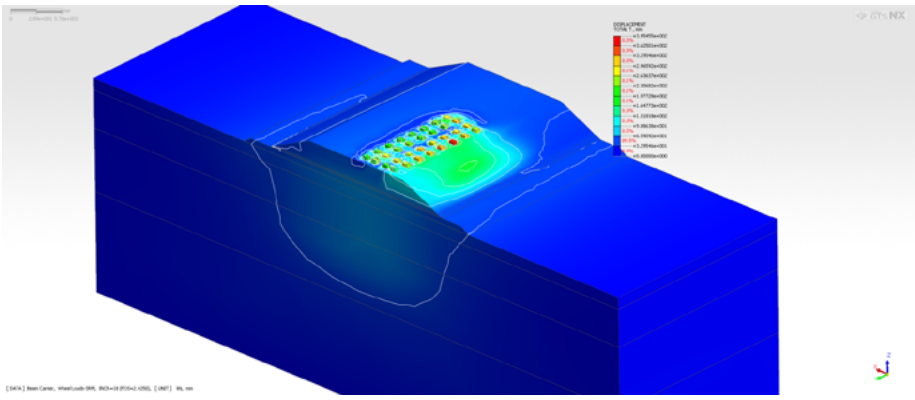


**Рис. 11.** Результат расчета устойчивости по 3 варианту при коэффициенте устойчивости ($K_у$), равном 2,4

Сводная таблица с результатами расчетов устойчивости

| Параметр | 1 вариант | | 2 вариант | | 3 вариант | | Нормативное значение по СТУ [8] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 м от бровки | 2 м от бровки | 1 м от бровки | 2 м от бровки | 1 м от бровки | 2 м от бровки | |
| Коэффициент устойчивости ($K_у$) | 1,13[1]<br>1,89[2] | 1,50[1]<br>1,80[2] | 1,19[1]<br>1,60[2] | 1,60[1]<br>3,00[2] | 1,80[2] | 2,20[2] | 1,235 |
| Образование колеи, см | 7,0[1]<br>2,0[2] | 6,4[1]<br>1,9[2] | 8,4[1]<br>2,4[2] | 8,4[1]<br>2,4[2] | 3,7[2] | 3,5[2] | не нормируется |

*Примечания.* [1]При расчете по 2D-схеме. [2]При расчете по 3D-схеме.

мацию, вызванную проездом балочного транспортера и равную 10 мм.

На рис. 10 приведены изополя вертикальных деформаций земляного полотна под воздействием проезда балочного транспортера. Величина деформаций под шинами на уровне верха второго защитного слоя составила 15 мм. Расчет устойчивости на рис. 11 показал запас несущей способности, соответствующий коэффициенту, равному 2,4.

В таблице представлены результаты расчетов по трем вариантам, а также сравнение полученных параметров с нормативными требованиями.

По результатам проведенных расчетов сделаны выводы:

1. Проезд колесного балочного транспортера типа YL900 по второму защитному слою может быть разрешен.

2. Не рекомендуется проезд по верху второго защитного слоя ближе чем 2 м от бровки второго защитного слоя.

3. Перед пропуском колесного балочного транспортера типа YL900 по второму защитному слою необходимо проверить влажность грунта, и в случае, если она выше допустимой по нормам, проезд не разрешен.

4. Для исключения колееобразования и неравномерного деформирования грунтов ниже основания второго защитного слоя повторные проходы следует выполнять со смещением на ширину колеса.

5. Нагрузка, вызванная проездом колесного балочного транспортера типа YL900, не приводит к деформациям геосинтетики гибкого ростверка, свай и грунтов межсвайного пространства, превышающим допуски по нормам.

6. При недостаточной несущей способности грунтов по результатам геотехнических исследований и поверочных расчетов необходимо провести укрепление земляного полотна за счет применения геосинтетических материалов и (или) стабилизации. На слабых основаниях следует применить интенсивную технологию упрочнения грунтов [7, 12] с устройством дренажных прорезей, защитного слоя и виброуплотнением катками с отжатием воды для снижения влажности.

7. После проезда колесного балочного транспортера типа YL900 второй защитный слой должен быть восстановлен до проектных отметок и уплотнен до нормативной плотности перед укладкой первого защитного слоя.

## Заключение

Балочные транспортеры обеспечивают новую технологию строительства инженерных сооружений высокоскоростных железных дорог. Их применение позволяет значительно снизить трудозатраты и повысить точность монтажа тяжелых балочных конструкций. Однако эксплуатация сложной техники связана с дополнительными к нормам требованиями к стабильности конструкции земляного полотна. Тем не менее, анализ показал наличие ряда рисков, связанных с эксплуатацией балочных транспортеров в сложных геотехнических условиях. Известные случаи аварий, связанные с потерей устойчивости земляного полотна, подчеркивают необходимость комплексного геотехнического мониторинга перед началом строительных работ. Рекомендуется разработать и внедрить комплекс мер по геотехническому мониторингу в процессе строительства и эксплуатации. Особое внимание следует уделить проверке влажности грунта перед началом работ, расчетам устойчивости земляного полотна и регламенту производства работ с применением балочных транспортеров.

## Список источников

1. “Hanjiang Heavy Industry’s project cargo important to China’s high-speed rail” / AJOT.COM. — URL: https://ajot.com/premium/ajot-hanjiang-heavy-industrys-project-cargo-important-to-chinas-high-speed-rail (дата обращения: 25.02.2025).

2. Santhia Viaduct — High Speed Railway Turin-Milan. Spic Srl. — URL: https://www.spicsrl.com/references/santhia/ (дата обращения: 25.02.2025).

3. TCDD (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları). — URL: https://www.turkiye.gov.tr/tcdd (дата обращения: 25.02.2025).

4. Anadolu Ajansı. — URL: https://www.aa.com.tr/ (дата обращения: 25.02.2025).

5. Tuoi Tre News. — URL: https://tuoitrenews.vn/ (дата обращения: 25.02.2025).

6. 新华网_让新闻离你更近. — URL: http://www.xinhuanet.com/ (дата обращения: 25.02.2025).

7. Луцкий С. Я. О технологическом регламенте сооружения и контроля качества строительства земляного полотна / С. Я. Луцкий, Т. В. Шепитько, И. С. Уланов // Путь и путевое хозяйство. — 2021. — № 10. — С. 8–11.

8. Специальные технические условия «Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург (ВСЖМ — 1)». Изменение 1. 960-СТУ.

9. Директива Deutsche Bahn Gruppe, Ril 836.

10. Tyre Transporter — Huada Heavy Industry. Huada Crane. — URL: https://www.huadacrane.com/casting-yard-equipment/tyre-transporter.html (дата обращения: 25.02.2025).

11. 【中交西筑YL900型运梁车综合】 — 整机平台管理. — URL: https://www.6300.net/product/detail_1247.html (дата обращения: 25.02.2025).

12. Shepitko T. V. Technological Features of Construction and Reconstruction of Geotechnical Structures in the Arctic Zone / T. V. Shepitko, S. Y. Lutsky, G. I. Nak, A. M. Cherkasov // Designs. — 2022. — Vol. 6(2). — DOI: 10.3390/designs6020034

Дата поступления: 26.03.2025
Решение о публикации: 16.04.2025

**Контактная информация:**
УЛАНОВ Иван Сергеевич — канд. техн. наук, заместитель генерального директора по инновациям; i.ulanov@npsst.ru
ГОРЛОВ Александр Вячеславович — главный эксперт; a.gorlov@npsst.ru
ЛУЦКИЙ Святослав Яковлевич — д-р техн. наук, профессор, главный специалист Научно-исследовательского центра «Тепло- и массообмен в строительстве»; lsy40@mail.ru
ЧЕРКАСОВ Александр Михайлович — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Транспортное строительство в экстремальных условиях»; miit-niml@mail.ru
ВАРЧЕНКО Богдан Андреевич — аспирант кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», техник Научно-исследовательского центра «Тепло- и массообмен в строительстве»; bogdan_varchenko@inbox.ru
ШТЕЙН Александр Исаакович — канд. техн. наук; shteyn_alex@mail.ru

# Effective Use of Girder Transporters in the Construction of High-Speed Railways

**I. S. Ulanov[1], A. V. Gorlov[1], S. Ya. Lutsky[2], A. M. Cherkasov[2], B. A. Varchenko[2], A. I. Stein[3]**

[1]NPS High-Speed Technologies LLC, 6, bld, 5, Barklaya str., Moscow, 121087, Russian Federation
[2]Russian University of Transport, 9, bld 9, GSP-4, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation
[3]Private Independent Expert Without Affiliation

**For citation:** Ulanov I. S., Gorlov A. V., Lutsky S. Ya., Cherkasov A. M., Varchenko B. A., Stein A. I. Effective Use of Girder Transporters in the Construction of High-Speed Railways // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 362–372. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-362-372

## Summary

**Purpose:** To analyse the specific features, problems and world practices of the use of girder transporters; to develop the recommendations for their use in the construction of HSR infrastructure facilities. To investigate and calculate the roadbed stability in order to make a decision on the possibility of using girder transporters. **Methods:** Carrying out geotechnical calculations of the strength and stability of the roadbed taking into account possible loads from the passage of the girder transporter. Analysis of the results of geotechnical studies and verification calculations. **Results:** The recommendations for improving the efficiency of girder transporters, speeding up the process and reducing labour costs during the installation of heavy girder structures. The conclusions on the changes in the regulatory requirements for the organization of the transport operation, as well as on the technology of preparing the roadbed and its foundation. The need to investigate the stability of

the soils, to check the quality of the access roads and to monitor and carry out verification calculations before starting work in order to avoid the risk of deformation of the roadbed has been pointed out. **Practical significance:** The geotechnical investigation and verification calculation methods presented in this paper allow the identification of critical zones of possible loss of roadbed stability and the development of measures to strengthen them. The application of the research results to design practices will ensure the regulatory quality of heavy HSR structures transportion, as well as the safe operation of girder transporters; it will reduce risks associated with roadbed deformation, and reduce construction time.

**Keywords:** High-speed railway, girder transporter, stress-strain state, deformation, geotechnical investigation.

## References

1. "Hanjiang Heavy Industry's project cargo important to China's high-speed rail". AJOT.COM. Available at: https://ajot.com/premium/ajot-hanjiang-heavy-industrys-project-cargo-important-to-chinas-high-speed-rail (accessed: February 25, 2025).

2. Santhia Viaduct — High Speed Railway Turin-Milan. Spic Srl. Available at: https://www.spicsrl.com/references/santhia/ (accessed: February 25, 2025).

3. TCDD (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları). Available at: https://www.turkiye.gov.tr/tcdd (accessed: February 25, 2025).

4. Anadolu Ajansı. Available at: https://www.aa.com.tr/ (accessed: February 25, 2025).

5. Tuoi Tre News. Available at: https://tuoitrenews.vn/ (accessed: February 25, 2025).

6. 新华网_让新闻离你更近. Available at: http://www.xinhuanet.com/ (accessed: February 25, 2025).

7. Lutskiy S. Ya., Shepit'ko T. V., Ulanov I. S. O tekhnologicheskom reglamente sooruzheniya i kontrolya kachestva stroitel'stva zemlyanogo polotna [On the technological regulations for the construction and quality control of the roadbed]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Track and track facilities]. 2021, Iss. 10, pp. 8–11. (In Russian)

8. *Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya "Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali Moskva — Sankt-Peterburg (VSZhM — 1)". Izmenenie 1. 960-STU* [Special technical conditions "Design, construction and operation of the Moscow — Saint Petersburg high-speed railway (VSZhM-1)". Amendment 1. 960-STU].

9. Directive of Deutsche Bahn Gruppe, Ril 836.

10. Tyre Transporter — Huada Heavy Industry. Huada Crane. Available at: https://www.huadacrane.com/casting-yard-equipment/tyre-transporter.html (accessed: February 25, 2025).

11. 【中交西筑YL900型运梁车综合】 — 整机平台管理. Available at: https://www.6300.net/product/detail_1247.html (accessed: February 25, 2025).

12. Shepitko T. V., Lutsky S. Y., Nak G. I., Cherkasov A. M. Technological Features of Construction and Reconstruction of Geotechnical Structures in the Arctic Zone. Designs, 2022, vol. 6(2). DOI: 10.3390/designs6020034.

Received: March 26, 2025
Accepted: April 16, 2025

**Author's information:**
Ivan S. ULANOV — PhD in Engineering, Deputy General Director for Innovation; i.ulanov@npsst.ru
Alexander V. GORLOV — Chief Expert; a.gorlov@npsst.ru
Svyatoslav Ya. LUTSKY — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Chief Specialist of the Scientific Research Center "Heat and Mass transfer in Construction"; lsy40@mail.ru
Alexander M. CHERKASOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department "Transport Construction in Extreme conditions"; miit-niml@mail.ru
Bogdan A. VARCHENKO — Postgraduate Student, Department "Design and Construction of Railways", Technician at the Scientific Research Center "Heat and Mass Transfer in Construction"; bogdan_varchenko@inbox.ru
STEIN Alexander Isaakovich — PhD in Engineering; shteyn_alex@mail.ru

УДК 656.225:65.012.2

# Разработка модели тарификации контрейлерных перевозок в системе ж/д транспорта Узбекистана

**З. Г. Мухамедова[1], С. Х. Ахмедов[2]**

[1]Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан, Ташкент, Мирабадский район, ул. Темирйулчилар, 1
[2]АО «Узбекистон темир йулари», Республика Узбекистан, Ташкент, Мирабадский район, ул. Тараса Шевченко, 7

**Для цитирования:** *Мухамедова З. Г., Ахмедов С. Х.* Разработка модели тарификации контрейлерных перевозок в системе ж/д транспорта Узбекистана // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 373–382. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-373-382

## Аннотация

**Цель:** В условиях глобализации и растущей конкуренции на международных транспортных рынках развитие эффективной логистической инфраструктуры становится приоритетной задачей для многих стран, включая Республику Узбекистан. Актуальность настоящего исследования продиктована необходимостью повышения конкурентоспособности национальной железнодорожной системы и интеграции в международные транспортно-логистические цепочки. В данной статье рассматривается проблема формирования рациональной и экономически обоснованной тарифной модели для контрейлерных перевозок в железнодорожной системе Узбекистана как одного из перспективных направлений развития грузоперевозок. **Методы:** В ходе исследования применены современные информационные технологии, анализ нормативно-правовой базы, а также данные, полученные с использованием автоматизированных систем управления перевозками. Основу методологии составляют экономико-математические модели, позволяющие осуществлять расчет себестоимости контрейлерных перевозок, а также проводить сравнительный анализ эффективности различных тарифных подходов с применением таких критериев, как Вальда, Лапласа и Сэвиджа. В статье представлена построенная тарифная сетка и приведен сравнительный анализ стоимости и времени доставки грузов по маршруту Ташкент — Бухара различными видами транспорта. **Результаты:** Показали, что контрейлерные перевозки обладают рядом преимуществ, включая сокращение времени доставки и снижение логистических затрат. Выявлены ключевые риски, связанные с внедрением новой тарифной модели, и предложены конкретные меры по их минимизации. **Практическая значимость:** Заключается в возможности ее использования для разработки стратегии развития железнодорожного транспорта Узбекистана до 2035 года, направленной на повышение эффективности и устойчивости отрасли.

**Ключевые слова:** Контрейлерные перевозки, тарифная модель, железнодорожный транспорт, логистика, экономико-математическое моделирование.

Разработка модели тарификации начинается с ее обоснования. Контрейлерные перевозки имеют как свои несомненные преимущества, так и ограничения, в большей степени связанные с инфраструктурой и сложностью множественных процессов, требующих четкой алгоритмизации. Такая перевозка строится на совместном использовании различных видов транспорта. Все участники логистической цепи при этом находятся в постоянном взаимодействии в режиме онлайн. Нужно учесть все затраты, которые сопровождают перевозку, — от эксплуатацион-

ных расходов до затрат на организацию и реконструкцию инфраструктуры, сервис в целом. Такой подход позволяет сформировать тарификацию, отвечающую условиям прозрачности, что повысит спрос на эти услуги, а значит, и объемы доставки посредством данного перспективного способа организации грузооборота [1].

В связи с чем важно проанализировать существующие тарифные модели, уже зарекомендовавшие себя на глобальном рынке, чтобы оптимизировать контейнеропотоки в Узбекистане. Международный опыт может быть адаптирован на национальную почву, с учетом специфики страны и ее экономического, инфраструктурного, законодательного потенциала в сфере логистики. Тарифная политика — понятие гибкое, которое складывается на основе множества факторов и должно откликаться на тенденции в обществе и экономике страны и ее регионов. Только в этом случае контрейлерные перевозки станут конкурентоспособным видом транспортировки, вкладом в рост ВВП, в том числе регионального, в рамках принятой Стратегии развития транспортной системы Республики Узбекистан до 2035 года.

Тарифная политика складывается из согласованности действий всех участников цепочки: важно добиться минимизации простоев и повышения общей эффективности перевозок. В связи с чем нужна единая информационная платформа для обмена данными и управления процессами [2].

Процесс формирования тарифов в рамках модели контрейлерных перевозок в системе железнодорожного транспорта Узбекистана основан на ключевых принципах, которые призваны оптимизировать тарификацию, сделать проводимые операции более прозрачными, а компании — конкурентоспособными. Речь идет прежде всего о принципе затратности: тариф формируется с учетом всех расходов, включая дополнительные. В эту величину входят сумма прямых затрат, расходов на эксплуатацию подвижного состава, поддержание и модернизацию инфраструктуры и ряд косвенных затрат, управленческих и административных. Если придерживаться данного принципа, то тарифная система будет оптимизирована, выстроена на реальной, незавышенной, стоимости услуг. При таком подходе возможен рост интереса клиентуры к данному способу перевозок, повышение объема перевозимых грузов [3].

В соответствии с принципом прозрачности важно, чтобы тарифная политика была открытой, проверяемой, логичной. Только в этом случае возможны доверительные, взаимовыгодные, долгосрочные отношения с клиентом. Должна быть возможность разложить стоимость на промежуточные процессы и результаты, чтобы увидеть, из каких расходов она складывается. Потребитель должен быть проинформирован о стоимости перевозки в целом, дополнительных сборах, условиях, которые также требуют вложений при доставке и обработке груза.

Современная рыночная среда отличается жесткой конкуренцией, зачастую крупные игроки вытесняют небольшие компании, тем важнее прозрачная тарифная система, преимущества которой могут привлечь клиента. При таком подходе логистическая компания может не только удержать уже существующих клиентов, но и с их помощью повысить свою узнаваемость в стране, отдельном регионе, в зависимости от масштабов деятельности [4].

В соответствии с принципом конкурентоспособности тарифы должны учитывать средние цены в рыночной нише. Если компания предлагает высокий тариф, чем в среднем по рынку, это должно быть обосновано качеством, скоростью перевозки. Таким образом, требуется адаптивная тарифная политика, в рамках которой некоторые цены могут снижаться. В обслуживание могут включаться дополнительные полезные услуги, чтобы обосновать высокий тариф. В частности, гарантировать грамотное таможенное оформление товара [5].

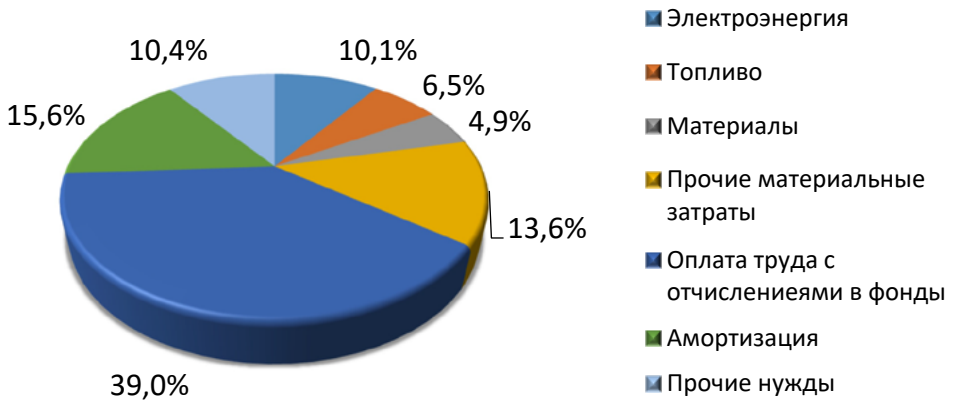



**Рис. 1.** Структура затрат на передвижение 1 т на 1 км контрейлерным методом, UZS

Требуется координировать действия компаний-участников, создавать единую тарифную систему с учетом всех аспектов перевозки — от маршрутизации до времени затрат на доставку. Интеграция различных видов транспорта позволяет оптимизировать логистические процессы и повысить общую эффективность перевозок [6].

Устанавливать тарифы компании также обязуются в рамках принципа устойчивости и социальной ответственности. Кроме экономического, для логистики важен социальный и природоохранный аспект. Все перевозки должны быть безопасными, надежными, персонал компаний должен поддерживаться материальными и нематериальными стимулами, регулярно повышать квалификацию. Компании стремятся к устойчивому развитию, устанавливают обоснованную тарифную систему, уравновешивая стремление к максимизации прибыли и социальной ответственности. Таким образом, важно, чтобы тарифная политика была адекватной и оптимальной для выполнения различных задач: развития бизнеса, реконструкции и обновления транспортной инфраструктуры, а значит — и поддержки национальной экономики [7].

В рамках исследования тарифы по модели тарификации будут рассчитаны затратным методом. Для этого вначале определим себестоимость удельных затрат на перевозку одного тонно-километра. Состав и структура затрат определяется их составом и структурой в компании АО «O‘zbekiston temir yo‘llari»[1] (Узбекистанские железные дороги). Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Состав и структура затрат на передвижение 1 т на 1 км контрейлерным методом, UZS (узбекский сум)

| Статья затрат | Удельная стоимость т·км, UZS | Доля, % |
|---|---|---|
| Электроэнергия | 20 | 10,1 |
| Топливо | 13 | 6,5 |
| Материалы | 10 | 4,9 |
| Прочие материальные затраты | 27 | 13,6 |
| Оплата труда с отчислениями в фонды | 78 | 39,0 |
| Амортизация | 31 | 15,6 |
| Прочие нужды | 21 | 10,4 % |
| Затраты всего | 201 | 100 % |

Более наглядно структура затрат представлена на рис. 1.

Табл. 3 и рис. 1 демонстрируют следующее:

1. Наиболее значимой статьей затрат являются затраты, связанные с оплатой труда, куда также включаются платежи в Пенсионный фонд и другие внебюджетные фонды, которые составляют 78 UZS (39 % от общего количества затрат).

[1] Сайт АО «УТЙ». — URL: https://railway.uz/ru/proekty/1920/.

2. Далее по значимости располагаются затраты, связанные с амортизацией основных средств, что естественно для таких капиталоемких отраслей, как грузоперевозки по железной дороге. Эти затраты составляют 31 UZS (15,6 % от общего количества затрат).

3. Далее располагаются затраты, связанные с прочими материальными издержками, куда включаются, например, затраты на ремонт железнодорожных путей, которые, несмотря на свой капитальный характер, все же включаются в себестоимость. Они составляют 27 UZS (13,6 % от общего количества затрат).

Прочими значимыми затратами являются затраты на электроэнергию (10,1 %) и топливо (6,5 %).

Поскольку были рассчитаны удельные затраты на тонно-километр, возникает вопрос о себестоимости перевозки автопоезда на специальной фитинговой платформе, что является сутью контрейлерных перевозок. Вес автопоезда (еврофуры длиной до 16,5 м по стандарту ЕС) в среднем составляет 38 т (до 24 т — вес груза и до 14 т — вес порожнего автопоезда), следовательно, при расчете себестоимости на перевозку 1 автопоезда на 1 км нужно учитывать отдельно вес груза и вес автопоезда.

Найдя себестоимость, можно определить тариф на перевозку 1 т на 1 км исходя из сложившейся маржинальности в компании АО «O‘zbekiston temir yo‘llari», которая по итогам 2023 г. составила 22,7 %[1].

Тариф на перевозку 1 т на 1 км составит:

$$201(100\,\% + 22,7\,\%) = 247 \text{ UZS}.$$

Общий тариф на перевозку автопоезда на 1 км вычисляется по формуле:

$$\text{Т} = \text{Т}_{\text{г}} + \text{Т}_{\text{п}} = (V_{\text{г}} + V_{\text{п}})247, \quad (1)$$

где $\text{Т}_{\text{г}}$ — часть общего тарифа, учитывающего перевозку груза весом $V_{\text{г}}$;

$\text{Т}_{\text{п}}$ — часть общего тарифа, учитывающего перевозку пустого автопоезда весом $V_{\text{п}}$.

Важно отметить, что обязательно должно быть оговорено ограничение для автопоездов с малым весом — не менее 75 % от максимального тарифа, который составляет $(24+14)247 = 9386$ UZS за 1 км.

Для привлекательности клиентов имеет смысл установить сетку из 3 тарифов, которые будут отличаться тем, что за вес автопоезда будет взиматься плата как за вес груза (общий тариф), за вес автопоезда будет взиматься плата с половинной маржинальностью (уменьшенный тариф), за вес автопоезда будет взиматься плата по себестоимости (минимальный тариф).

Таблица 2. Сетка тарифов на передвижение автопоезда на 1 км с расчетом максимально возможной стоимости, UZS

| № | Тип тарифа | Груз | Авто-поезд | Расчет на автопоезд (24 + 14) т |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Общий | 247 | 247 | 9386 |
| 2 | Уменьшенный | 247 | 224 | 9050 |
| 3 | Минимальный | 247 | 201 | 8731 |

Для оценки эффективности каждого из типов тарифа следует учесть следующие факторы:

– снижение тарифа повышает привлекательность контрейлерных грузоперевозок для потенциальных клиентов, что повышает выручку предприятия;

– повышение тарифа увеличивает прибыльность операционной деятельности компании.

Для оценки взаимного влияния данных факторов применим известные критерии для выбора оптимальной стратегии при принятии решения в условиях риска и неопределенности.

[1] Сайт АО «УТЙ». — URL: https://railway.uz/ru/proekty/1920/.

Критерий Лапласа применяется, если можно предполагать, что все варианты внешних условий одинаково вероятны. Для каждого решения находится средняя оценка по всем вариантам внешних условий (средний выигрыш):

$$E\left(x_i\right)=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{n}\left(E_{mn}P\left(B_j \mid A_i\right)\right), \quad (2)$$

где $N$ — количество состояний внешней среды.

Лучшим является решение с максимальной оценкой.

$$Z=\max\left(E\left(x_i\right)\right), \quad (3)$$

где $Z$ — оптимальная стратегия.

Критерий Вальда (критерий крайнего пессимизма, максиминный критерий): решение выбирается в расчете на наихудшие внешние условия. Вероятности состояний природы неизвестны и нет возможности получить о них какую-либо статистическую информацию. В качестве оценки каждого решения используется минимальный выигрыш, который можно получить при выборе этого решения:

$$E\left(x_i\right)=\min\left(E_{mn}\right). \quad (4)$$

Лучшим является решение с максимальной оценкой:

$$Z=\max\left(E\left(x_i\right)\right). \quad (5)$$

Критерию Вальда выбирают стратегию, которая дает гарантированный выигрыш при наихудшем варианте состояния природы.

Критерий Сэвиджа, как и критерий Вальда, — это критерий крайнего пессимизма, но только пессимизм здесь проявляется в том, что минимизируется максимальная потеря в выигрыше. Для оценки решений используется матрица рисков. В качестве оценки пользуется максимальный риск (максимальный потерянный выигрыш), соответствующий данному решению:

$$E\left(x_i\right)=\max\left(R_{ij}\right). \quad (6)$$

Лучшим является решение с минимальной оценкой.

$$Z=\max\left(E\left(x_i\right)\right). \quad (7)$$

Это наиболее осторожный подход к принятию решений и в большей степени учитывающий все возможные риски.

Для оценки типов тарифов по критерию Лапласа и Вальда построим матрицу приведенных прибылей по факторам величины тарифа (обратная количеству привлекаемых клиентов) и прибыли (табл. 3). Выбор данных двух, по сути противоречивых факторов (с точки зрения перевозчика), объясняется тем, что необходимо выбрать оптимальную стратегию в условиях, когда применение более низкого тарифа (более привлекательного для клиентов) приводит к увеличению общей выручки, но снижает прибыльность каждого конкретного заказа. Для критерия Сэвиджа вместо матрицы приведенных прибылей рассчитывается матрица рисков (табл. 4). Величина риска обратна прибыли и рассчитывается по формуле:

(Риск) = 1 – (Приведенная прибыль).

Расчет производится для автопоезда с максимальным весом:

(24 + 14 = 38 т).

Исходя из значений, рассчитанных в табл. 3 и 4, вычислим оптимальные тарифы для всех 3 критериев.

По критерию Вальда (табл. 5) оптимальным является тариф минимальный.

По критерию Лапласа (табл. 6) оптимальным является тариф нормальный.

По критерию Сэвиджа (табл. 7) оптимальным является тариф минимальный.

Таблица 3. Матрица приведенных прибылей

| № | Тип тарифа | Тариф | Прибыль | Привлекательность для клиентов | Прибыльность |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Общий | 9386 | 1731 | 0,00 | 1,00 |
| 2 | Уменьшенный | 9050 | 1412 | 0,04 | 0,82 |
| 3 | Минимальный | 8731 | 1093 | 0,07 | 0,63 |
| | max | 9386 | 1731 | | |

Таблица 4. Матрица рисков

| № | Тип тарифа | Тариф | Прибыль | Риск потери клиентов | Риск недополучить прибыль |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Общий | 9386 | 1731 | 1,00 | 0,00 |
| 2 | Уменьшенный | 9050 | 1412 | 0,96 | 0,18 |
| 3 | Минимальный | 8731 | 1093 | 0,93 | 0,37 |
| | max | 9386 | 1731 | | |

Таблица 5. Критерий Вальда

| № | Тип тарифа | Привлекательность для клиентов | Прибыльность | min |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Общий | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | Уменьшенный | 0,96 | 0,18 | 0,18 |
| 3 | Минимальный | 0,93 | 0,37 | 0,37 |
| | max | | | 0,37 |

Таблица 6. Критерий Лапласа

| № | Тип тарифа | Привлекательность для клиентов | Прибыльность | 1/3*СУММ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Общий | 0,00 | 1,00 | 0,33 |
| 2 | Уменьшенный | 0,04 | 0,82 | 0,28 |
| 3 | Минимальный | 0,07 | 0,63 | 0,23 |
| | max | | | 0,33 |

Таблица 7. Критерий Сэвиджа

| № | Тип тарифа | Риск потери клиентов | Риск недополучить прибыль | max |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Общий | 1,00 | 0,00 | 1,00 |
| 2 | Уменьшенный | 0,96 | 0,18 | 0,96 |
| 3 | Минимальный | 0,93 | 0,37 | 0,93 |
| | min | | | 0,93 |

Далее необходимо привести размеры дополнительных услуг, которые будут включаться в стоимость доставки контрейлерным способом (табл. 8).

Стоимость провоза водителей в купейном вагоне контрейлерного поезда включается в стоимость тарифа на перевозку груза.

Таблица 8. Стоимость дополнительных услуг

| Услуга | Стоимость, UZS |
|---|---|
| Взвешивание автотранспорта | 10 000 |
| Техосмотр автотранспорта при погрузке | 16 000 |
| Въезд одной автомашины | 26 000 |
| ИТОГО | 54 000 |

**Влияние общей технологии и тарификации на эффективность перевозок**

Влияние общей технологии и тарификации на эффективность перевозок является как экономическим, так и техническим и отражается на транспортной системе в целом. Глобализация и информатизация предъявляют высокие требования к организации перевозок. Тем важнее для транспортных компаний проанализировать технологические процессы и тарифную политику.

В качестве практической применимости исследования рассмотрим перемещения 24 т груза по маршруту Ташкент — Бухара (является пилотным проектом по запуску контрейлерного сообщения в рамках программы «Пространство 1520»). Расстояние между пунктами составит для железнодорожного сообщения 623 км, а для автомобильного — 581 км. Груз в 24 т по железной дороге (для расчета) будет перевозиться в 40-фт контейнере. Автоперевозка будет осуществляться автопоездом, контрейлерная перевозка — таким же автопоездом с весом пустого 14 т.

При расчете стоимости и времени доставки по железной дороге будут учтены стоимость и время погрузки и разгрузки контейнера (455 840 UZS и 1,5 ч) и средняя стоимость и время нахождения контейнера перед погрузкой в контейнерном терминале (93 870 UZS и 36 ч). При расчете стоимости и времени контрейлерной доставки будут учтены дополнительные услуги из табл. 8. Скорость доставки по железной дороге составит 15 км/ч (с учетом среднего суточного пробега). Скорость доставки по автодороге с учетом суточного пробега составит 30 км/ч. Расчеты стоимости и времени представлены в табл. 9.

На графике рис. 2 данные таблицы представлены более наглядно.

Таблица 9. Расчеты стоимости и времени по типам доставки по маршруту Ташкент — Бухара (доставка 24 т груза)

| Тип доставки | Стоимость доставки, UZS | Время в пути, ч |
|---|---|---|
| Контрейлерный | 5899 | 43 |
| Автомобильный | 6233 | 19 |
| Железнодорожный | 6105 | 78 |

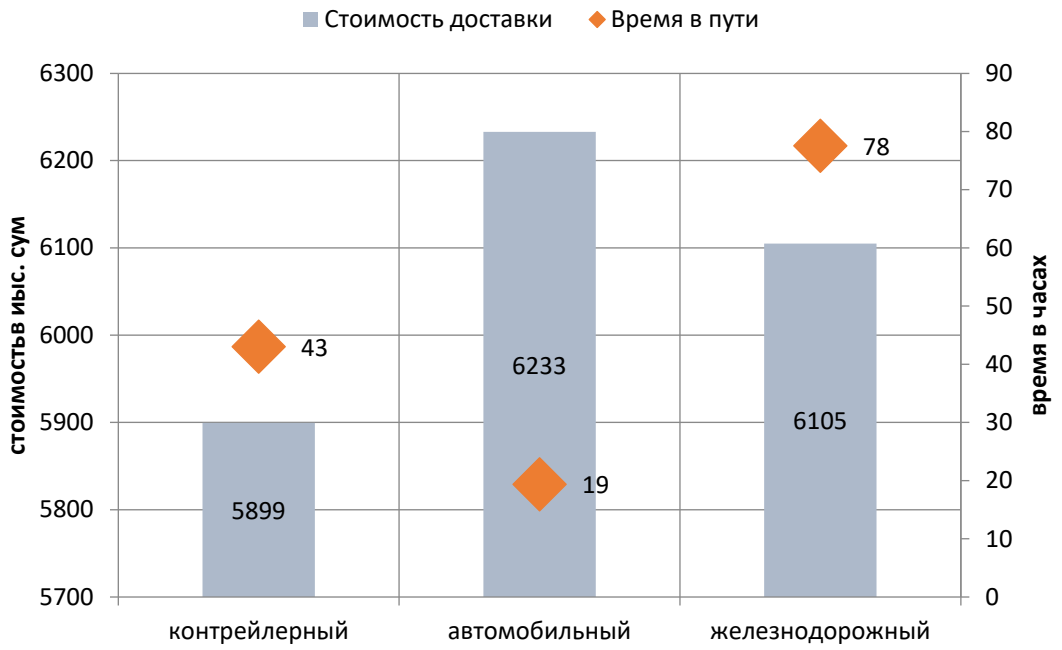



**Рис. 2.** Стоимость и время по типам доставки по маршруту Ташкент — Бухара (доставка 24 т груза)

Таблица 10. Расчет приведенной стоимости и времени по типам доставки по маршруту Ташкент — Бухара (доставка 24 т груза)

| Тип доставки груза | Время | Стоимость | Приведенное время | Приведенная стоимость |
|---|---|---|---|---|
| Контрейлерный | 43 | 5899 | 0,56 | 0,95 |
| Автомобильный | 19 | 6233 | 0,25 | 1,00 |
| Железнодорожный | 78 | 6105 | 1,00 | 0,98 |
| Max значение | 78 | 6233 | | |

Таблица 11. Критерий Вальда

| № | Тип доставки груза | Время | Стоимость | min |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Контрейлерный | 0,44 | 0,05 | 0,05 |
| 2 | Автомобильный | 0,75 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | Железнодорожный | 0,00 | 0,02 | 0,00 |
| | Max достигается типом № 1 | | | 0,05 |

Таблица 12. Критерий Сэвиджа

| № | Тип доставки груза | Время | Стоимость | max |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Контрейлерный | 0,56 | 0,95 | 0,95 |
| 2 | Автомобильный | 0,25 | 1,00 | 1,00 |
| 3 | Железнодорожный | 1,00 | 0,98 | 1,00 |
| | Min достигается типом № 1 | | | 0,95 |

Таблица 13. Критерий Лапласа

| № | Тип доставки груза | Время | Стоимость | 1/3*СУММ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Контрейлерный | 0,56 | 0,95 | 0,50 |
| 2 | Автомобильный | 0,25 | 1,00 | 0,42 |
| 3 | Железнодорожный | 1,00 | 0,98 | 0,66 |
| | Max достигается типом № 2 | | | 0,42 |

Для оценки наиболее эффективного типа доставки снова применим критерии Вальда, Сэвиджа и Лапласа, опираясь на матрицу приведенной стоимости и времени доставки (табл. 10).

По двум из трех критериев наиболее оптимальным типом доставки является контрейлерный тип.

## Выводы

В рамках проведенного исследования была разработана модель тарификации контрейлерных перевозок, основанная на принципе затратности и адаптированная под условия железнодорожного транспорта Узбекистана. Расчет удельной себестоимости перевозки 1 т груза на 1 км методом контрейлерных перевозок показал, что общая сумма затрат составляет 201 UZS, из которых наибольшую долю занимают:

– оплата труда с отчислениями — 78 UZS (39 %);

– амортизация — 31 UZS (15,6 %);

– прочие материальные затраты — 27 UZS (13,6 %);

– электроэнергия — 20 UZS (10,1 %).

С учетом маржинальности компании АО «O‘zbekiston temir yo‘llari» в размере 22,7 % тариф на перевозку 1 т на 1 км составил 247 UZS. На этой основе была разработана трехуровневая тарифная сетка:

1. Общий тариф: 9386 UZS за 1 км перевозки автопоезда весом 38 тонн (24 т груза + 14 т собственного веса).
2. Уменьшенный тариф: 9050 UZS.
3. Минимальный тариф: 8731 UZS.

Оценка тарифов по критериям принятия решений в условиях неопределенности показала:

– по критерию Вальда и Сэвиджа наилучшим вариантом является минимальный тариф — благодаря наименьшим рискам и большей устойчивости;

– по критерию Лапласа оптимальным признан общий тариф, как обеспечивающий наибольшую прибыльность.

## Список источников

1. Ежегодные отчеты АО «Узбекистон темир йуллари». — URL: https://railway.uz/ru/proekty/9018/ (дата обращения: 10.12.2024).
2. Государственный Комитет Республики Узбекистан по статистике. — URL: https://stat.uz/ru/ofitsialnaya-statistika/national-accounts дата доступа 10.12.2024
3. Ларин А. Н. Контрейлерные перевозки как способ совершенствования перевозочного процесса / А. Н. Ларин, К. Е. Новоселова // Экономика и общество: современные исследования и инновационное развитие. — 2022. — С. 165–172.
4. Расулов М. Х. О перспективах развития ускоренных контейнерных перевозок в Узбекистане / М. Х. Расулов, А. Ф. Исматуллаев // Инновационный транспорт. — 2021. — № 1. — С. 50–54.
5. Басманов Д. А. Терминальная технология доставки груза в рамках контрейлерной перевозки / Д. А. Басманов // МНСК-2022. — 2022. — С. 83–84.
6. Russo F. U. Sansone The terminal cycle time in road-rail combined transport / F. U. Russo // WIT Transactions on Ecology and the Environment. — 2021. — Vol. 186. — Pp. 875–886.
7. Илесалиев Д. И. Перспективы и направления транспортного развития Узбекистана в условиях формирования железных дорог Афганистана / Д. И. Илесалиев, Ш. Г. У. Махматкулов и др. // Инновационный транспорт. — 2020. — № 3. — С. 3–6.

Дата поступления: 10.04.2025
Решение о публикации: 29.04.2025

**Контактная информация:**
МУХАМЕДОВА Зиеда Гафуржановна — д-р техн. наук, профессор кафедры «Транспортно-грузовые системы»; mziyoda@mail.ru
АХМЕДОВ Сардорбек Хурматбекович — начальник департамента международного сотрудничества; sxahmedov@yandex.ru

# Development of a Pricing Model for Piggyback Transportation in the Railway Transport System of Uzbekistan

**Z. G. Mukhamedova[1], S. Kh. Akhmedov[2]**

[1]Tashkent State Transport University, 1, Temiryulchilar Str., Mirabad District, Tashkent, Republic of Uzbekistan
[2]JSC “Uzbekistan Railways”, 7, Taras Shevchenko Str., Mirabad District, Tashkent, Republic of Uzbekistan

**For citation:** Mukhamedova Z. G., Akhmedov S. Kh. Development of a Pricing Model for Piggyback Transportation in the Railway Transport System of Uzbekistan // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 373–382. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-373-382

## Summary

**Purpose:** In the context of globalization and increased competition in international transport markets, the development of an efficient logistics infrastructure is becoming a priority task for many countries including the Republic of Uzbekistan. The importance of this study lies in its potential to enhance the competitiveness of the national railway system and to integrate it into international transport and logistics chains. This article considers the development of a rational and economically justified tariff model for piggyback traffic within Uzbekistan's railway system. It identifies this as a promising direction for freight transportation development. **Methods:** The study applies the latest information technologies, regulatory framework analysis and data obtained through automated transport management systems. The methodology is based on economic and mathematical models that enable the calculation of piggyback transportation costs and a comparative analysis of the effectiveness of different tariff approaches. The analysis employed Wald, Laplace and Savage criteria. This paper presents a constructed tariff grid and a comparative analysis of the cost and delivery time of goods along the Tashkent — Bukhara route when using different modes of transport. **Results:** The study results have demonstrated the advantages of piggyback transportation, including reduced delivery time and lower logistics costs. The key risks associated with the implementation of the new tariff model have been identified, and specific measures to minimize these risks have been proposed. **Practical significance:** This research will contribute to the development of a strategy for the advancement of Uzbekistan's railway transport sector until 2035, with the objective of enhancing the efficiency and sustainability of the industry.


**Keywords:** Piggyback traffic, tariff model, railway transport, logistics, economic and mathematical modelling.

## References


1. *Ezhegodnye otchety AO "Uzbekiston temir yullari"* [Annual reports of JSC Uzbekistan Railways]. Available at: https://railway.uz/ru/proekty/9018/ (accessed: December 10, 2024). (In Russian)
2. *Gosudarstvennyy Komitet Respubliki Uzbekistan po statistike* [State Statistics Committee of the Republic of Uzbekistan]. Available at: https://stat.uz/ru/ofitsialnaya-statistika/national-accounts (accessed: December 10, 2024). (In Russian)
3. Larin A. N., Novoselova K. E. Kontreylernye perevozki kak sposob sovershenstvovaniya perevozochnogo protsessa [Containerized transportation as a way to improve the transportation process]. *Ekonomika i obshchestvo: sovremennye issledovaniya i innovatsionnoe razvitie* [Economy and society: modern research and innovative development]. 2022, pp. 165–172. (In Russian)
4. Rasulov M. Kh., Ismatullaev A. F. O perspektivakh razvitiya uskorennykh konteynernykh perevozok v Uzbekistane [On the prospects for the development of accelerated container transportation in Uzbekistan]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2021, Iss. 1, pp. 50–54. (In Russian)
5. Basmanov D. A. *Terminal'naya tekhnologiya dostavki gruza v ramkakh kontreylernoy perevozki* [Terminal technology for cargo delivery within the framework of piggyback transportation]. MNSK-2022, 2022, pp. 83–84. (In Russian)
6. Russo F. U. Sansone The terminal cycle time in road-rail combined transport. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 2021, vol. 186, pp. 875–886.
7. Ilesaliev D. I., Makhmatkulov Sh. G. U. и др. Perspektivy i napravleniya transportnogo razvitiya Uzbekistana v usloviyakh formirovaniya zheleznykh dorog Afganistana [Prospects and directions of transport development of Uzbekistan in the context of the formation of Afghan railways]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2020, Iss. 3, pp. 3–6. (In Russian)


Received: April 10, 2025
Accepted: April 29, 2025

**Author's information:**
Zieda G. MUKHAMEDOVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department "Transport and Cargo Systems"; mziyoda@mail.ru
Sardobrek. Kh. AKHMEDOV — Head of International Co-operation Department; sxahmedov@yandex.ru

УДК 656.212.5.073

# Совершенствование грузобагажных перевозок на железнодорожном транспорте Узбекистана с учетом развития электронной коммерции

**А. В. Новичихин[1], Д. Б. Бутунов[2], М. Б. Сабуров[2]**

[1]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
[2]Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан, Ташкент, Мирабалский район, ул. Темирйулчилар, 1

**Для цитирования:** *Новичихин А. В., Бутунов Д. Б., Сабуров М. Б.* Совершенствование грузобагажных перевозок на железнодорожном транспорте Узбекистана с учетом развития электронной коммерции // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 383–394. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-383-394

## Аннотация

**Цель:** Совершенствование грузобагажных перевозок на железнодорожном транспорте Узбекистана с учетом развития электронной коммерции. **Методы:** Применяются методы системного анализа и многокритериальной оптимизации. **Результаты:** Проанализированы работы электронной коммерции Узбекистана и пассажирского сообщения Узбекской железной дороги. Разработана математическая модель перевозки грузобагажа в пассажирских поездах при электронной коммерции. **Практическая значимость:** Организация перевозок товаров электронной коммерции в виде грузобагажа в пассажирских поездах существенно повысит объем перевозок багажа и грузобагажа Узбекской железной дороги и увеличит доходы убыточного пассажирского сообщения. Предложенная математическая модель обеспечивает повышение эффективности логистических решений по оптимизации курьерских и багажных отправок на Узбекской железной дороге, а также повышает эффективность использования подвижного состава.

**Ключевые слова:** Железнодорожный транспорт, грузобагаж, пригородное сообщение, пассажирский поезд, электронная коммерция.

## Введение

В мире железнодорожное пассажирское сообщение считается убыточным и нуждается в субсидировании, затраты компенсируются за счет грузовых перевозок или государства. Это характерно также и для Узбекской железной дороги.

К основным задачам пассажирской службы относятся: 1) перевозка пассажиров; 2) перевозка грузобагажа, багажа, почты и посылок.

На Узбекской железной дороге вышеперечисленные услуги осуществляются АО «Узжелдорпасс». Последние годы перевозка грузобагажа, багажа, почты и посылок практически не осуществляется в силу своей убыточности, при этом выполняется только первый вид услуги, который также не является рентабельным. Необходимо отметить, что у специализированных вагонов для перевозки грузобагажа в основном просрочен срок службы, в том числе и в этой связи объем перевозок грузобагажа существенно снижается (рис 1). Таким образом, объемы и оборот перевозки грузобагажа снижаются с 2020 по 2024 год в связи с перераспределением потоков этих грузов с железнодорожного на автомобильный транспорт. При этом темп развития электронной коммерции в Узбекистане имеет устойчивые тен-

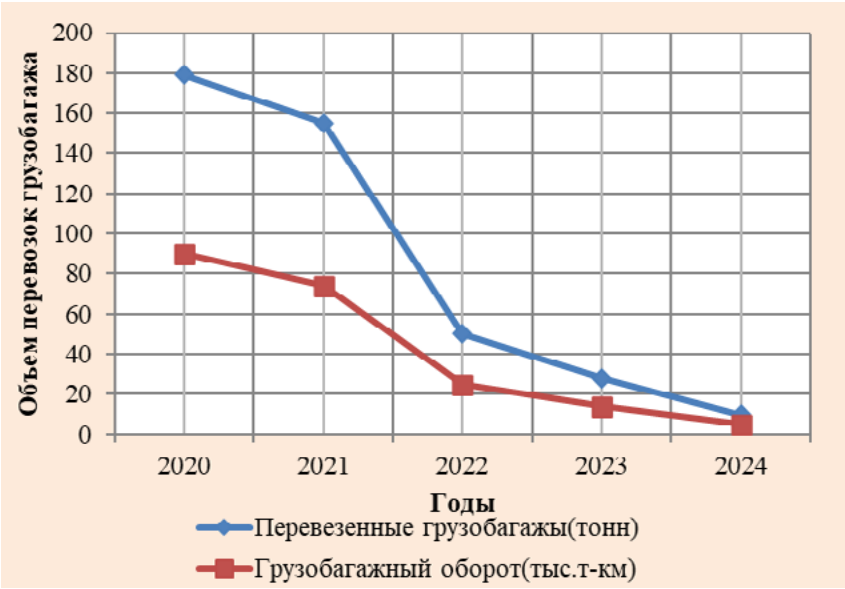



**Рис. 1.** Объем и оборот перевозки грузобагажа на Узбекской железной дороге

денции роста. В электронной коммерции товары доставляются маркетплейсами и курьерскими компаниями.

В последние годы население Узбекистана все чаще делает онлайн-заказы для следующих целей: оформления доставки посылок в офис, покупки продуктов в супермаркетах, покупки товаров на рынках и самовывоза из близлежащих пунктов выдачи. Кроме того, курьерские организации активно участвуют в электронной коммерции. Все это происходит благодаря развитию электронной коммерции в Узбекистане. В ходе этого процесса в страну приходят международные маркетплейсы и курьерские организации, а местные участники *e-commerce* расширяют свою деятельность и открывают новые направления. По данным национальных агентств, число электронных торговых площадок составляет более 50, сумма годового оборота — 300 млн долларов, а к 2027 году ожидается, что она достигнет 1 млрд долларов. На электронную коммерцию приходится 4 % от общего объема товарооборота. Учитывая темпы развития и потенциал участников электронной коммерции рынка, ожидается, что этот показатель будет расти на 10–15 % в год в течение следующих 5 лет [1].

В 2021 году общий объем e-commerce составлял $ 201 млн, а в 2023 — $ 543 млн. Дополнительно к этому в Узбекистане приняты меры по развитию электронной коммерции, так как 27 декабря 2024 года Кабинет министров Республики Узбекистан утвердил постановление «О мерах по дальнейшему развитию сферы электронной коммерции в Республике Узбекистан». Этот шаг является частью государственной стратегии по улучшению цифровых технологий и поддержке электронной торговли в стране. С 1 июля 2025 года вступят в силу новые требования для операторов электронной торговли [2].

В настоящее время в стране отсутствуют логистические, складские, маркетинговые и программные решения для организации поставок товаров электронной коммерции с участием пассажирского сообщения железнодорожного транспорта Узбекистана. Создание данной инфраструктуры, во-первых, послужит драйвером рынка электронной коммерции, а во-вторых, послужит катализатором его дальнейшего развития [1, 2].

Таким образом, привлечение пассажирского сообщения в цепи поставок товаров электронной коммерции считается актуальной логистической проблемой для Узбекистана.

## Обзор научно-исследовательских работ и постановка задачи

Вопросами совершенствования грузобагажных перевозок на железнодорожных пассажирских сообщениях на фоне развития электронной коммерции посвящены работы многих ученых [3–6 и др.]. Однако в большинстве научных работ рассмотрены вопросы по совершенствование пассажирских перевозок и не предложен механизм по привлечению пассажирского сообщения к перевозкам грузов электронной коммерции в виде грузобагажа.

Например, М. Ю. Савельевым [3] исследованы вопросы выбора оптимальных параметров системы освоения потоков пассажиров, багажа и грузобагажа на сети железных дорог. Рассмотрены существующие методы расчета плана формирования пассажирских и багажных поездов, определены возможности их совершенствования. Разработан комплексный подход к решению задачи выбора оптимальных параметров системы освоения потоков пассажиров, багажа и грузобагажа на сети железных дорог на основе математических моделей.

Дана оценка состояния рынка транспортно-грузовых услуг Узбекистана в работе З. Г. Мухамедовой и Г. Р. Ибрагимовой [4], также предложена дорожная карта преобразований по реорганизации транспортно-грузового комплекса.

Повышение конкурентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации рассмотрено в работе Т. Г. Сергеевой и Г. И. Никифоровой [5]. Авторами установлена необходимость использования логистического аутсорсинга, произведена разработка базы и дополнительных параметров взаимодействия участников перевозочного процесса, определен уровень конкуренции в сфере оперирования железнодорожным подвижным составом и доходный сектор рынка железнодорожных перевозок.

Развитие логистики электронной торговли от интернет-магазинов к маркетплейсам рассматривается в работе О. В. Дюковой [6]. В работе описаны факторы, под влиянием которых происходит переход от интернет-магазинов к маркетплейсам, рассмотрены основные объекты логистической инфраструктуры интернет-магазина и маркетплейса, выявлены отличия в их организации.

Анализ исследований, в которых рассматриваются вопросы логистики маркетплейсов, курьерских организаций и пассажирского сообщения железнодорожного транспорта, позволяет выявить недостаточное внимание их интеграции в соответствующих цепях поставок. В этой связи в настоящей работе поставлены следующие задачи:

1. Анализ рабочих процессов маркетплейсов и курьерских организаций Узбекистана.
2. Анализ характеристик железнодорожных вокзалов и показателей курсирования пассажирских поездов Узбекистана.
3. Разработка математической модели совершенствования грузобагажных перевозок.

## Анализ работы электронной коммерции и пассажирского сообщения Узбекистана

В ближайшем будущем ожидаются большие изменения в сфере электронной коммерции в Узбекистане, а именно внедрение современных технологий и создание гибких платформ для удовлетворения растущих потребностей пользователей.

Развивающаяся экономика Узбекистана и ее стремление внедрять новые технологии повышают привлекательность страны для выполнения цифровой коммерции. В ближайшее время в Узбекистане ожидается значительный рост спроса на услуги доставки. Все больше людей, особенно в крупных городах, обращаются к цифровым платформам, чтобы сэкономить время. Кроме того, клиенты стали предъявлять высокие требования к качеству обслуживания: прозрачности доставки, скорости выполнения заказов

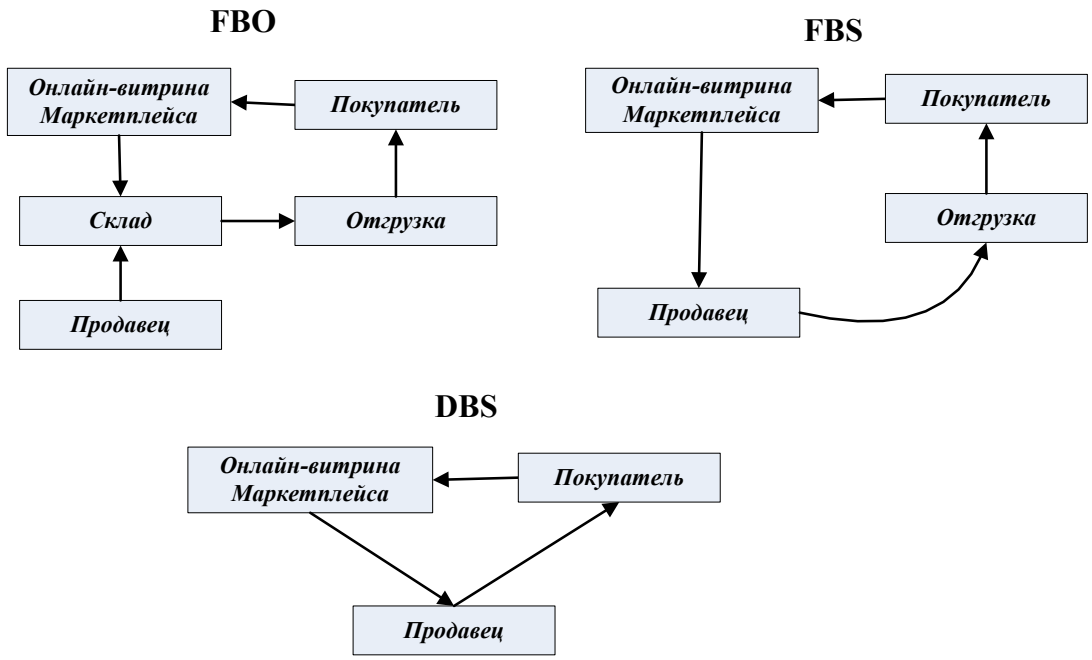
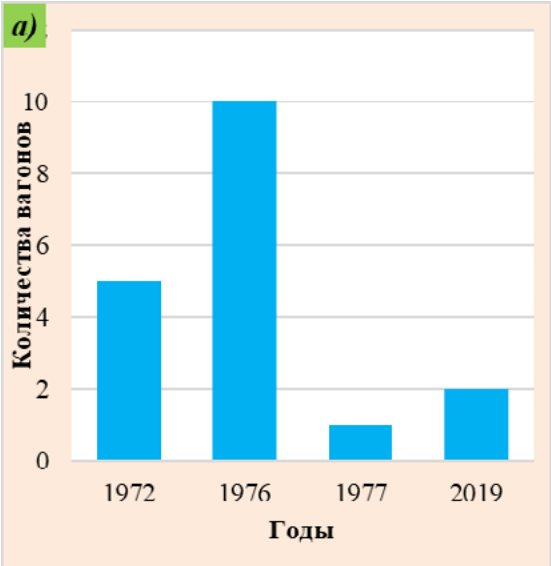



**Рис. 2.** Виды фулфилмента операций

и другие. Поэтому современные торговые площадки и курьерские компании расширяют партнерские отношения с местными поставщиками [1]. Известно, что организатором электронной коммерции являются маркетплейсы и курьерские организации на глобальном и локальном уровне. Маркетплейс — электронная торговая площадка, представляет собой оптимизированную онлайн-платформу по предоставлению продуктов и услуг. Один и тот же товар можно купить у нескольких продавцов, при этом цена на товар может различаться.

Торговые онлайн-площадки, а именно маркетплейсы, выступают в качестве информационных посредников на онлайн-рынках, предоставляя информацию о товарах и услугах онлайн-пользователям. В экономике сервис процесса доставки продукции от продавца до покупателя называется фулфилментом в электронной коммерции. Услуги фулфилмента особенно востребован интернет-магазинами и часто передается на аутсорсинг фулфилмент-центрам. При этом центры обработки онлайн-заказов оказывают услуги по хранению, формированию, упаковке и отправке товаров службам доставки на основании заказов, полученных из интернет-магазинов. Существуют две основные формы выполнения заказов на фулфилменте: FBS (Fulfillment by Seller) — продавец сам берет на себя ответственность за логистические услуги; FBO (Fulfillment by Operator) — в этом случае оператор электронной платформы берет на себя все услуги по доставке. При использовании FBS продавец передает упакованные товары маркетплейсу, который доставляет их покупателям. При FBO продавец заблаговременно отвозит товары на склад онлайн-площадки, а принимает заказы, упаковывает и доставляет покупки маркетплейс. Третья схема организации продаж через маркетплейсы и интернет-магазины — DBS (Delivery by Seller) — не предусматривает оказания услуг фулфилмента (рис. 2), потому что продавец сам доставляет товар покупателю напрямую, а продающая интернет-площадка работает как виртуальная витрина.

Следовательно, активное участие железнодорожного пассажирского сообщения обе-



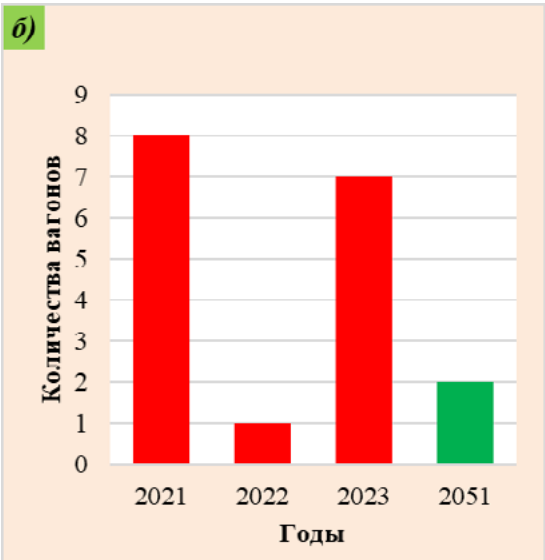




**Рис. 3.** Информация о парке багажных вагонов АО «Узжелдорпасс»:
*а* — по годам постройки;
*б* — по истечении срока службы

спечивает участникам электронной коммерции дополнительный перечень услуг при доставке товаров и дополнительный доход. Известно, что пассажирскими поездами товары доставляются точно по графику и их хранение осуществляется в багажных отделениях, а при отсутствии таких отделений товары можно хранить в выделенном отсеке вокзальных помещений. АО «Узжелдорпасс» осуществляет пассажирские и грузобагажные перевозки, при этом является владельцем подвижного состава. На рис. 3 представлены данные по багажным вагонам, принадлежащим АО «Узжелдорпасс».

Из рис. 4 видно, что приписной парк багажных вагонов общества составляет 18 единиц. Их годы постройки: 1972–1977 — 16 ед., 2019 — 2 ед., а срок службы закончился: в 2021 — 8 ед., 2022 — 1 ед., 2023 — 7 ед. [7]. Из этого можно сделать вывод, что в рабочем парке имеется 2 багажных вагона. Это говорит о том, что спрос на багажные вагоны в настоящее время высок на фоне развития электронной коммерции Узбекистана. Кроме багажных вагонов к пассажирским поездам можно прицеплять рефрижераторные вагоны и вагоны-термосы, так как их ходовые характеристики соответствуют пассажирским вагонам. Необходимо учитывать, что максимальная скорость изотермических вагонов составляет 120 км/час.

В современных условиях клиенты используют изотермические контейнеры из-за универсальности при организации мультимодальных перевозок и удобства при осуществлении грузовой работы. Для использования рефрижераторных секций требуются партии грузов более 200 т с учетом их рентабельности. В этой связи в настоящее время не используются эти секции для железнодорожных грузовых перевозок. Парк рефрижераторных вагонов состоит из 221 пятивагонной рефрижераторной секции. Эти рефрижераторные секции построены на заводе в г. Дессау (ГДР) в период с 1985 по 1987 г. Согласно положениям [8, 9], срок службы рефрижераторных вагонов составляет 25 лет, далее после проведения капитального восстановительного ремонта продлевается срок службы до половины гарантийного срока службы этих вагонов. К 2022–2024 годам срок службы вагонов этих рефрижераторных секций истечет, и они будут исключены из рабочего парка. Кроме этого, согласно протоколу Совета по железнодо-

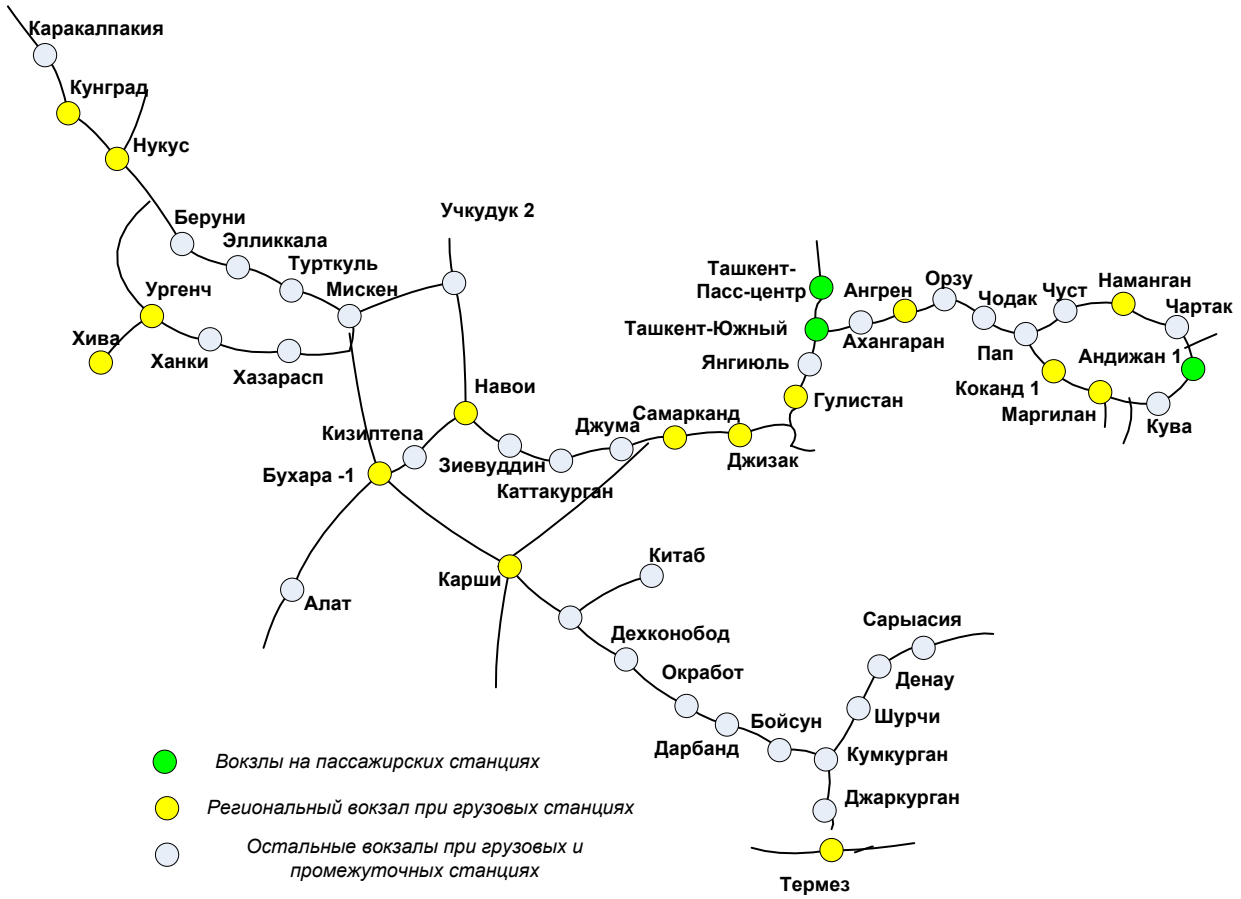



**Рис. 4.** Вокзалы Узбекской железной дороги

рожному транспорту государств — участников Содружества Независимых Государств, с 2015 года отменено курсирование вагонов с продленными сроками службы в международном сообщении. Эти рефрижераторные секции будут использоваться только в местном сообщении по разрешению председателя Узбекской железной дороги.

Далее необходимо провести анализ мест приема и выдачи товаров участникам электронной коммерции. Эти операции можно осуществлять на вокзалах. Например, большие вокзалы находятся на пассажирских станциях Ташкент-Центральный, Ташкент-Южный и Андижан-1. Необходимо отметить, что региональные большие вокзалы находятся на участковых станциях, а другие — на промежуточных станциях (рис. 4). На вокзалах Ташкент-Центральный и Ташкент-Южный отправляется и принимается более 90 % пассажирских поездов, при этом остальные местные поезда, курсирующие с востока и запада на юг и обратно (Андижан — Термез, Андижан — Ургенч и Андижан — Кунград) также проходят через вокзалы Ташкента. Таким образом, необходимо рассмотреть пассажирские поезда, курсирующие через Ташкент.

В настоящее время с Центрального и Южного железнодорожных вокзалов Ташкента организуются движения нескольких видов пассажирских поездов (табл. 1 и 2).

Из приведенной дотаблицы видно, что между областными центрами Республики Узбекистан осуществляется несколько рейсов пассажирских поездов в день. В частности, в среднем по 3 пассажирских поезда ежедневно курсируют в Самаркандскую, Бухарскую и Кашкадарьин-

Таблица 1. Пассажирские поезда, курсирующие на вокзале Ташкент-Центральный

| № | Виды сообщение | Маршрут поезда | Номер поезда | Количества рейсов |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Местные (пассажирский) | Ташкент — Андижан | 094Ф/095Ф | 1 рейс/нед. |
| 2 | | Ташкент — Андижан | 096Ф/097Ф | 1 рейс/нед. |
| 3 | | Ташкент — Андижан | 098Ф/099Ф | 1 рейс/нед. |
| 4 | | Ташкент — Андижан | 092Ф/093Ф | 1 рейс/нед. |
| 5 | Местные (Скоростной и высокоскоростной) | Ташкент — Андижан | 732Ф/733Ф | 4 рейса/нед. |
| 6 | | Ташкент — Андижан | 730Ф/731Ф | ежедневно |
| 7 | | Ташкент — Андижан | 734Ф/735Ф | 2 рейса/нед. |
| 8 | | Ташкент — Бухара | 778Ф/779Ф | 3 рейса/нед. |
| 9 | | Ташкент — Бухара | 768Ф/769Ф | ежедневно |
| 10 | | Ташкент — Бухара | 770Ф/771Ф | ежедневно |
| 11 | | Ташкент — Бухара | 710Ф/711Ф | ежедневно |
| 12 | | Ташкент — Бухара | 772Ф/773Ф | ежедневно |
| 13 | | Ташкент — Бухара | 712Ф/713Ф | ежедневно |
| 14 | | Ташкент — Карши | 716Ф/717Ф | ежедневно |
| 15 | | Ташкент — Карши | 764Ф/765Ф | ежедневно |
| 16 | | Ташкент — Китаб | 774Ф/775Ф | 1 рейс/нед. |
| 17 | | Ташкент — Самарканд | 766Ф/767Ф | ежедневно |
| 12 | Дальние | Ташкент — Душанбе | 3023/3033 | 1 рейс/нед. |
| 13 | | Ташкент — Новосибирск | 369Ф/370Ф | 1 рейс/нед. |
| 14 | | Ташкент — Алматы | 001Ь/002Ь | 3 рейса/нед. |
| 15 | | Ташкент — Москва | 305Ф/306Ф | 2 рейса/нед. |
| 16 | | Ташкент — Волгоград | 124Ф/125Ф | 2 рейса/нед. |
| 17 | Пригородный | Ташкент — Ходжикент (экспресс) | 6013/6014 | 3 рейса/нед. |

Таблица 2. Пассажирские поезда, курсирующие по вокзале Ташкент-Южный

| № | Виды сообщение | Маршрут поезда | Номер поезда | Количества рейсов |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Местные (пассажирский) | Хива — Андижан | 125Ф/126Ф | 4 рейса/нед. |
| 2 | | Ургенч — Андижан | 125Ч/126Ч | 3 рейса/нед. |
| 3 | | Кунград — Андижан | 128Ф/129Ф | 3 рейса/нед. |
| 4 | | Термез — Андижан | 130Ф/131Ф | 4 рейса/нед. |
| 5 | | Андижан — Хива | 126Ф/127Ф | 4 рейса/нед. |
| 6 | | Андижан — Ургенч | 126Ч/127Ч | 3 рейса/нед. |
| 7 | | Ташкент — Алат | 072Ф/073Ф | ежедневно |
| 8 | | Ташкент — Кунград | 054Ф/055Ф | ежедневно |
| 9 | | Ташкент — Сарыасия | 082Ф/083Ф | ежедневно |
| 10 | | Ташкент — Термез | 080Ф/081Ф | ежедневно |
| 11 | | Ташкент — Шават | 0583/0593 | 3 рейса/нед. |
| 12 | | Ташкент — Хива | 056Ф/057Ч | 4 рейса/нед. |
| 13 | | Ташкент — Хива | 076Ф/077Ф | 1 рейс/нед. |
| 14 | Пригородный | Ташкент — Сырдарья | 6001/6002 | ежедневно |
| 15 | | Ташкент — Гулистан | 6003/6004 | ежедневно |
| 16 | | Ташкент — Хаваст | 6005/6006 | 2 рейса/день |
| 17 | | Ташкент — Бекабад | 6009/6010 | ежедневно |
| 18 | | Ташкент — Ходжикент | 6011/6012 | 4 рейса/день |

скую области, где наблюдается наибольший пассажиропоток. В настоящее время на этих маршрутах осуществляются только пассажирские перевозки. Практически не ведется работа по перевозкам грузобагажа. Поэтому переоборудовать отставленные изотермические вагоны на багажные и организовать перевозки грузобагажа на этих вагонах является экономически целесообразным решением для Узбекистана.

## Математическая модель перевозки грузобагажа в пассажирских поездах при электронной коммерции

Рассмотрим перечень исходных данных для построения математической модели доставки грузобагажа с участием пассажирских поездов от заказчика до потребителя в электронной коммерции.

Модель дает возможность участникам электронной коммерции выбрать оптимальный вариант доставки товаров с участием железнодорожного пассажирского сообщения.

Приняты следующие переменные:

$A$ — общее количество отправителей (α) и получателей (β) грузобагажа, при этом $A = 1, 2, \dots n$;

$B$ — все железнодорожные вокзалы, участвующие в электронной коммерции, $B = 1, 2, \dots m$;

$D$ — множество пассажирских поездов, курсирующих на заданном полигоне, $D = 1, 2, \dots p$;

$\Delta t_{\alpha\beta}$ — суммы разниц времени между запланированным и фактическим при стыковках различных видов транспортов, получателей и отправителей;

$Q_l$ — общее количество грузобагажа, перевозимого пассажирскими поездами на $l$-м маршруте;

$Q_0$ — дополнительный объем грузобагажа при прицепке багажных вагонов к пассажирским поездам $l$-го маршрута;

$j$ — количество вагонов в составе поезда, при этом $j = 1, 2, \dots u$;

$q_{ul}$ — вместимости грузобагажа в $u$-м вагоне в составе $l$-го маршрута;

$C_{avto}, C_{jd}, C_{avia}, C_{dos}$ — части значений себестоимости автомобильных, железнодорожных, авиационных и курьерских услуг при доставке товаров;

$X_{\alpha\beta}$ — матрица количества товаров от отправителей до получателей.

Здесь

$$Q_l = \sum_{j=1}^{u} q_{l(j)}. \quad (1)$$

При организации перевозок грузобагажа необходимо учитывать его различные свойства и комплектование партий из грузов разных регионов. Поэтому в рассматриваемой задаче целесообразно учитывать следующие критерии.

**Затраты на перевозку грузобагажа** ($F_1(X)$). Расходы на доставку грузобагажа формируются в общей себестоимости продукции и оказывают существенное влияние на конечную цену продукции для потребителя. Поэтому повышение эффективности перевозки и снижение связанных с ней расходов способствуют уменьшению себестоимости продукции, что, в свою очередь, влияет на ее конкурентоспособность на рынке.

**Время** ($F_2(X)$). В условиях высокой конкуренции своевременность доставки продукции является одним из решающих факторов при выборе логистических компаний. Это побуждает логистические компании совершенствовать свои транспортные и сопутствующие им процессы. Поэтому предложен критерий отклонения от нормативного значения времени при стыковках различных видов транспортов, получателей и отправителей. Данный критерий является особенно значимым при перевозке продуктов питания и скоропортящихся грузов, в том числе в непрерывных холодильных цепях.

**Экология и сохранность грузобагажа** ($F_3(X)$). При техногенных изменениях в современном мире критерий экологичности играет значимую роль. Исходя из этого, математическое ожида-

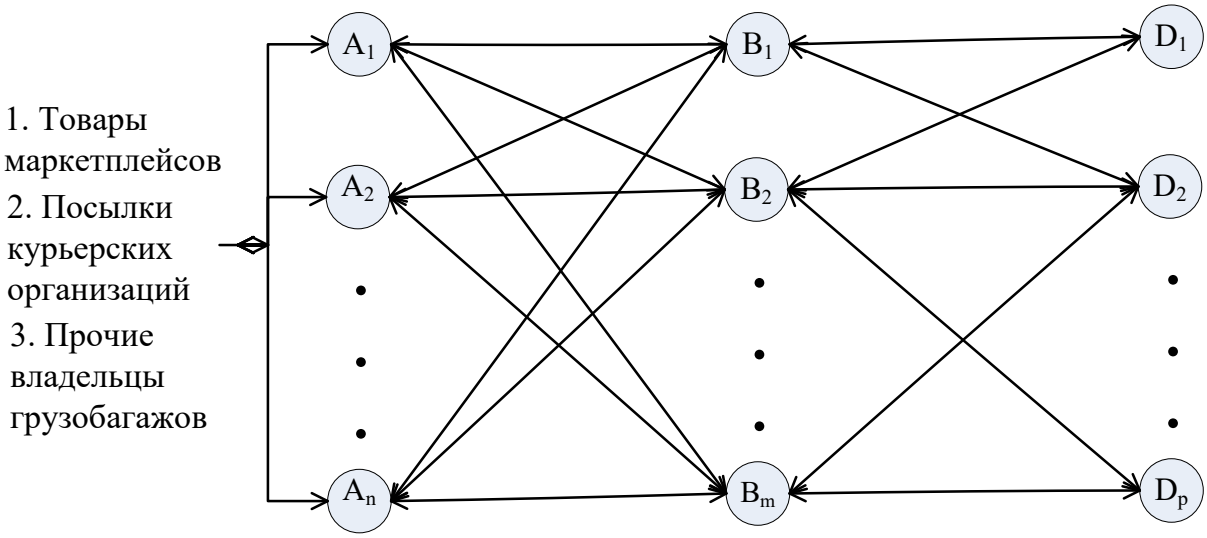



**Рис. 5.** Схематическое изображение взаимосвязей элементов математической модели

ние негативного экологического вреда должно стремиться к минимальному значению, при этом учитываются: $y_1$ — уровень вреда от выбросов в атмосферу; $y_2$ — уровень шума; $y_3$ — уровень вибрации; $y_4$ — другие негативные факторы экологических показателей. На сохранность перевозки влияют следующие факторы, такие как: качество покрытия дорог, аварии и несчастные случаи на железных или автодорогах и т. д.; $y_5$ — уровень качества доставленных грузов; $y_6$ — вероятности аварий и несчастных случаев; $y_7$ — другие факторы, влияющие на сохранность грузов. $M(x_i)$ — математическое ожидание *i*-го негативного вреда; $Z_i$ — убытки от *i*-го экологического вреда.

Для нахождения оптимальных решений предлагается использование метода скалярного ранжирования для многокритериальных задач, для чего все значения критериев учитываются в условных денежных единицах. При этом $w_1, w_2, w_3$ — соответствующие критериям весовые коэффициенты.

На рис. 5 представлены взаимосвязи элементов математической модели при организации перевозок грузобагажа в пассажирских поездах.

Таким образом, целевые функции перевозки грузобагажа в пассажирских поездах при электронной коммерции имеют следующий вид:

$$F_1(X) = \sum_{\alpha=1}^{a}\sum_{\beta=1}^{b}(C_{avto} + C_{jd} + C_{avia} + C_{dos})X_{\alpha\beta} \to \to \min; \quad (2)$$

$$F_2(X) = \sum_{\alpha=1}^{a}\sum_{\beta=1}^{b}\Delta t_{\alpha\beta} \to \min; \quad (3)$$

$$F_3(X) = \sum_{\alpha=1}^{a}\sum_{\beta=1}^{b}M(x_i)\,Z_i \to \min; \quad (4)$$

$$F(X) = w_1F_1(X) + w_2F_2(X) + w_3F_3(X) \to \to \min; \quad (5)$$

При следующих ограничениях:

$$\begin{cases} C_{avto}, C_{jd}, C_{avia}, C_{dos} \ge 0, \\ w_1 + w_2 + w_3 = 1, \\ 0 \le M(x_i) \le 1, \\ \sum_{\alpha=1}^{a}\sum_{\beta}^{b} X_{(jd)\alpha\beta} \le \sum_{D=1}^{k}(Q_l + Q_0)_D \\ X_{\alpha\beta} \ge 0, \Delta t_{\alpha\beta} \ge 0, \\ X_\alpha = \sum_{\beta=1}^{b} X_{\alpha\beta}, X_\beta = \sum_{\alpha=1}^{a} X_{\alpha\beta}. \\ A = \alpha + \beta \\ D \subset D \subset A \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, железнодорожное пассажирское сообщение может активно предлагать свои услуги по схемам FBO и FBS. Предложенная математическая модель обеспечивает повышение эффективности логистических решений по оптимизации курьерских и багажных отправок на Узбекской железной дороге, а также повышает эффективность использования подвижного состава.

## Заключение

Привлечение к услугам фулфилмента электронной коммерции пассажирских поездов и вокзалов является эффективным технологическим решением. Разработанная математическая модель способствует интеграции железнодорожного пассажирского сообщения в современные цепочки поставок и повышению его конкурентоспособности в условиях роста онлайн-трейд платформы в Узбекистане.

Предложенные в настоящей работе технологические решения обеспечивают следующие преимущества для Узбекской железной дороги:

– увеличение объема перевозок грузобагажа;

– снижение себестоимости перевозки мелких отправок в местных, экспортных и импортных сообщениях;

– создание благоприятных условий на рынке перевозок товаров маркетплейсов и курьерских компаний;

– возможности организации в фулфилмент-центрах кросс-докинг операций;

– предотвращение сокращений работников и увеличение заработных плат работников пассажирских служб Узбекской железной дороги.

## Список источников

1. Официальная статистика. — Итоги: как менялся рынок электронной коммерции и чего ожидать в 2025 году. — URL: https://www.spot.uz/ru/2024/12/31/e-com/ (дата обращения: 01.02.2025).

2. Официальная статистика. — В Узбекистане приняты меры по развитию электронной коммерции. — URL: https://www.uzdaily.uz/ru/v-uzbekistane-priniaty-mery-po-razvitiiu-elektronnoi-kommertsii/ (дата обращения: 02.02.2025).

3. Савельев М. Ю. Математическая модель расчета плана формирования почтово-багажных поездов / М. Ю. Савельев, Ю. О. Пазойский // Наука и техника транспорта. — 2012. — № 1. — С. 68–72.

4. Мухамедова З. Г. К вопросу формирования грузовой инфраструктуры Республики Узбекистан / З. Г. Мухамедова, Г. Р. Ибрагимова // Известия Транссиба. — 2022. — № 1(49). — С. 57–65.

5. Сергеева Т. Г. Повышение конкурентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации / Т. Г. Сергеева, Г. И. Никифорова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2020. — № 3(17). — С. 428–436.

6. Дюкова О. М. Эволюционное развитие логистики электронной торговли: от интернет-магазинов к маркетплейсам / О. М. Дюкова // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. — 2022. — № 1. — С. 111–116.

7. Сабуров М. Б. Метод и модели организация грузопотоков в условиях реформирования железнодорожного транспорта Республики Узбекистан: дисс. … канд. техн. наук / М. Б. Сабуров. — СПб.: ПГУПС, 2023. — 108 с.

8. Положение о продлении сроков службы грузовых и рефрижераторных вагонов государств — участников соглашений о совместном использовании грузовых и рефрижераторных вагонов в международном сообщении: принято заседанием Совета по железнодорожному транспорту стран СНГ и Балтии 2010 г.: по состоянию 2010 г. — М., 2010. — 16 с.

9. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении: принято заседанием Совета по железнодорожному транспорту стран СНГ и Балтии 2012 г.: по состоянию 2012 г. — М., 2012. — 28 с.

Дата поступления: 29.04.2025
Решение о публикации: 21.05.2025

**Контактная информация:**
НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, доц.; novitchihin@bk.ru
БУТУНОВ Дилмурод Баходирович — канд. техн. наук; dilmurodpgups@mail.ru
САБУРОВ Мардонбек Баходирович — канд. техн. наук; saburov.mardonbek83@mail.ru

# Improving the Transportation of Cargo and Baggage by Rail in Uzbekistan with Consideration for the Growth of e-Commerce

**A. V. Novichikhin[1], D. B. Butunov[2], M. B. Saburov[2]**

[1]Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
[2]Tashkent State Transport University, 1, Temiryulchilar Str., Mirabal District, Tashkent, Republic of Uzbekistan

**For citation:** Novichikhin A. V., Butunov D. B., Saburov M. B. Improving the Transportation of Cargo and Baggage by Rail in Uzbekistan with Consideration for the Growth of e-Commerce. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 383–394. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-383-394

## Summary

**Purpose:** Improving cargo and baggage transportation by rail in Uzbekistan is a key development in the context of the growth of e-commerce. **Methods**: Methods of system analysis and multi-criteria optimization were used. **Results:** An analysis of the e-commerce sector in Uzbekistan and passenger services operated by Uzbek Railways has been conducted. A mathematical model of cargo and baggage transportation in passenger trains in the context of e-commerce has been developed. **Practical significance:** The development of e-commerce cargo transportation as cargo and baggage in passenger trains will significantly enhance the volume of transportation of cargo and baggage on the Uzbek Railways and increase the income from unprofitable passenger traffic. The proposed mathematical model will ensure an increase in the efficiency of logistics solutions for optimizing courier and baggage shipments on the Uzbek Railways, and improve the efficiency of using rolling stock.
**Keywords:** Railway transport, cargo and baggage, suburban services, passenger train, e-commerce.

## References

1. *Ofitsial'naya statistika. Itogi: kak menyalsya rynok elektronnoy kommertsii i chego ozhidat' v 2025 godu* [Official statistics. Results: how the e-commerce market has changed and what to expect in 2025]. Available at: https://www.spot.uz/ru/2024/12/31/e-com/ (accessed: February 1, 2025). (In Russian)

2. *Ofitsial'naya statistika. V Uzbekistane prinyaty mery po razvitiyu elektronnoy kommertsii* [Official statistics. Measures have been taken in Uzbekistan to develop e-commerce]. Available at: https://www.uzdaily.uz/ru/v-uzbekistane-priniaty-mery-po-razvitiiu-elektronnoi-kommertsii/ (accessed: February 2, 2025). (In Russian)

3. Savel'ev M. Yu., Pazoyskiy Yu. O. Matematicheskaya model' rascheta plana formirovaniya pochtovo-bagazhnykh poezdov [Mathematical model for calculating the plan for the formation of postal and baggage trains]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport]. 2012, Iss. 1, pp. 68–72. (In Russian)

4. Mukhamedova Z. G., Ibragimova G. R. K voprosu formirovaniya gruzovoy infrastruktury Respubliki Uzbekistan [On the Formation of the Cargo Infrastructure of the Republic

of Uzbekistan]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletin of the Transsib]. 2022, Iss. 1(49), pp. 57–65. (In Russian)

5. Sergeeva T. G., Nikiforova G. I. Povyshenie konkurentosposobnosti transportno-logisticheskikh kompaniy v usloviyakh tsifrovizatsii [Increasing the Competitiveness of Transport and Logistics Companies in the Context of Digitalization]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2020, Iss. 3(17), pp. 428–436. (In Russian)

6. Dyukova O. M. Evolyutsionnoe razvitie logistiki elektronnoy torgovli: ot internet-magazinov k marketpleysam [Evolutionary Development of E-Commerce Logistics: From Online Stores to Marketplaces]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [Bulletin of the St. Petersburg State University of Economics]. 2022, Iss. 1, pp. 111–116. (In Russian)

7. Saburov M. B. *Metod i modeli organizatsiya gruzopotokov v usloviyakh reformirovaniya zheleznodorozhnogo transporta Respubliki Uzbekistan: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Method and models of organization of freight flows in the context of reforming the railway transport of the Republic of Uzbekistan: diss. ... Cand. Tech. Sciences]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2023, 108 p. (In Russian)

8. *Polozhenie o prodlenii srokov sluzhby gruzovykh i refrizheratornykh vagonov gosudarstv — uchastnikov soglasheniy o sovmestnom ispol'zovanii gruzovykh i refrizheratornykh vagonov v mezhdunarodnom soobshchenii: prinyato zasedaniem Soveta po zheleznodorozhnomu transportu stran SNG i Baltii 2010 g.: po sostoyaniyu 2010 g.* [Regulation on the extension of the service life of freight and refrigerated cars of the states - participants in agreements on the joint use of freight and refrigerated cars in international traffic: adopted by the meeting of the Council for Railway Transport of the CIS and Baltic countries in 2010: as of 2010]. Moscow, 2010, 16 p. (In Russian)

9. *Polozhenie o sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gruzovykh vagonov, dopushchennykh v obrashchenie na zheleznodorozhnye puti obshchego pol'zovaniya v mezhdunarodnom soobshchenii: prinyato zasedaniem Soveta po zheleznodorozhnomu transportu stran SNG i Baltii 2012 g.: po sostoyaniyu 2012 g.* [Regulation on the system of technical maintenance and repair of freight cars admitted to circulation on public railway tracks in international traffic: adopted by the meeting of the Council for Railway Transport of the CIS and Baltic countries in 2012: as of 2012]. Moscow, 2012, 28 p. (In Russian)

Received: April 29, 2025
Accepted: May 21, 2025

**Author's information:**
Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novitchihin@bk.ru
Dilmurod B. BUTUNOV — PhD in Engineering; dilmurodpgups@mail.ru
Mardonbek B. SABUROV — PhD in Engineering; saburov.mardonbek83@mail.ru

УДК 629.4.027.4:539.431.

# Оценка прочности главной рамы локомотива ТЭМ2 при воздействии статических и ударных нагрузок

**П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров, О. Бат–Эрдене**

Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

**Для цитирования:** *Григорьев П. С., Кодиров Н. С., Бат-Эрдене О.* Оценка прочности главной рамы локомотива ТЭМ2 при воздействии статических и ударных нагрузок // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 395–406. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-395-406

## Аннотация

**Цель:** В данной работе представлены анализ прочности и оценка ресурса главной рамы маневрового тепловоза ТЭМ2, выполненные в соответствии с нормативными требованиями. Исследование направлено на определение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции под действием статических и ударных нагрузок, а также на проверку соответствия регламентирующим документам, учитывая истекший срок службы данных локомотивов. **Методы:** Для достижения поставленной цели были решены задачи, включающие проведение конечно-элементного анализа, моделирование нагружения рамы с учетом развески и расположения масс оборудования, а также исследование состояния конструкции при расчетных режимах нагружения. Отдельно уделено внимание рассмотрению малоцикловой усталости и ее влиянию на долговечность главной рамы тепловоза ТЭМ2. **Результаты:** Позволили оценить текущее состояние несущей конструкции, выявить критические зоны и разработать рекомендации по продлению остаточного ресурса тепловоза. **Практическая значимость:** Выполненное исследование позволило определить напряженно-деформированное состояние главной рамы тепловоза ТЭМ2 в расчетных режимах нагружения. Это представляет значительный интерес для обеспечения безопасности и надежности подвижного состава, в частности маневровых локомотивов. Полученные данные согласуются с требованиями, и полученные результаты могут быть полезны для совершенствования требований к прочностным расчетам конструкций маневровых локомотивов, а также при определении расчетных нагрузок для оценки ресурса несущих конструкций.

**Ключевые слова:** Главная рама тепловоза, маневровый локомотив ТЭМ2, напряженно-деформированное состояние, оценка остаточного ресурса, малоцикловая усталость, прочность несущих конструкций, конечно-элементный анализ.

## Введение

В условиях активной эксплуатации маневровых тепловозов ТЭМ2 на железных дорогах Республики Узбекистан, где средний возраст парка превышает 30 лет, проблема старения несущих конструкций приобретает особую остроту [1]. Продолжительная эксплуатация несущих конструкций локомотивов, включая главную раму, кузов, шкворневые узлы и рамы тележек, вызывает постепенное ухудшение их механических характеристик из-за знакопеременных циклических нагрузок, которые провоцируют усталость материала на микроструктурном уровне. Эти нагрузки способствуют формированию локальных зон с последующим развитием трещин и снижением несущей способности. В итоге прочностные свойства конструкции деградируют, а ее ресурс эксплуатации уменьшается. Актуаль-

ность исследования обусловлена ролью главной рамы тепловоза ТЭМ2 как ключевого несущего элемента, определяющего безопасность и надежность эксплуатации. Несмотря на превышение нормативного срока службы локомотивов, прочностные характеристики рамы, подтвержденные критериями усталостной прочности, обосновывают целесообразность ее дальнейшего использования. В то же время как критический элемент несущей конструкции главная рама требует обязательной оценки прочности в соответствии с действующими локомотивными стандартами и нормативными документами [2, 3].

В работах [4, 5] акцентировано внимание на особенностях эксплуатации маневровых тепловозов, при которой главная рама подвергается значительным продольным нагрузкам — как статическим, так и динамическим, причем число их повторений относительно невелико. Интересно, что в процессе такого нагружения в отдельных участках главной рамы локомотива возникают напряжения, сравнимые или превышающие предел текучести стали, что вызывает локальные остаточные деформации, нарушающие геометрию несущих элементов. Это требует специальных подходов к оценке ресурса конструкции, учитывающих уровень напряжений и их влияние на накопление повреждений для обеспечения долговечности [6–9].

В условиях эксплуатационных воздействий расчет остаточного ресурса конструкции требует применения деформационных критериев малоцикловой усталости, основанных на анализе упрочняющих характеристик материала и их исчерпания при циклическом нагружении с высокой амплитудой деформаций. Для прогнозирования долговечности конструкции используется уравнение Мэнсона — Коффина, устанавливающее количественную связь между амплитудой пластической деформации и числом циклов до разрушения [10, 11]. Применение этой модели является весьма обоснованным при расчете напряженно-деформированного состояния несущих сварных конструкций локомотивных рам, в которых зоны концентрации напряжений испытывают значительные пластические деформации.

Согласно исследованиям Н. А. Махутова и Э. С. Оганьяна [4–6], малоцикловая усталость главной рамы тепловоза рассматривается как один из ключевых факторов, определяющих долговечность несущих элементов при действии переменных нагрузок. Малоцикловое разрушение, обусловленное образованием и развитием микротрещин, снижает прочностные характеристики материала, а расчет ресурса по критерию малоцикловой усталости определяет предельное число циклов нагружения, после которого возможны трещины или разрушение конструкции.

Корректная оценка технического состояния несущих конструкций локомотива, включая прогнозирование остаточного ресурса главной рамы и обеспечение безопасности эксплуатации за счет сохранения прочности шкворневых и сварных узлов, требует расчетно-экспериментальных подходов, использующих метод конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния в условиях реальных нагрузок. Этот метод эффективно моделирует деформации и распределение напряжений в сложных пространственных структурах.

В ходе настоящего исследования на основе метода конечных элементов была построена расчетная модель главной рамы тепловоза ТЭМ2. Основное внимание уделялось оценке прочностных характеристик и прогнозированию ее долговечности при воздействии нормативных продольных и вертикальных нагрузок, что особенно актуально для условий эксплуатации маневровых локомотивов.

Основной целью работы является анализ прочности и оценки остаточного ресурса главной рамы тепловоза ТЭМ2 при воздействии стати-

ческих и ударных нагрузках согласно соответствующим требованиям [2, 3]. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– выполнить моделирование главной рамы маневрового тепловоза ТЭМ2 с использованием методов численного анализа,

– задать нагружение модели согласно развеске, расположению масс установленного на раме оборудования и от действия продольных сил сжатия по осям автосцепок;

– выполнить анализ напряженно-деформированного состояния конструкции главной рамы тепловоза при расчетных режимах согласно [2, 3];

– выполнить оценку результатов расчета на соответствие требованиям [2, 3];

– оценит ресурс главной рамы тепловоза при малоцикловом нагружении.

## Материалы и методы

Объектом исследования является главная рама маневрового тепловоза ТЭМ2 (рис. 1), выполненная в виде сварной пространственной конструкции, обеспечивающей установку силового и вспомогательного оборудования, а также передачу тяговых и тормозных усилий через автосцепное устройство. Несущую основу конструкции формируют две продольные балки двутаврового сечения (хребтовые балки), усиленные дополнительными стальными накладками шириной 320 мм и толщиной 22 мм, приваренными к поясам.

Продольные балки объединяются поперечными связями, в частности коробчатыми сварными балками в областях крепления шкворней и опорно-возвращающих устройств, что увеличивает жесткость конструкции в горизонтальной плоскости. Концы продольных элементов жестко соединены литыми стяжными ящиками, что способствует повышению устойчивости рамы при действии продольных ударных нагрузок.

По боковым граням конструкции размещены обносные швеллеры, фиксируемые к хребтовым балкам посредством штампованных кронштейнов, что позволяет повысить ее изгибную прочность. Нагрузки от собственного веса рамы и установленных агрегатов передаются на две трехосные челюстные тележки через опорно-возвращающие устройства, моделирующие условия работы второго уровня рессорного подвешивания.

В соответствии с требованиями нормативного документа [3] прочность несущих элементов экипажной части тепловоза ТЭМ2 оценивают по допускаемым напряжениям по отношению к пределу текучести материала $\sigma_{0,2}$ по формуле:

$$\sigma_{верт} + \sigma_{уд} \le 0,9\sigma_{0,2}, \quad (1)$$

где $\sigma_{верт}$ — напряжения от вертикальной нагрузки на главную раму (собственный вес конструкции + вес оборудования);

$\sigma_{уд}$ — напряжения от действия удара силой 2500 кН.

Нагружение модели главной рамы тепловоза массами узлов и агрегатов выполнено на основе монтажной схемы расположения оборудования (рис. 2) и упрощенной ведомости развески обору-

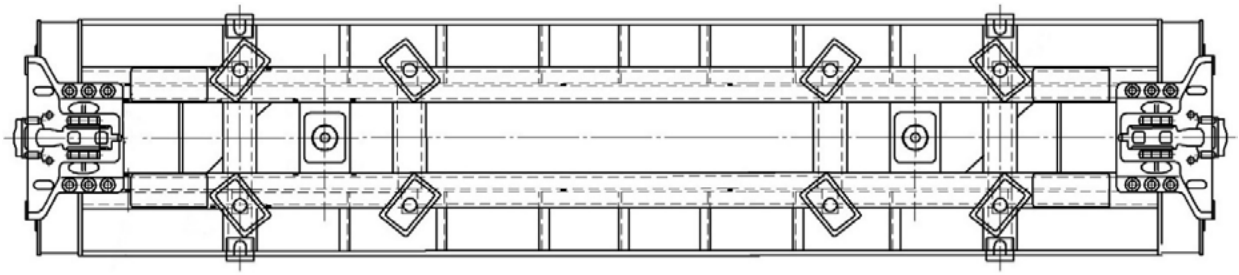


**Рис. 1.** Главная рама тепловоза ТЭМ2 вид снизу

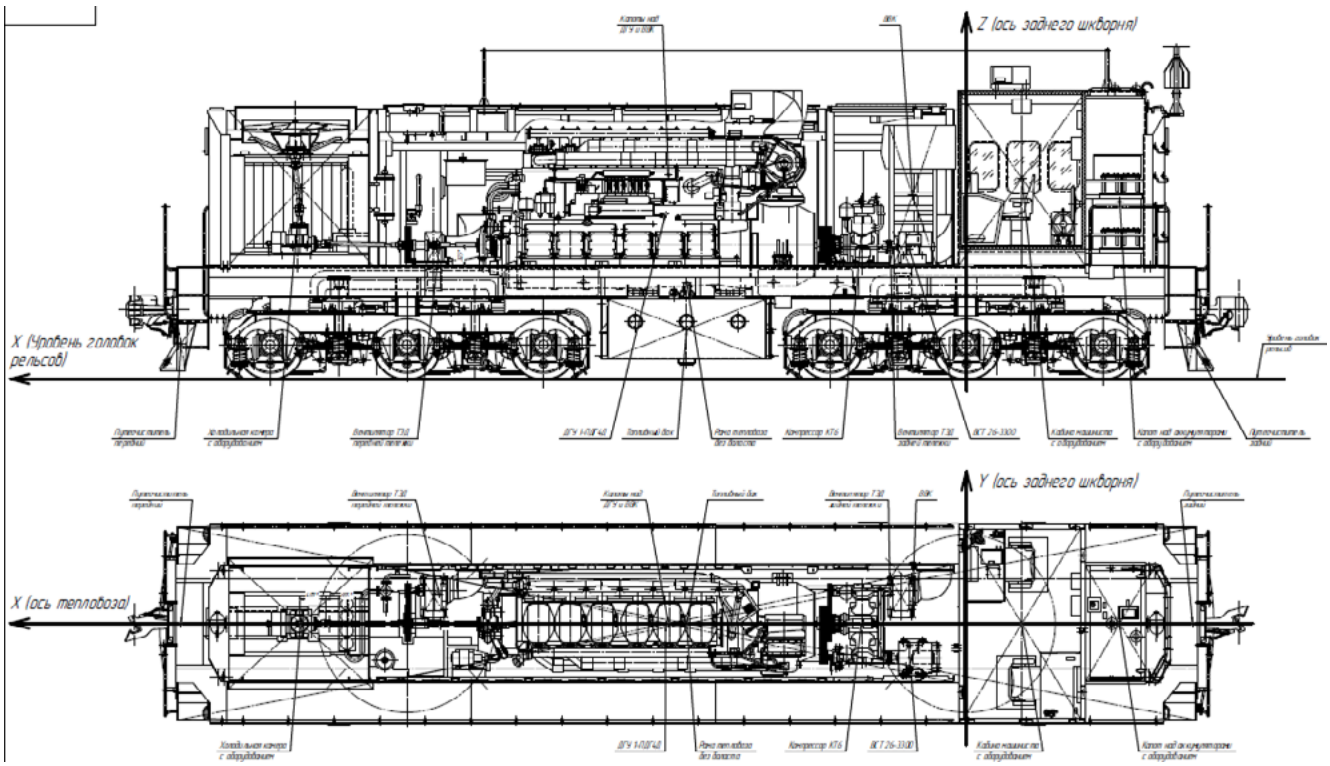



**Рис. 2.** Монтажная схема расположения оборудования тепловоза ТЭМ2

дования тепловоза ТЭМ2 согласно табл. 1. Массы и расположения узлов оборудования рамы приведены в табл. 1. С учетом приложенного веса оборудования (табл. 1) и собственной массы модели рамы расчетная масса рамы с оборудованием составила 75 000 кг.

На рис. 3 представлена конечно-элементная модель главной рамы тепловоза ТЭМ2. При дискретизации конструкции было сформировано 875 093 конечных элемента, соединенных через 408 249 узловых точек, что обеспечило высокую детализацию расчетной схемы.

При построении расчетной модели использовались специальные вспомогательные элементы: их задача заключалась в локальном распределении граничных условий, включая моделирование закреплений и имитацию характеристик рессорного подвешивания. Отметим, что применение таких элементов позволило учесть особенности передачи нагрузок между рамой и опорными узлами тележек без введения лишних жестких связей, что повышает достоверность моделирования. Впрочем, дополнительные корректировки сетки в зонах концентрации напряжений также учитывались при подготовке расчетной схемы.

На модель рамы накладывались следующие закрепления:

– по продольной оси $Z$ — в одном узле на оси автосцепки (сжатие, растяжение) или в заднем упоре (при ударе);

– по вертикальной оси $Y$ — в нижнем конце балочных элементов, имитирующих рессорное подвешивание второй ступени, при этом узлы конечно-элементной модели рамы тепловоза в зонах опор на тележку соединялись с помощью элементов с верхним концом балочных элементов (рис. 4).

Продольные силы инерции, действующие на отдельные массы тепловоза при ударе силой 2,5 МН, определялись через продольное ускорение $a_x$ вдоль оси $Z$ полностью оборудованного и экипированного тепловоза. При этом в соот-

Таблица 1. Масса установленного оборудования и координаты их центра масс

| Узел оборудования | Масса, т | Координаты центра тяжести узла, м | | |
|---|---|---|---|---|
| | | по оси $X$ | по оси $Y$ | по оси $Z$ |
| Дизель-генераторная группа | 23,310 | 4,625 | –0,026 | –2,534 |
| Кабина машиниста с оборудованием | 3,212 | –0,852 | 0,0 | 3,081 |
| Капот над аккумуляторами с оборудованием | 2,226 | –2,352 | 0,0 | 2,725 |
| Топливной бак | 1,495 | 4,300 | 0,0 | 1,674 |
| Компрессор КТ 6 | 0,614 | 1,611 | 0,0 | 2,192 |
| Вентилятор задней тележки | 0,097 | 1,170 | 0,460 | 2,005 |
| Вентилятор передней тележки | 0,097 | 8,100 | 0,460 | 2,005 |
| Путеочиститель задний | 0,198 | –3,473 | 0,0 | 0,545 |
| Путеочиститель передний | 0,198 | 12,073 | 0,0 | 0,545 |
| Оборудованная холодильная камера | 3,660 | 10,231 | 0,0 | 2,937 |
| Капоты над ДГУ и ВВК | 3,134 | 4,581 | 0,0 | 3,135 |
| ВВК | 0,830 | Распределенная нагрузка | | |
| Поручни, трубопровод, провода и прочие оборудование | 9,933 | | | |
| Запас песка | 2,000 | — | — | — |
| Запас топлива | 5,400 | — | — | — |
| Рама тепловоза без балласта | 22,708 | 4,300 | 0,0 | — |
| Учтенная надтележечная масса, т | Σ = 75,00 | | | |
| Материал несущих элементов рамы тепловоза | Сталь 3сп, $\sigma_т$ = 245 МПа | | | |

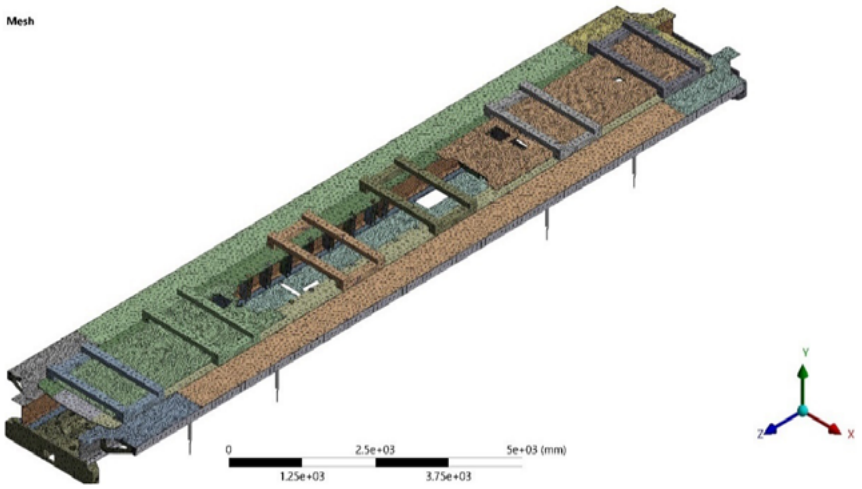



**Рис. 3.** Конечно-элементная сетка главной рамы тепловоза ТЭМ2

ветствии с [3] для тележек продольное ускорение принято равным 3g и приложена к шкворневым элементам главной рамы (рис. 5). Продольная сила инерции тележки составила:

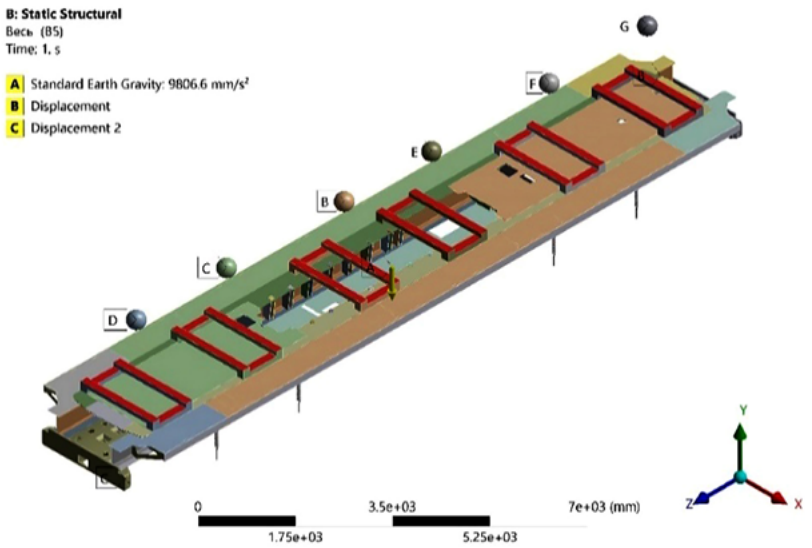
$$N_{и\_тел} = m_{тел} 3g. \quad (2)$$

Ускорение $\alpha_x$ вычислялось по формуле:

$$\alpha_x = \frac{F_N - i_{тел} m_{тел} 3g}{m_{\tilde{n}} - i_{тел} m_{тел}}. \quad (3)$$

В опорах рамы тепловоза на тележки от действия продольной силы инерции полностью обору-

*а*




*б*

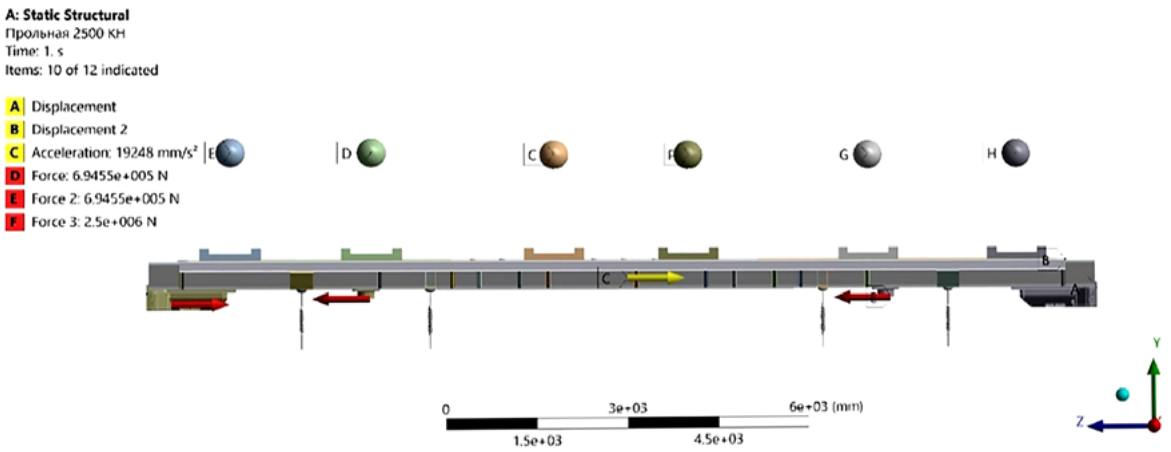



**Рис. 4.** Схема нагружения главной рамы тепловоза группированными силами веса размещенного на нем оборудования: *а* — вид сверху; *б* — вид с боковой стороны

Таблица 2. Принятые обозначения и полученные результаты

| Обозначение | Наименование | Значение |
|---|---|---|
| $m_{тел}$ | масса тележки, т | 23,6 |
| $F_N$ | продольная сила удара, приложенная к автосцепке, МН | 2,5 |
| $i_{тел}$ | число тележек в одной секции тепловоза | 2 |
| $m_c$ | служебная масса одной секции тепловоза, т | 120 |
| $N_{и\_тел}$ | продольная сила инерции тележки, МН | 0,695 |
| $\alpha_x$ | продольное ускорение, мм/с$^2$ | 19248 |

дованного и экипированного тепловоза определены в модели автоматически как реакции в элементах, имитирующих рессорное подвешивание.

## Результаты

По результатам численного моделирования установлено, что в конструкции главной рамы тепловоза ТЭМ2, при воздействии нормативных продольных и вертикальных нагрузок [2, 3], уровни напряжений в отдельных зонах превышают допустимое значение $0{,}9\sigma_{0,2}$ (221 МПа). Интересно, что в концевых частях рамы, осо-

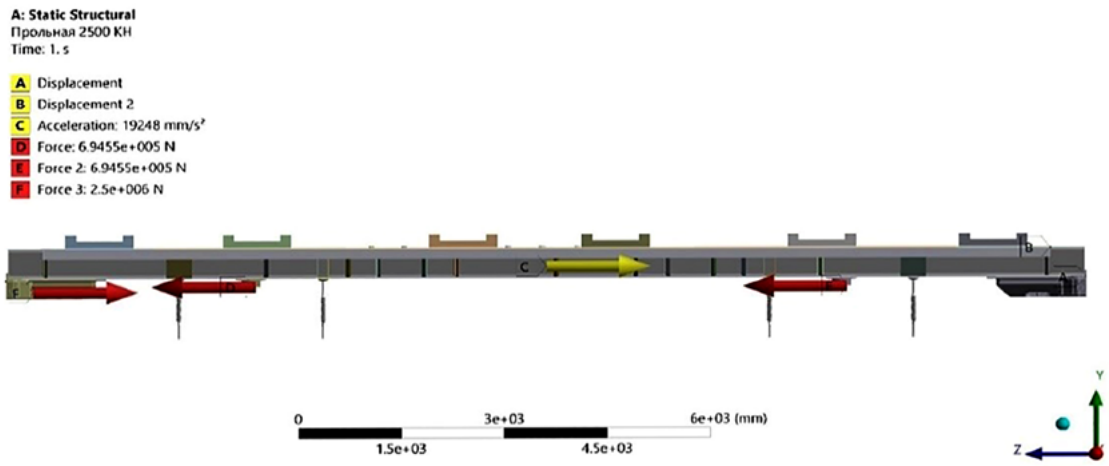
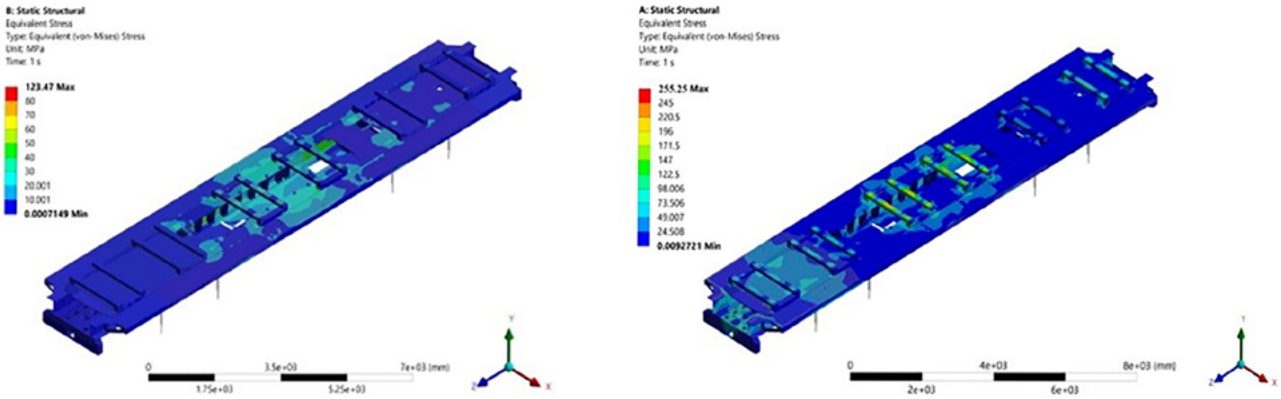



**Рис. 5.** Схема приложенных сил в продольном направлении главной рамы тепловоза ТЭМ2




*а* *б*

**Рис. 6.** Эпюры распределений напряжений в главной раме ТЭМ2 при режимах нагружения Iа (*а*) и Iб (*б*)

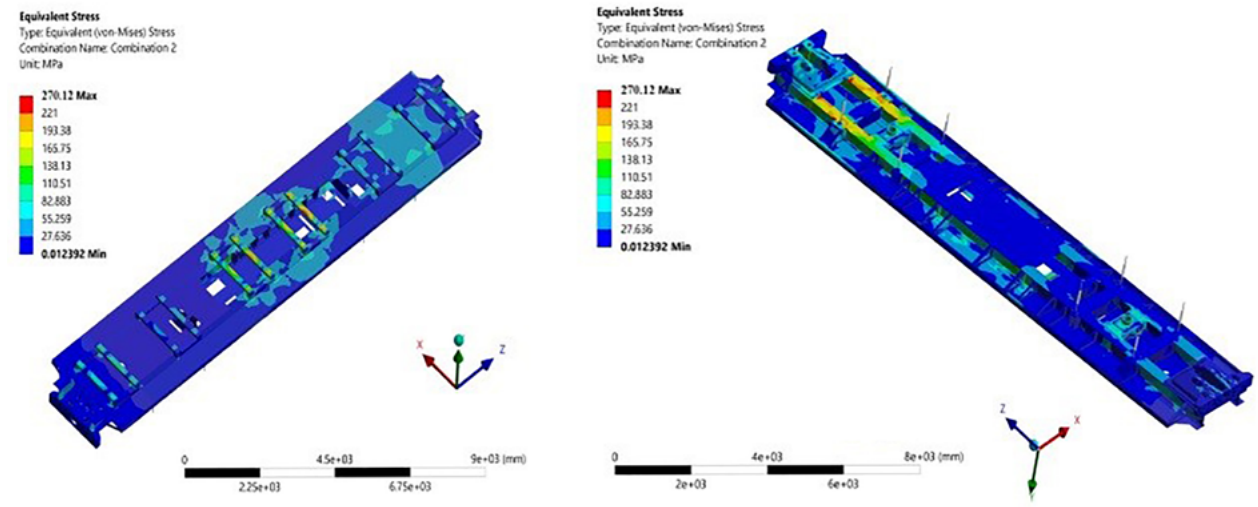



**Рис. 7.** Картина напряжений в главной раме тепловоза ТЭМ2 при совмещенном действии веса конструкции и продольного удара (2,5 МН), вид сверху и снизу

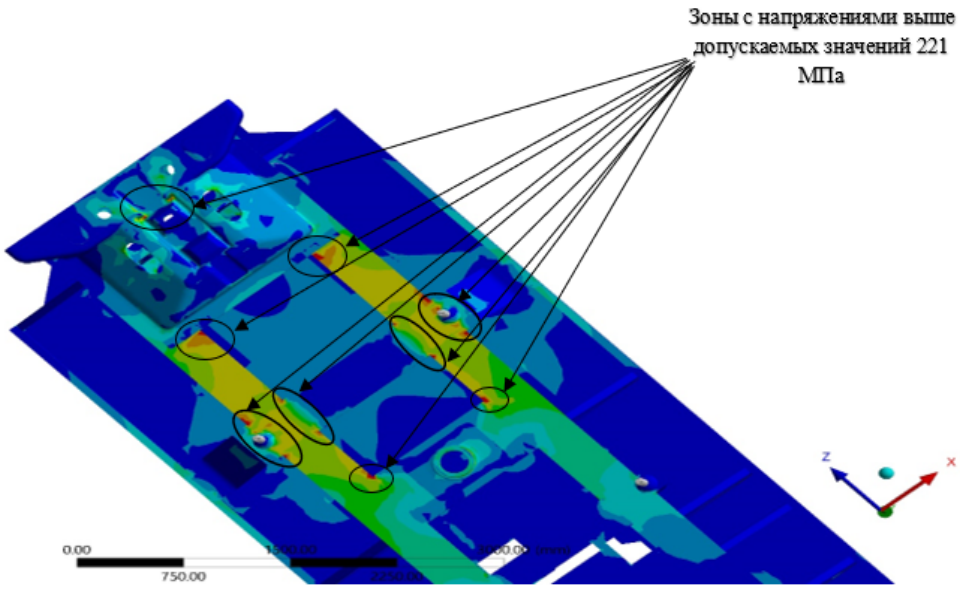



**Рис. 8.** Области локального превышения допускаемых напряжений в нижней части главной рамы

бенно в областях сварных соединений между стяжными ящиками и хребтовыми балками, напряжения достигают уровня предела текучести материала, сопровождаясь локальными пластическими деформациями.

Расчет остаточного ресурса главной рамы тепловоза проводился с учетом возможности возникновения остаточных деформаций под воздействием эксплуатационных нагрузок: вертикальных усилий от массы оборудования, а также продольных ударов в автосцепку с силой до 2,5 МН. Впрочем, для корректной оценки ресурса применен деформационный критерий малоцикловой усталости, обоснованный в трудах Э. С. Оганьяна, Н. А. Махутова и А.С. Гасюка [4–7]. Данный критерий учитывает процесс накопления пластических повреждений в материале при ограниченном числе циклов нагружения и описывается уравнением Мэнсона — Коффина. Ниже приведенное уравнение характеризует исчерпание пластических свойств материала (табл. 3) при достижении разрушающего числа циклов нагружения Nε:

$$\Delta\varepsilon_p = C \cdot N_\varepsilon^{-m_p}. \quad (4)$$

Таблица 3. Принятые обозначения и полученные результаты в расчетах

| Обозначение | Наименование | Принятое значение и результаты |
|---|---|---|
| $\Delta_\varepsilon p$ | размах или односторонняя пластическая относительная пластическая деформация в цикле нагружения заданной силой | 0,0022 |
| $m_p$ | эмпирические параметры материала | 0,6 |
| $C$ | показатель диаграммы упрочнения за пределом упругости материала | определяется по $C = -0,5\ln(1-\psi)$ $C = 0,3465$ |
| $\psi$ | относительное сужение материала при растяжении | для стали $\psi = 0,5$ |
| $N_Э$ | среднегодовое количество/ циклов сжимающих продольных сил | 50 |
| $P$ | нормативные силы | 2,5 МН |
| $T$ | ресурс главной рамы тепловоза типа ТЭМ2 по малоцикловой усталости | ≈ 66 лет |

На основании данных [3] и анализа эксплуатационных измерений [5] установлено, что продольные усилия величиной 2,5 МН имеют преимущественно сжимающий характер. Их среднегодовое количество (NЭ) составляет около 50 циклов, что

подтверждается испытаниями, проведенными в АО «ВНИКТИ» [12].

Подставляя эти значения в уравнение Мэнсона — Коффина, получено разрушающее число циклов нагружения главной рамы, равное приблизительно 4600 циклам.

Кроме того, расчеты [12] показывают, что запас прочности по номинальным напряжениям составляет около 1,22 относительно предела текучести материала. Соответственно, запас по долговечности ($n_N$), определенный по зависимости $n_n = f(n_т)$ [13], равен 1,4. Отметим, что, исходя из этих данных, прогнозируемый ресурс главной рамы тепловоза ТЭМ2 по критерию малоцикловой усталости при эксплуатации под действием продольных сил через автосцепку составляет примерно 66 лет и определяется по формуле:

$$T = \frac{N_\varepsilon}{N_э \, n_N}. \quad (5)$$

## Выводы и обсуждение

В рамках настоящего исследования был выполнен анализ напряженно-деформированного состояния главной рамы тепловоза ТЭМ2 с целью оценки ее прочностных характеристик и ресурса в условиях расчетных режимов нагружения. Для этого были применены методы конечно-элементного моделирования и расчетные зависимости. Предложенный подход к оценке остаточного ресурса применим не только к локомотивам с истекшим сроком службы, но и для обоснования продолжения эксплуатации уже используемых локомотивов. Результаты проведенного анализа позволяют сформулировать следующие ключевые выводы:

1. Расчеты выявили локальные зоны превышения допускаемых напряжений (221 МПа) в местах концентрации, таких как соединения стяжных ящиков с хребтовыми балками и технологические отверстия. Эти напряжения обусловлены кратковременными продольными ударными нагрузками через автосцепку (режим Iб) с частотой не более 50 циклов в год. Остаточный ресурс главной рамы оценен по деформационному критерию малоцикловой усталости, учитывающему ограниченное число циклов и допустимость локальных пластических деформаций.

2. По критерию малоцикловой усталости, с учетом максимальных напряжений от продольных сил через автосцепку, ресурс главной рамы тепловоза ТЭМ2 составляет 66 лет.

3. Перспективным направлением дальнейших исследований является совершенствование методов неразрушающего контроля для раннего обнаружения дефектов в зонах концентрации напряжений, а также учет эксплуатационных факторов, включая динамические нагрузки от путевых неровностей, температурные и климатические воздействия, на ресурс несущих конструкций.

## Список источников

1. Хамидов О. Р. Прогнозирование остаточного ресурса главной рамы и продление сроков службы маневровых локомотивов на АО «УТЙ» / О. Р. Хамидов, А. М. У. Юсуфов, Н. С. Кодиров и др. // Universum: технические науки. — 2022. — № 4-5(97). — С. 47–54. — DOI: 10.32743/UniTech.2022.97.4.13384.

2. ГОСТ 34939—2023. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. — Введен в действие с 01.08.2024. — М.: Стандартинформ, 2023. — 45 с.

3. Нормы для расчета прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог колеи 1520 мм. — М.: ВНИИЖТ, 1998. — 145 с.

4. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н. А. Махутов. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.

5. Оганьян Э. С. Критерии несущей способности конструкций локомотивов в экстремальных условиях нагружения: дисс. … д-ра техн. наук / Э. С. Оганьян. — Коломна, 2004. — 389 с.

6. Махутов Н. А. Методы расчета на прочность и долговечность элементов конструкций подвижного состава / Н. А. Махутов, Э. С. Оганьян. — М.: Наука, 2021.

7. Гасюк А. С. Оценка и прогнозирование технического состояния локомотивов по ресурсу их несущих конструкций: дисс. … канд. техн. наук / А. С. Гасюк. — М., 2022. — 162 с.

8. Оганьян Э. С. Расчетно-экспериментальная оценка ресурса базовых частей локомотивов для обеспечения их безопасной эксплуатации / Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов, А. С. Гасюк, Д. М. Фазлиахметов // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2018. — № 2. — С. 39–43.

9. Оганьян Э. С. Безопасная эксплуатация локомотивов по ресурсу их базовых частей / Э. С. Оганьян, А. С. Гасюк, Г. М. Волохов и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 6. — С. 54–58. — DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58.

10. Manson S. S. Fatigue: A Complex Subject — Some Simple Approximations / S. S. Manson, L. F. Coffin // Experimental Mechanics. — 1965.

11. Волохов Г. М. Модернизация маневровых тепловозов с продлением срока службы / Г. М. Волохов, Э. С. Оганьян, Г. И. Гаджиметов и др. // Локомотив. — 2019. — № 4(748). — С. 32–34.

12. Тепловоз ТЭМ2. Модернизация с продлением срока службы. Расчет на прочность главной рамы. Отчет № И 15-24-16. — Коломна: ВНИКТИ, 2016.

13. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. — В 2 частях. Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности / Н. А. Махутов. — Новосибирск: Наука, 2005. — 610 с.

Дата поступления: 22.04.2025
Решение о публикации: 15.05.2025

**Контактная информация:**
ГРИГОРЬЕВ Павел Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; grigorev.p@gmail.com
КОДИРОВ Нозимжон Солиевич — аспирант; nazimzhank@bk.ru
БАТ-ЭРДЭНЭ Отгон-Эрдэнэ — аспирант; nazimzhank@bk.ru

## Strength Assessment of the TEM–2 Locomotive Main Frame Exposed to Static and Impact Loads

**P. S. Grigorev, N. S. Kodirov, O. Bat–Erdene**

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation

**For citation:** Grigorev P. S., Kodirov N. S., Bat-Erdene O. Strength Assessment of the TEM-2 Locomotive Main Frame Exposed to Static and Impact Loads. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 395–406. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-395-406

### Summary

**Purpose:** This paper presents an analysis of the strength and service life of the main frame of the TEM-2 shunting locomotive carried out in accordance with regulatory requirements. The research is aimed at determining the stress-strain state (SSS) of the structure exposed to static and impact loads, as well as at checking compliance with regulatory documents, taking into account the expired service life of these locomotives. **Methods:** In order to achieve the above-stated objectives, a number of tasks were carried out. These included finite element analysis, modelling of the frame loading considering the weight distribution and onboard equipment layout, and evaluation of the structural response under specific loading conditions. Special attention was given to the phenomenon of low-cycle fatigue and its impact on the durability of the TEM-2 main frame. **Results:** The findings have enabled an assessment of the current technical condition of the main load-bearing structure,

identification of critical areas, and the development of recommendations for extending the remaining service life of the locomotive. **Practical significance:** The study provides a detailed evaluation of the stress–strain behaviour of the TEM-2 locomotive main frame under design load conditions. This information is of significant interest for enhancing the safety and reliability of shunting locomotives. The results obtained are in line with current regulatory requirements and can form the basis for improving the standards for structural strength calculations and determining design loads for durability assessment of load-bearing elements.

**Keywords:** Locomotive main frame, TEM-2 shunting locomotive, stress–strain state, residual life assessment, low-cycle fatigue, load-bearing structure strength, finite element analysis.

## References

1. Khamidov O. R., Yusufov A. M., Kodirov N. S. et al. Prognozirovanie ostatochnogo resursa glavnoy ramy i prodlenie srokov sluzhby manevrovykh lokomotivov na AO “UTY” [Forecasting the residual life of the main frame and extending the service life of shunting locomotives at UTY JSC]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences]. 2022, Iss. 4-5(97), pp. 47–54. DOI: 10.32743/UniTech.2022.97.4.13384. (In Russian)

2. *GOST 34939—2023. Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam. Vveden v deystvie s 01.08.2024* [GOST 34939—2023. Locomotives. Requirements for strength and dynamic qualities. Put into effect on 01.08.2024]. Moscow: Standartinform Publ., 2023, 45 p. (In Russian)

3. *Normy dlya rascheta prochnosti nesushchikh elementov, dinamicheskikh kachestv i vozdeystviya na put’ ekipazhnoy chasti lokomotivov zheleznykh dorog kolei 1520 mm* [Standards for calculating the strength of load-bearing elements, dynamic qualities and the impact on the track of the undercarriage of locomotives of 1520 mm gauge railways]. Moscow: VNIIZhT Publ., 1998, 145 p. (In Russian)

4. Makhutov N. A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktsiy na prochnost’* [Deformation criteria for failure and strength calculation of structural elements]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981, 272 p. (In Russian)

5. Ogan’yan E. S. *Kriterii nesushchey sposobnosti konstruktsiy lokomotivov v ekstremal’nykh usloviyakh nagruzheniya: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Criteria for the bearing capacity of locomotive structures under extreme loading conditions: diss. ... Doctor of Engineering Sciences]. Kolomna, 2004, 389 p. (In Russian)

6. Makhutov N. A., Ogan’yan E. S. *Metody rascheta na prochnost’ i dolgovechnost’ elementov konstruktsiy podvizhnogo sostava* [Methods for calculating the strength and durability of rolling stock structural elements]. Moscow: Nauka Publ., 2021. (In Russian)

7. Gasyuk A. S. *Otsenka i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po resursu ikh nesushchikh konstruktsiy: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Assessment and forecasting of the technical condition of locomotives based on the resource of their supporting structures: diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. Moscow, 2022, 162 p. (In Russian)

8. Ogan’yan E. S., Volokhov G. M., Gasyuk A. S., Fazliakhmetov D. M. Raschetno-eksperimental’naya otsenka resursa bazovykh chastey lokomotivov dlya obespecheniya ikh bezopasnoy ekspluatatsii [Calculation and experimental assessment of the resource of basic parts of locomotives to ensure their safe operation]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. 2018, Iss. 2, pp. 39–43. (In Russian)

9. Ogan’yan E. S., Gasyuk A. S., Volokhov G. M. et al. Bezopasnaya ekspluatatsiya lokomotivov po resursu ikh bazovykh chastey [Safe operation of locomotives based on the service life of their base components]. *Bezopasnost’ truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry]. 2017, Iss. 6, pp. 54–58. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58. (In Russian)

10. Manson S. S., Coffin L. F. Fatigue: A Complex Subject — Some Simple Approximations. Experimental Mechanics, 1965.

11. Volokhov G. M., Ogan'yan E. S., Gadzhimetov G. I. et al. Modernizatsiya manevrovykh teplovozov s prodleniem sroka sluzhby [Modernization of shunting diesel locomotives with service life extension]. *Lokomotiv* [Lokomotiv]. 2019, Iss. 4(748), pp. 32–34. (In Russian)

12. *Teplovoz TEM2. Modernizatsiya s prodleniem sroka sluzhby. Raschet na prochnost' glavnoy ramy. Otchet № I 15-24-16* [Diesel locomotive TEM2. Modernization with service life extension. Strength calculation of the main frame. Report № I 15-24-16]. Kolomna: VNIKTI Publ., 2016. (In Russian)

13. Makhutov N. A. *Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'. V 2 chastyakh. Chast' 2: Obosnovanie resursa i bezopasnosti* [Structural strength, resource and technogenic safety. In 2 parts. Part 2: Justification of resource and safety]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2005, 610 p. (In Russian)

Received: April 22, 2025
Accepted: May 15, 2025

**Author's information:**
Pavel S. GRIGOREV — PhD in Engineering, Associate Professor; grigorev.p@gmail.com
Nozimzhon S. KODIROV— Postgraduate Student; nazimzhank@bk.ru
Otgon-Erdene BAT-ERDENE — Postgraduate Student; nazimzhank@bk.ru

УДК 656.256.3 + 656.259.2 + 629.488.2

# Анализ особенностей организации технического обслуживания автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене

**А. И. Швойн, В. С. Кузьмин, Н. О. Жухин**

Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

**Для цитирования:** *Швойн А. И., Кузьмин В. С., Жухин Н. О.* Анализ особенностей организации технического обслуживания автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 407–418. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-407-418

## Аннотация

**Цель:** Установить возможности существующего технологического процесса технического обслуживания в условиях депо поездных устройств автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене в части определения причин возникновения кратковременных сбоев, в частности типа «отсутствие частоты» (сокращенно — ОЧ), в условиях эксплуатации и сформировать соответствующие рекомендации по его совершенствованию. **Методы:** Анализ научной и технической литературы, посвященной проблеме сбоев в работе поездных устройств автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене. Структурно-функциональное моделирование для описания основных технологических операций, выполняемых при обслуживании поездных устройств. Сопоставление процессов обслуживания поездных устройств на метрополитене и основных устройств безопасности на магистральном железнодорожном транспорте. Выявление технологических разрывов, не позволяющих определить причины возникновения сбоев в работе поездных устройств на метрополитене. Формирование рекомендаций по совершенствованию технологического процесса обслуживания поездных устройств автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене в условиях депо для снижения числа сбоев в их работе. **Результаты:** Сформировано подробное описание технологического процесса обслуживания поездных устройств автоматической локомотивной сигнализации. Определены основные технологические разрывы, препятствующие определению условий и причин возникновения кратковременных сбоев в работе оборудования в условиях эксплуатации. Указано на необходимость формирования системы тестовых воздействий, позволяющей определить условия и причины возникновения кратковременных сбоев в работе поездных устройств. **Практическая значимость:** Показана необходимость повышения уровня автоматизации технологического процесса обслуживания поездных устройств автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене, а также повышения полноты и достоверности контроля технического состояния оборудования, осуществляющего прием и обработку сигналов автоматической локомотивной сигнализации, для снижения числа сбоев в цусловиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** Метрополитен, автоматическая локомотивная сигнализация, поездные устройства, техническое обслуживание, числовая защита, сбои, отсутствие частоты, генератор комплексной проверки системы регулирования скорости.

## Введение

Системы автоматической локомотивной сигнализации нашли широкое применение в ответственном технологическом процессе регулирования движения поездов не только на магистральном железнодорожном транспорте. Так, в условиях метрополитенов применяется система автоматической локомотивной сигнализации с автомати-

ческим регулированием скорости (АЛС-АРС), отличительной особенностью которой является большая значность в сравнении с системой непрерывного типа АЛСН магистральных железных дорог, а также применение частотной (в ряде случаев фазоразностной) модуляции для формирования сигналов, содержащих информацию о допустимой и предупредительной скоростях движения [1].

Функционирование поездных устройств АЛС-АРС осуществляется в условиях сложной электромагнитной обстановки, формируемой электрическим подвижным составом. В связи с вводом в эксплуатацию электрического подвижного состава с асинхронным тяговым приводом и выводом из эксплуатации релейной аппаратуры, имеющей меньшую чувствительность и несколько большую инерционность в сравнении с микропроцессорной, наблюдается увеличение числа кратковременных сбоев в работе поездных устройств, в частности сбоев типа «отсутствие частоты» (сокращенно — ОЧ), проявляющихся наиболее часто в срабатывании так называемой «числовой защиты» — выдачи поздними устройствами сигнала на применение торможения (электрического/электропневматического) при приеме 3 частот и более в режиме «2/6» и 2 частот и более в режиме «1/6» (для АРС с дублирующим автономным устройством ДАУ). Такие сбои приводят к возникновению подтормаживаний из-за чувствительности системы интервального регулирования движения поездов на базе АЛС-АРС, к задержкам поездов и, как следствие, к нарушению графика движения поездов [2].

Для решения задачи снижения числа сбоев был проведен ряд научных исследований. Так, в работе [3] авторы описали характер зависимости ЭДС, наводимой в приемной катушке, от частоты тока в рельсовой линии. В работах [4–6] исследована электромагнитная обстановка в условиях метрополитенов и сформулированы положения методики выбора параметров сигналов автоматической локомотивной сигнализации. В работе [7] для анализа условий их возникновения была предложена математическая модель, позволяющая говорить о превышении в условиях эксплуатации уровней отдельных гармоник тягового тока над нормируемым уровнем помех. В работе [8] предложены методы определения норм опасного и мешающего влияния помех на систему АЛС-АРС. В работе [9] авторами предложен метод контроля изменения условий электромагнитной совместимости, который при необходимости может быть адаптирован и для поездных устройств.

Следует отметить, что для повышения надежности и безопасности функционирования поездной аппаратуры АЛС-АРС аналогично ее магистральному аналогу в условиях депо реализуют процесс технического обслуживания. При этом вопрос соответствия технологического процесса технического обслуживания поездных устройств АЛС-АРС существующей электромагнитной обстановке в условиях эксплуатации ранее, как и сам процесс, имеющий ряд существенных отличий от своего магистрального аналога, не поднимался и не рассматривался. С учетом этого целью настоящей работы выбрано установление возможности существующего технологического процесса технического обслуживания в условиях депо поездных устройств автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене в части определения причин возникновения кратковременных сбоев, в частности типа «отсутствие частоты», в условиях эксплуатации и формирование соответствующих рекомендаций по его совершенствованию.

## Особенности алгоритма работы поездных устройств АЛС-АРС

Прежде всего следует отметить, что в настоящее время поездная аппаратура АЛС-АРС как одна из трех подсистем входит в состав системы

управления, безопасности движения и технической диагностики «СКИФ-М» и ее модификаций, в частности «СКИФ-М20», устанавливаемой в современных вагонах серии «Москва» [10, 11]. Другими подсистемами являются подсистема управления движением, работой тягового привода и электропневматическим тормозом и подсистема управления работой вспомогательного оборудования. С учетом этого основные различия в организации процесса технического обслуживания поездной аппаратуры АЛС-АРС и аппаратуры АЛСН продиктованы различиями в алгоритмах работы этих устройств безопасности.

К отличительным особенностям алгоритма работы поездных устройств АЛС-АРС согласно [1, 12] следует относить:

– необходимость непрерывного подтверждения бдительности при движении в условиях отсутствия сигналов разрешения на движение от путевой аппаратуры (ОЧ), в частности по некодируемым участкам пути;

– выдачу при следовании в режиме тяги сигнала на разбор схемы на тягу при отсутствии подтверждения бдительности в условиях ОЧ при непревышении допустимой $V_Д$ скорости в 20 км/ч;

– выдачу при следовании в режиме тяги сигнала на разбор схемы на тягу при достижении фактической скорости $V_Ф$ значения, меньшего на величину 1 км/ч текущего значения допустимой скорости $V_Д$;

– выдачу сигнала на применение торможения (электрического/электропневматического) в случае срабатывания при приеме 3 частот и более в режиме «2/6» и 2 частот и более в режиме «1/6» (так называемая числовая защита);

– выдачу сигнала на применение торможения (электрического/электропневматического) при достижении равенства фактической $V_Ф$ и допустимой $V_Д$ скоростей движения;

– выдачу сигнала на применение экстренного (пневматического) торможения после применения торможения по условию равенства фактической $V_Ф$ и допустимой $V_Д$ скоростей движения при отсутствии в течение 3,6 с снижения фактической $V_Ф$ скорости вследствие разрыва петли безопасности и срабатывания электропневматического клапана (ЭПК);

– выдачу сигнала на применение торможения (удержание) при скоростях движения ниже 2 км/ч в положении контроллера машиниста «Выбег»;

– применение экстренного торможения для исключения скатывания поезда при установленном с помощью контроллера режиме тяги.

## Структурно-функциональное моделирование процесса технического обслуживания поездных устройств в условиях депо

Процесс технического обслуживания аппаратуры АЛС-АРС предполагает два объема проведения испытаний и проверок, которые можно условно обозначить как эксплуатационное обслуживание, проводимое 1 раз в 24 часа, и техническое обслуживание, проводимое по достижении некоторой заданной величины пробега. Анализ технологических операций в рамках каждого из объемов далее будем осуществлять с использованием методов структурно-функционального моделирования, для чего построим соответствующие блок-схемы алгоритмов (рис. 1–5).

Эксплуатационное обслуживание предполагает проведение минимального числа проверок аппаратуры АЛС-АРС (рис. 1), в частности проверки работоспособности устройств контроля бдительности машиниста: кнопки КБ и педали ПБ бдительности — переключения между режимами «Тяга» и «Торможение» с использованием основного контроллера и резервных кнопок, применения экстренного торможения при переходе с основного реверсора (РВ) на резервный. С учетом указанного набора проверок при эксплуатационном обслуживании не предполагается

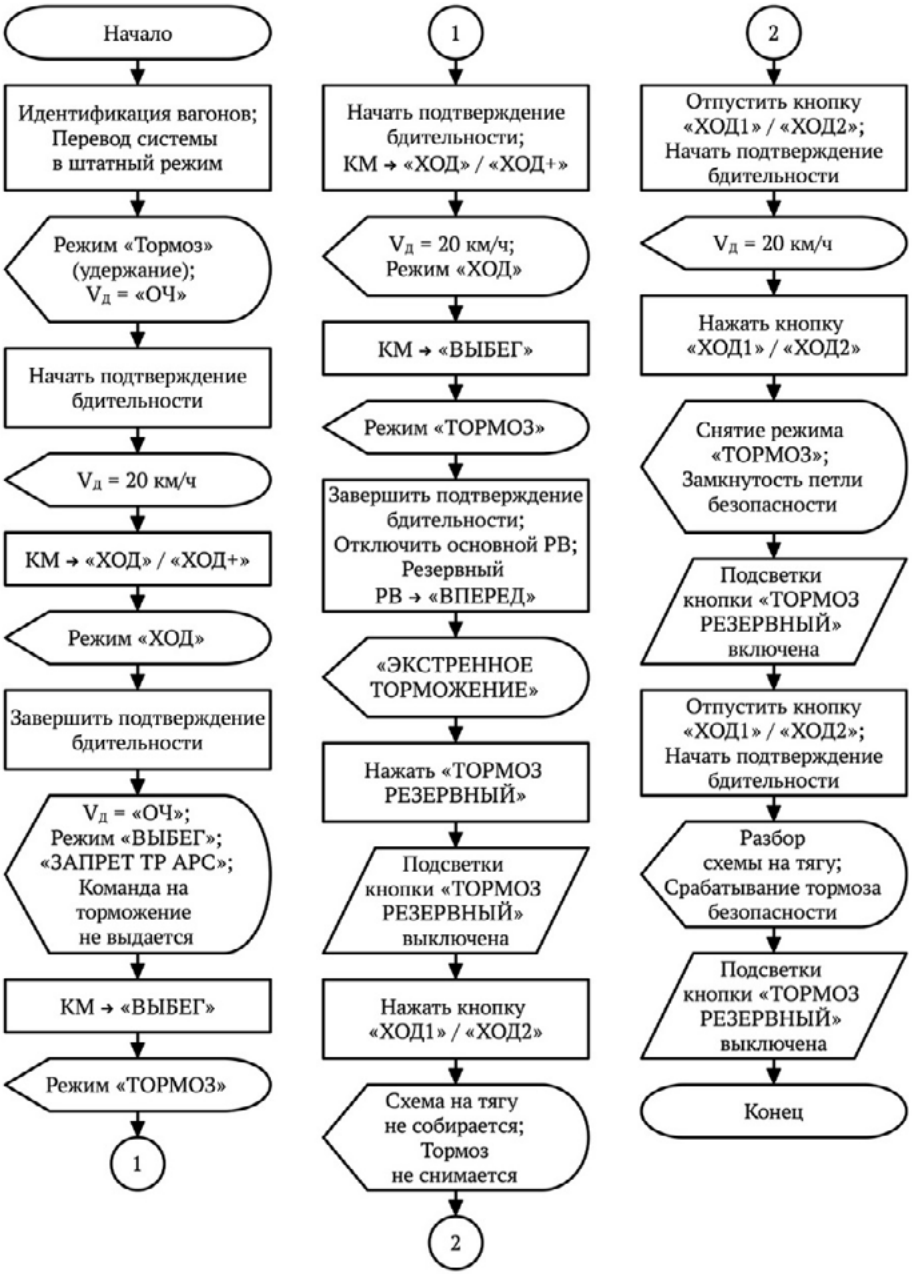



**Рис. 1.** Блок-схема алгоритма, описывающая процесс эксплуатационного обслуживания поездных устройств АЛС-АРС

применение устройств формирования сигналов АЛС-АРС. Задание начальных условий для выполнения проверок осуществляется за счет взаимодействия со штатными средствами пульта машиниста. Контроль результатов выполнения проверок осуществляется с использованием многофункционального дисплея управления (МФДУ-М).

Объем работ в рамках так называемого технического обслуживания, в свою очередь, предполагает выполнение всего комплекса проверок, в частности на:

– соответствие индикации сигналам, подаваемым с использованием путевых устройств (рис. 2);

– работу при управлении поездом с использованием основного и резервного реверсора (в том

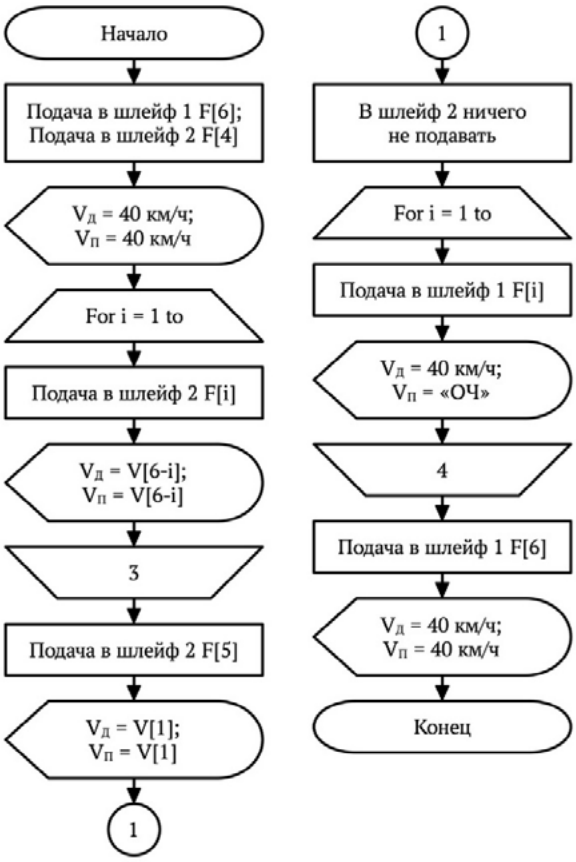



**Рис. 2.** Блок-схема алгоритма, описывающая процесс проверки соответствия индикации МФДУ-М сигналам, подаваемым с использованием путевых устройств

числе проверки на выдачу сигналов на разбор тяги и применение торможения, рис. 3);

– алгоритм применения экстренного торможения в условиях ОЧ при начале движения без подтверждения бдительности и команды от контроллера машиниста КМ (рис. 4);

– работу «числовой защиты» (рис. 5);

– восприятие сигналов абсолютной остановки (амплитудно модулированного сигнала с частотой несущей 275 Гц).

На рис. 1–5 для упрощения приняты следующие обозначения: $F$ — массив частот несущих сигналов, $F = \{75, 125, 175, 225, 275, 325\}$; $V$ — массив скоростей, используемых в системе АЛС-АРС, $V = \{0, 40, 60, 70, 80\}$; индексация элементов обоих указанных массивов начинается с единицы.

Анализ построенных обобщенных блок-схем алгоритмов (рис. 1–5), описывающих порядок проведения отдельных проверок в рамках эксплуатационного и технического обслуживания, а также их сопоставление с процессом обслуживания основных устройств безопасности на магистральных железных дорогах, описанным в инструкции Л229, показал наличие ряда особенностей, формирующих предпосылки для технологических разрывов, не позволяющих определить причину сбоя в работе поездных устройств АЛС-АРС. Рассмотрим их более подробно.

Первой особенностью технологического процесса на метрополитене является то, что проверка чувствительности приемника по номинальной величине тока в рельсовой линии, характерная для магистральной АЛСН, в отношении оборудования АЛС-АРС не выполняется. Соответствующий технологический разрыв не позволяет определить влияние электрических параметров приемных катушек и их геометрического положения на работу комплекта оборудования, а также косвенно оценить соотношение сигнал/помеха на входе приемника сигналов АЛС-АРС.

Отсутствие проверка чувствительности приемника, вероятно, связано с тем, что допустимая высота подвеса приемных катушек относительно уровня головки рельса зафиксирована в нормативной документации в достаточно узком диапазоне (180 ± 5) мм, что, однако, не исключает ее изменения в условиях движения поезда в более широких пределах (кроме того, ранее допускался более широкий диапазон высот подвеса, в частности минимальная высота могла быть равна 120 мм [1]), а, кроме того, изменения в процессе эксплуатации электрических параметров приемных катушек. Однако указанная норма позволяет существенно снизить влияние помех, связанных

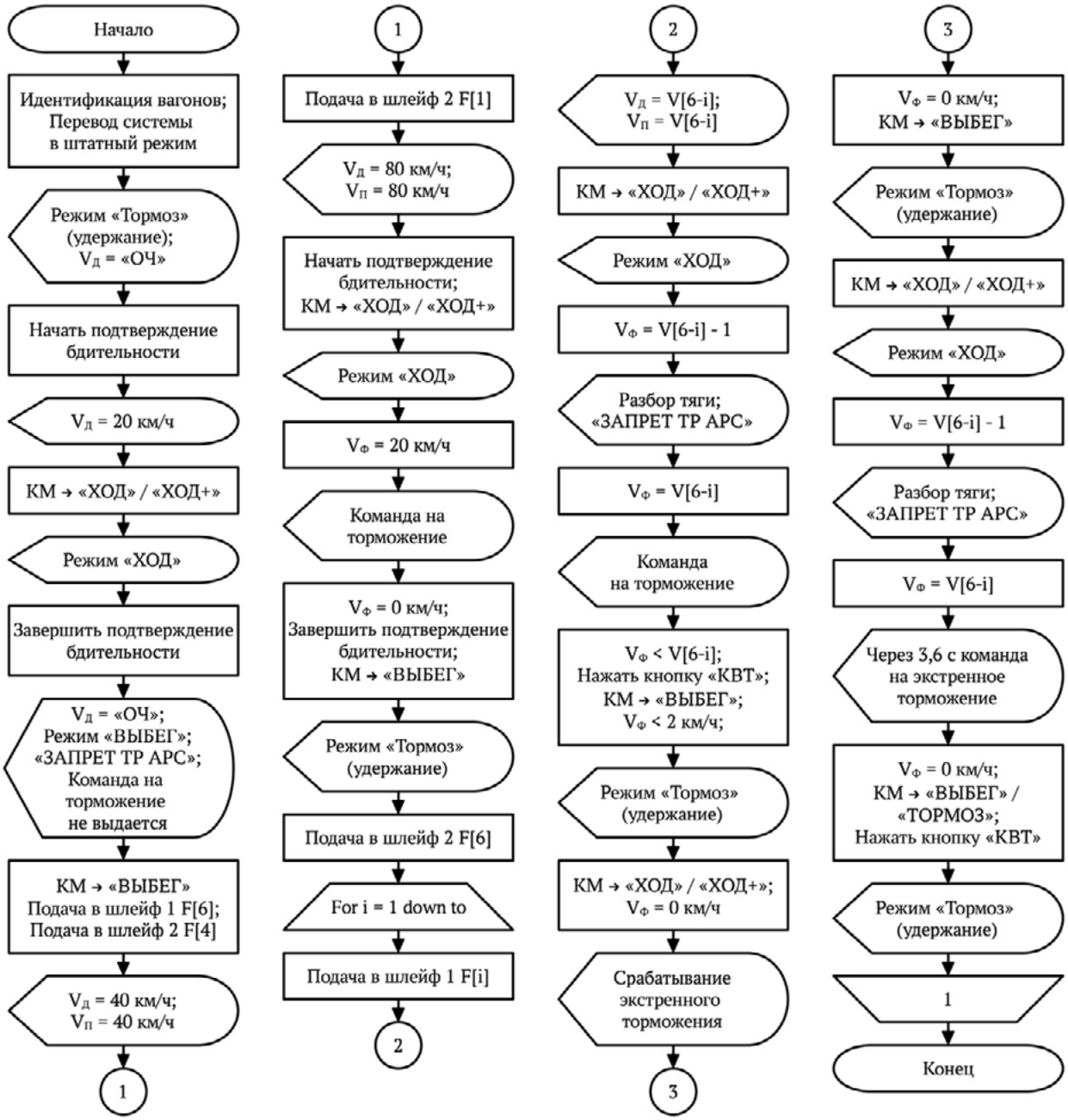



**Рис. 3.** Блок-схема алгоритма, описывающая процесс проверки функционирования комплекта поездных устройств АЛС-АРС при управлении поездом

с асимметрией в канале индуктивной связи из-за положения контактного рельса.

Другой отличительной особенностью процесса технического обслуживания поездной аппаратуры АЛС-АРС является отсутствие применения стационарных испытательных шлейфов. Вместо них используются переносные шлейфы и устройства, в частности получившие широкое распространение генераторы комплексной проверки системы регулирования скорости типа КПСРС [13]. Основной особенностью КПСРС является возможность как формирования рабочих сигналов АЛС-АРС, так и формирование сигналов, соответствующих датчику скорости.


**Рис. 4.** Блок-схема алгоритма, описывающая процесс проверки функционирования комплекта поездных устройств АЛС-АРС при ОЧ и ненулевой скорости

Такой вариант выполнения устройства проверки позволяет создавать сценарии для проведения контроля формирования приказов на разбор схемы тяги, а также на применение торможения.

Первый технологический разрыв, связанный с применением КПСРС, заключается в том, что процесс обслуживания поездных устройств АЛС-АРС выполняется преимущественно вручную, а контроль исполнения операций возлагается на обслуживающий персонал. КПСРС не позволяет автоматически протоколировать результаты выполнения проверок путем их считывания с МФДУ-М, что не дает реализовать автоматический или автоматизированный процесс протоколирования выполнения технологии обслуживания оборудования, получаемых результатов проверок и определения на их основе причин возникновения сбоев в работе оборудования.

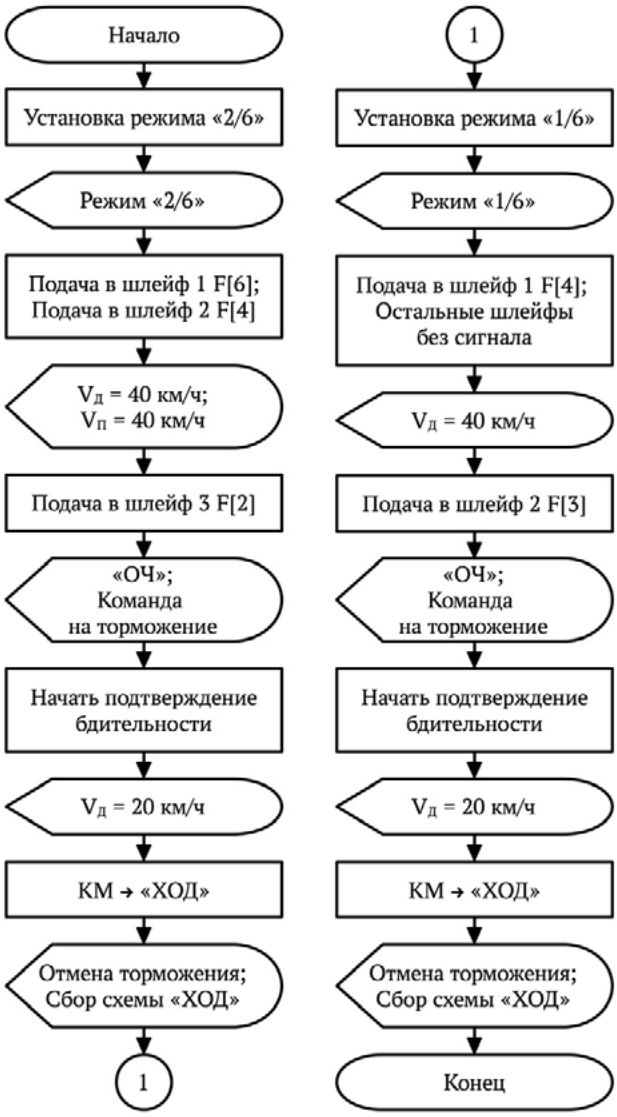



**Рис. 5.** Блок-схема алгоритма, описывающая процесс проверки «числовой защиты» поездных устройств АЛС-АРС

Второй технологический разрыв, связанный с применением КПСРС, заключается в том, что применение переносных испытательных шлейфов в отсутствие целого ряда мер по эквивалентированию условиям эксплуатации параметров электромагнитного поля, формируемого с их помощью, приводит к невозможности проведения достоверной оценки чувствительности приемника АЛС-АРС по номинальной величине тока в рельсовой линии.

Внедрение асинхронного тягового привода делает актуальным вопрос обеспечения электромагнитной совместимости поездных устройств АЛС-АРС и современного электрического подвижного состава [14]. Это связано с тем, что применение асинхронного тягового привода, использующего частотное регулирование, может потенциально приводить к возникновению гармоник тягового тока на частотах несущих сигналов АЛС-АРС [15].

Следует, однако, отметить, что существующая технология обслуживания не предполагает, за исключением воздействий для проверки «числовой защиты», применение специально синтезированных тестовых воздействий для выполнения определения степени помехоустойчивости работы поездных устройств АЛС-АРС и оценки их защищенности от опасных и мешающих влияний тягового тока, описанных на примере системы БАРС в работе [14]. С учетом этого получаемые результаты проверок не позволяют в полной мере судить о причинах сбоев, связанных с обработкой сигналов от путевых устройств и возникающих в условиях эксплуатации [16]. Это является еще одним технологическим разрывом.

## Рекомендации по совершенствованию процесса технического обслуживания поездных устройств АЛС-АРС в условиях депо

Для полноценного решения задачи снижения числа сбоев в работе поездных устройств АЛС-АРС необходимо наряду с оценкой электромагнитной обстановки выполнить работы, направленные на совершенствование процесса технического обслуживания оборудования в условиях депо. При этом следует:

– осуществить повышение уровня автоматизации процесса за счет применения средств считывания результатов работы системы с МФДУ-М и их сопоставления с заданным воздействием;

– обеспечить повышение достоверности и полноты сведений о ходе реализации процесса обслуживания в условиях депо поездных устройств АЛС-АРС за счет контроля исполнения последовательности необходимых технологических операций и проверок;

– разработать и внедрить систему тестовых воздействий, позволяющую определить, с одной стороны, условия возникновения кратковременных сбоев типа ОЧ из-за срабатывания «числовой защиты», а с другой стороны — причины реакции поездных устройств на такие воздействия при соответствии параметров приемного оборудования канала индуктивной связи установленным нормам.

## Заключение

В работе с использованием методов структурно-функционального моделирования были определены основные особенности организации технического обслуживания поездной аппаратуры АЛС-АРС на метрополитене:

– выполняемые проверки нацелены в первую очередь на контроль формирования поездными устройствами АЛС-АРС приказов на разбор схемы тяги и на применение торможения (электрического/электропневматического, экстренного) и требуют для своей реализации применение технических средств, одновременно формирующих сигналы АЛС-АРС и сигналы датчика скорости;

– в существующем технологическом процессе имеет место ряд технологических разрывов, приводящих к невозможности определения причин и условий возникновения сбоев в работе поездных устройств АЛС-АРС в пути следования. В частности, не производятся проверки, связанные с оценкой чувствительности приемника по величине тока в рельсовой линии;

– при проведении проверок не используют специальные тестовые сигналы, направленные

на определение условий и анализ причин возникновения сбоев в работе оборудования и оценку его помехоустойчивости; единственной проверкой со сходным содержанием является проверка «числовой защиты», однако она в полной мере дать необходимую оценку помехоустойчивости работы оборудования не позволяет;

– сформулированы рекомендации по совершенствованию технологического процесса обслуживания поездных устройств автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене для снижения числа сбоев и нарушений в их работе.

Полученные результаты будут использованы авторами в дальнейшем при формировании перспективной технологии комплексной проверки поездных устройств АЛС-АРС с возможностью определения причин возникновения сбоев в их работе, а также при разработке соответствующих технических средств.

## Список источников

1. Махмутов К. М. Устройства интервального регулирования движения поездов на метрополитене / К. М. Махмутов. — М.: Транспорт, 1986. — 351 с.

2. Линьков В. И. Методология разбивки на блок-участки / В. И. Линьков // Мир транспорта. — 2010. — Т. 8. — № 1(29). — С. 18–25.

3. Бестемьянов П. Ф. К исследованию тракта передачи сигналов с пути на локомотив / П. Ф. Бестемьянов, Д. П. Захаров // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2013. — № 5. — С. 5–10.

4. Бестемьянов П. Ф. Статистические модели амплитуды и длительности импульсных электромагнитных помех в каналах автоматики и телемеханики метрополитена / П. Ф. Бестемьянов, И. Г. Горлин // Электротехника. — 2016. — № 9. — С. 3–7.

5. Бестемьянов П. Ф. Методика оценки работоспособности рельсовых цепей тональной частоты при воздействии тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / П. Ф. Бестемьянов, Ю. А. Кравцов, Е. Г. Щербина, А. Б. Чегуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2012. — № 1(45). — С. 87–92.

6. Бестемьянов П. Ф. Методика выбора параметров сигналов автоматической локомотивной сигнализации в системе интервального регулирования движения поездов с временным разделением каналов / П. Ф. Бестемьянов, Д. П. Захаров // Электротехника. — 2014. — № 8. — С. 2–11.

7. Шевлюгин М. В. Гармонические помехи тягового тока в системе электроснабжения метрополитена / М. В. Шевлюгин, В. Ф. Данг // Мир транспорта. — 2015. — Т. 13. — № 6(61). — С. 88–101.

8. Кабецкий А. Г. Нормы и методы определения электромагнитной совместимости современных систем автоматической локомотивной сигнализации и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом на метрополитене / А. Г. Кабецкий, А. Д. Манаков // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 4. — С. 503–521. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-503-521.

9. Баранов Л. А. Метод оценки изменения электромагнитной обстановки в местах функционирования систем интервального регулирования движения поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, В. Г. Сидоренко, Е. Г. Щербина // Наука и техника транспорта. — 2013. — № 3. — С. 035–040.

10. Гультяев А. С. Поезд метро «Москва-2020»: рост эффективности и комфорта / А. С. Гультяев, С. С. Заярко // Железные дороги мира. — 2020. — № 12. — С. 59–69.

11. Полухов Н. А. Вагоны метро серии 81-765/766/767 «Москва» / Н. А. Полухов // Железные дороги мира. — 2017. — № 8. — С. 41–47.

12. Данилов Е. Б. Вагоны метрополитена моделей 81-765/766/767: учебное пособие по изучению электрооборудования / Е. Б. Данилов. — М.: ИПЦ Маска, 2018. — 189 с.

13. Продукция // СТИВ.ru. — URL: https://www.stiw.ru/index.html (дата обращения: 04.01.2024).

14. Манаков А. Д. Нормы опасного и мешающего влияния помех на устройства АЛС-АРС системы БАРС Петербургского метрополитена / А. Д. Манаков,

А. А. Блюдов, А. Г. Кабецкий, А. А. Трошин // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1. — № 1. — С. 28–39.

15. Кравцов Ю. А. Электромагнитная совместимость рельсовых цепей и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Кравцов // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1. — № 1. — С. 7–27.

16. Кочетков А. А. Московский метрополитен. Аварийность, проблемы, перспективы / А. А. Кочетков. — М.: Эдитус, 2020.

Дата поступления: 18.03.2025
Решение о публикации: 19.05.2025

**Контактная информация:**
ШВОЙН Андрей Иванович — аспирант; shvoyn@mail.ru
КУЗЬМИН Владислав Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; vs.kuzmin@bk.ru
ЖУХИН Никита Олегович — канд. техн. наук, ассистент, заведующий лабораторией; rzd1997@mail.ru

# Technical Maintenance Analysis of the Automatic Locomotive Signalling in the Metro System

**A. I. Shvojn, V. S. Kuz`min, N. O. Zhuxin**

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation

**For citation:** Shvojn A. I., Kuz`min V. S., Zhuxin N. O. Technical Maintenance Analysis of the Automatic Locomotive Signalling in the Metro System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 407–418. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-407-418

## Summary

**Purpose:** To establish the potential of the current technical maintenance procedures for automatic locomotive signalling devices in the Metro depot. The primary focus is to identify the causes of short-term failures, particularly, 'lack of frequency' failure (abbreviated as 'LF') occurring under operational conditions. The study will also formulate the appropriate recommendations for their improvement. **Methods:** Analysis of scientific and technical literature devoted to the issue of failures in the operation of train devices of automatic locomotive signalling in the Metro system. Structural and functional modelling for describing the main technological operations performed during train device maintenance. Comparative analysis of the maintenance procedures of train devices in the metro and the basic safety devices in the mainline railway transport. The identification of technological gaps is imperative in order to determine the causes of failures in the operation of train devices in the Metro system. The development of recommendations is intended to enhance the technical maintenance procedures for train automatic locomotive signalling devices at the Metro depot. The objective of this development is to reduce failures during the operation of these. **Results:** A detailed description of the technical maintenance of train devices of automatic locomotive signalling has been presented. The main technological gaps that prevent the determination of the conditions and causes of short-term failures in the operation of equipment have been identified. The necessity for developing a system of test effects allowing determining the conditions and causes of short-term failures in the operation of train devices has been highlighted. **Practical significance:** The study has demonstrated the necessity to enhance the level of automation of the technical maintenance of train devices of automatic locomotive signalling in the Metro. Furthermore, there is a need for comprehensive and reliable monitoring of the technical condition of the equipment that receives and processes automatic locomotive signalling data. This will serve to reduce the number of failures under operating conditions.

**Keywords:** Metro system, automatic locomotive signalling, train devices, maintenance, digital protection, failures, lack of frequency, generator of a comprehensive test of the speed control system.

## References

1. Maxmutov K. M. *Ustroystva interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na metropolitene* [Interval control devices for train traffic on the subway]. Moscow: Transport Publ., 1986. 351 p. (In Russian)

2. Lin'kov V. I. Metodologiya razbivki na blok-uchastki [Methods to sectionize railway blocks]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2010, vol. 8, Iss. 1(29), pp. 18–25. (In Russian)

3. Bestem'yanov P. F., Zaxarov D. P. K issledovaniyu trakta peredachi signalov s puti na lokomotiv [To the Research of Signal Transmission path from Track to the Locomotive]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2013, Iss. 5, pp. 5–10. (In Russian)

4. Bestem'yanov P. F., Gorlin I. G. Statisticheskie modeli amplitudy i dlitel'nosti impul'snykh elektromagnitnykh pomekh v kanalakh avtomatiki i telemekhaniki metropolitena [On statistical models of the amplitude and the duration of pulsed electromagnetic interference in automatic-control and telemechanic channels of subway lines]. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering]. 2016, Iss. 9, pp. 3–7 (In Russian)

5. Bestem'yanov P. F., Kravczov Yu. A., Shherbina E. G. et al. Metodika otsenki rabotosposobnosti rel'sovykh tsepey tonal'noy chastoty pri vozdeystvii toka elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom [Method for Tonal Frequency rail circuits operational integrity estimation under the influence of the rolling stock equipped with asynchronous propulsion motor]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering]. 2012, Iss. 1(45), pp. 87–92. (In Russian)

6. Bestem'yanov P. F., Zaxarov D. P. Metodika vybora parametrov signalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii v sisteme interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov s vremennym razdeleniem kanalov [A method of selecting parameters for automated cab-signaling signals in a system of train separation with time-division channeling]. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering]. 2014, Iss. 8, pp. 2–11. (In Russian)

7. Shevlyugin M. V., Dang V. F. Garmonicheskie pomexi tyagovogo toka v sisteme elektrosnabzheniya metropolitena [Harmonic interference of traction current in metro power supply system]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2015, vol. 13, Iss. 6(61), pp. 88–101. (In Russian)

8. Kabeczkij A. G., Manakov A. D. Normy i metody opredeleniya elektromagnitnoy sovmestimosti sovremennykh sistem avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii i elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom na metropolitene [Norms and methods for determining the electromagnetic compatibility of modern automatic locomotive signaling systems and electric rolling stock with an asynchronous traction drive on the subway]. *Avtomatika na transporte* [Automation on transport]. 2021, vol. 7, Iss. 4, pp. 503–521. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-503-521. (In Russian)

9. Baranov L. A., Bestem'yanov P. F., Sidorenko V. G. et al. Metod otsenki izmeneniya elektromagnitnoy obstanovki v mestakh funktsionirovaniya sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Method for assessing changes in electromagnetic environment in places of operation of interval train control systems]. *Nauka i texnika transporta* [Science and Technology of Transport]. 2013, Iss. 3, pp. 035–040. (In Russian)

10. Gul`tyaev A. S., Zayarko S. S. Poezd metro "Moskva-2020": rost effektivnosti i komforta [Moscow-2020 metro train: increasing efficiency and comfort]. *Zheleznye dorogi mira* [Rail International]. 2020, Iss. 12, pp. 59–69. (In Russian)

11. Poluxov N. A. Vagony metro serii 81-765/766/767 "Moskva" [Metro cars of the 81-765/766/767 "Moscow" series]. *Zheleznye dorogi mira* [Rail International]. 2017, Iss. 8, pp. 41–47. (In Russian)

12. Danilov E. B. *Vagony metropolitena modeley 81-765/766/767: uchebnoe posobie po izucheniyu elektrooborudovaniya* [Subway cars of models 81-765/766/767: a tutorial on studying electrical equipment]. Moscow: IPC Maska Publ., 2018, 189 p. (In Russian)

13. *Produktsiya* [Products]. STEVE.ru. Available at: https://www.stiw.ru/index.html (accessed: January 4, 2025) (In Russian)

14. Manakov A. D., Blyudov A. A., Kabeczkij A. G. et al. Normy opasnogo i meshayushchego vliyaniya pomekh na

ustroystva ALS-ARS sistemy BARS Peterburgskogo metropolitena [Standards of dangerous and disturbing influence of interference on ALS-ARS devices of the BARS system of the St. Petersburg metro]. *Avtomatika na transporte* [Automation on transport]. 2015, vol. 1, Iss. 1, pp. 28–39. (In Russian)

15. Kravczov Yu. A. Elektromagnitnaya sovmestimost' rel'sovykh tsepey i elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom [Electromagnetic compatibility of track circuits and electric rolling stock with asynchronous traction drive]. *Avtomatika na transporte* [Automation on transport]. 2015, vol. 1, Iss. 1 pp. 7–27. (In Russian)

16. Kochetkov A. A. *Moskovskiy metropoliten. Avariynost', problemy, perspektivy* [Moscow Metro. Accidents, Problems, Prospects]. Moscow: Editus, 2020, 157 p. (In Russian)

Received: March 18, 2025
Accepted:May 19, 2025

**Author's information:**
Andrej I. SHVOJN — Postgraduate Student; shvoyn@mail.ru
Vladislav S. Kuz`Min — PhD in Engineering, Associate Professor; vs.kuzmin@bk.ru
Nikita O. ZHUXIN — PhD in Engineering, Assistant, Head of Laboratory; rzd1997@mail.ru

УДК 621.384.3:621.431.7

# Тепловизионный контроль элементов силовой установки машин специального подвижного состава

**А. М. Кудрин, А. А. Воробьев, А. А. Беляев**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Кудрин А. М., Воробьев А. А., Беляев А. А.* Тепловизионный контроль элементов силовой установки машин специального подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 419–429. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-419-429

## Аннотация

**Цель:** Анализ возможности диагностики элементов силовых установок машин специального подвижного состава методом пассивного теплового контроля. **Методы:** Анализ технического состояния парка путевых машин и ДВС, экспериментальное исследование теплового поля, сравнительный анализ различных по своему техническому состоянию ДВС. Тепловизионные исследования проводились на двух конструктивно схожих двигателях ЯМЗ-238. **Результаты:** На основании проведенного анализа неисправностей для их диагностирования выбран метод пассивного теплового контроля, приведены результаты тепловизионного контроля ДВС в полностью исправном состоянии и с различными неисправностями, сделаны выводы о возможности и перспективах использования тепловизионного контроля при плановом и полевом осмотре машины. Полученные тепловые карты позволяют достаточно качественно и точно диагностировать техническое состояние двигателей внутреннего сгорания и выявлять на разных стадиях их неисправности. Комплексный тепловизионный контроль ДВС осуществлялся путем съемки систем ДВС и определения наличия или отсутствия неисправности в них. В ходе диагностики производилась тепловизионная съемка систем охлаждения, топливной системы, тела двигателя и воздухонагнетальной системы. При диагностике контролировалась внешняя температура элементов и их герметичность, как в теле исследуемой детали, так и в местах их соединения с другими элементами. **Практическая значимость:** Предложен перспективный метод контроля технического состояния ДВС путевых машин и обнаружения их неисправностей, проведены исследования, подтвердившие целесообразность применения тепловизионного контроля. В дальнейшем накопление базы тепловых карт различных двигателей в различном техническом состоянии позволит определять не только наличие неисправностей, но и ее характер без разбора ДВС.

**Ключевые слова:** Подвижной состав, двигатель внутреннего сгорания, дизельный двигатель, неразрушающий контроль, тепловизионный контроль, диагностика неисправностей, тепловизор, перегрев.

Среди ведущих направлений в развитии железнодорожного транспорта особое место занимает повышение надежности работы и увеличение эксплуатационного ресурса технических средств [1]. Для этого особенно перспективна разработка более точных, универсальных и мобильных способов контроля состояния технических средств, в том числе специального подвижного состава.

В основу представляемого исследования был положен анализ состояния специального подвижного состава и возникающих неисправностей его узлов и систем. Обработке и анализу подвергались данные, предоставленные структурным подразделением Октябрьской железной дороги механизированной дистанции инфраструктуры — «ПЧМ Тосно».

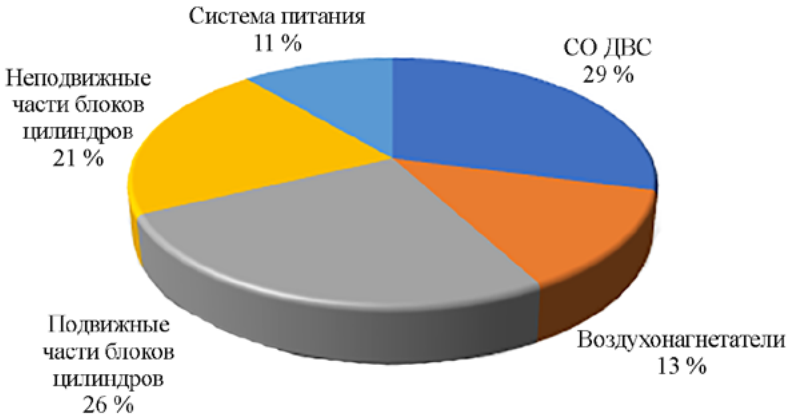



**Рис. 1.** Неисправности основных систем ДВС путевых машин

Согласно проведенным изысканиям [2, 3], основным агрегатом, лимитирующим надежность работы машин специального подвижного состава, является установленный на них двигатель внутреннего сгорания (ДВС). На его долю в процентном соотношении приходится до 32 % отказов в работе машин специального подвижного состава (СПС). Распределение отказов по узлам и системам дизеля показывает (рис. 1), что на долю систем охлаждения (СО) и топливной аппаратуры (ТА) приходится более 40 % из общего числа неисправностей ДВС. Оценка технического состояния данных систем представляет собой достаточно сложную задачу из-за их закрытости и, как следствие, достаточно низкой контролепригодности.

В настоящее время контроль технического состояния и остаточного ресурса осуществляется с использованием преимущественно стационарных систем тестовой диагностики и инвазивных методов контроля [2–5], что не создает условия для раннего выявления причин нарушений работоспособности оборудования. Позднее выявление неисправностей часто приводит к замене системы или агрегата в целом, что экономически крайне невыгодно. Перспективным методом технического контроля для выявления неисправностей, как существующих, так и зарождающихся, является метод пассивного теплового контроля (тепловизионный контроль) [6–8].

На машинах специального подвижного состава, в том числе и в «ПЧМ Тосно», установлена широкая номенклатура двигателей внутреннего сгорания. Нами было проанализировано более 230 единиц. Наибольшее количество двигателей составили ДВС производства Ярославского моторного завода. Большинство двигателей ЯМЗ — это модель ЯМЗ-238 и различные его модификации. Принимая во внимание сказанное, этот двигатель был принят в качестве объекта тепловизионного контроля.

Инструментом для проведения тепловизионного контроля (ТК) является тепловизор. По совокупности технико-экономических характеристик для проведения исследования был выбран промышленный тепловизор марки Dali T8. Его отличительными особенностями, улучшающими качество результатов исследования, а также ускоряющими время его проведения, являются:

– высокий температурный диапазон от –20 до +2000 °С (в различных модификациях);

– низкое пространственное разрешение 1,37 мрад;

– увеличенная матрица 384 × 288 для лучшей четкости получаемого изображения;

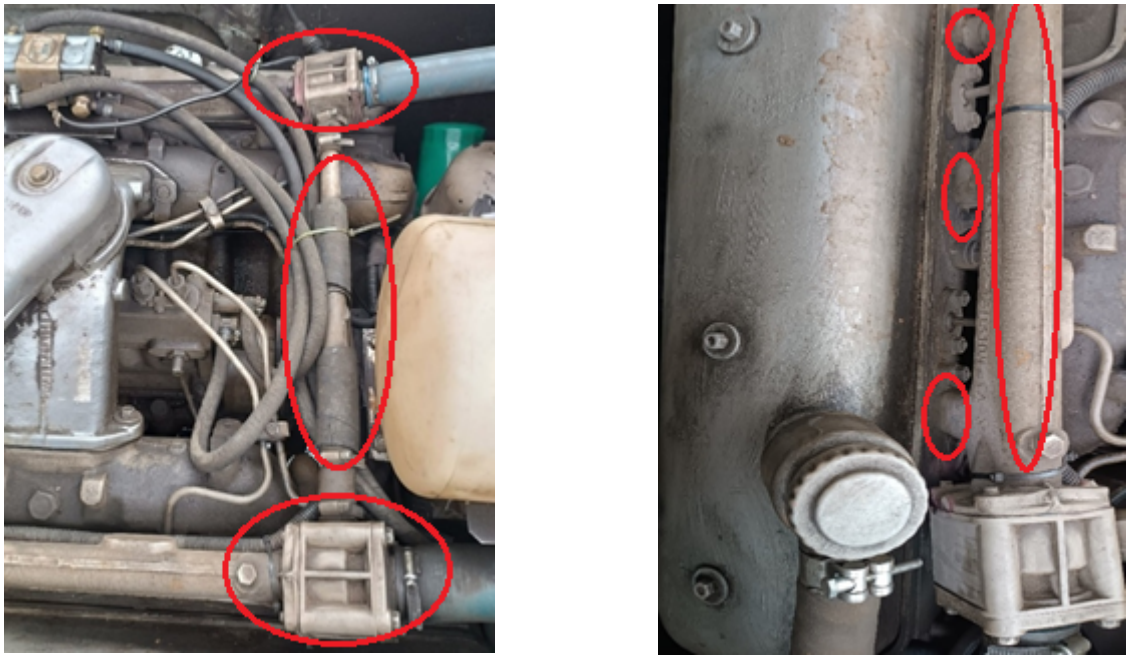


**Рис. 2.** Схема ТК системы охлаждения (фото авторов)

– возможность мгновенной акклиматизации к температуре окружающей среды;

– возможность назначить несколько контролируемых в режиме реального времени точек на одной детали, возможность съемки видео;

– сохранение полученного теплового изображения в памяти тепловизора, а также возможность его быстрой передачи на ПК для дальнейшей обработки.

Тепловизионные исследования проводились на двух конструктивно схожих двигателях ЯМЗ-238. Один из них установлен на укладочном кране УК 25/9-18, второй — на стенде в лаборатории кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» в ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Тепловизионный контроль первого двигателя проводился на базе путевой машинной станции ПМС-88 Октябрьской дирекции по ремонту пути «ПутьРем» — структурного подразделения центральной дирекции по ремонту пути. В процессе исследования укладочный кран был задействован в работах по замене рельсовых плетей на путях в самом ПМС. Кран был подготовлен к эксплуатации специалистами по ремонту подвижного состава, полностью исправен и соответствовал заявленным для него в паспорте ДВС данным.

Комплексный тепловизионный контроль ДВС осуществлялся путем съемки систем ДВС и определения наличия или отсутствия неисправности в них. В ходе диагностики производилась тепловизионная съемка систем охлаждения, топливной системы, тела двигателя и воздухонагнетательной системы (рис. 2–5) [9–11].

Первой системой, подлежащей контролю, являлась система охлаждения (СО), так как именно ее исправная или неисправная работа в большей степени влияет на температурный режим работающего ДВС. Контролируемые элементы СО ЯМЗ-238 показаны на рис. 2.

При диагностике контролировалась внешняя температура элементов и их герметичность, как в теле исследуемой детали, так и в местах их соединения с другими элементами ДВС, например главным блоком цилиндров (ГБЦ) или блоком термостата.

Следующим элементом ТК стала топливная система. Ее диагностика во многом схожа с диагно-

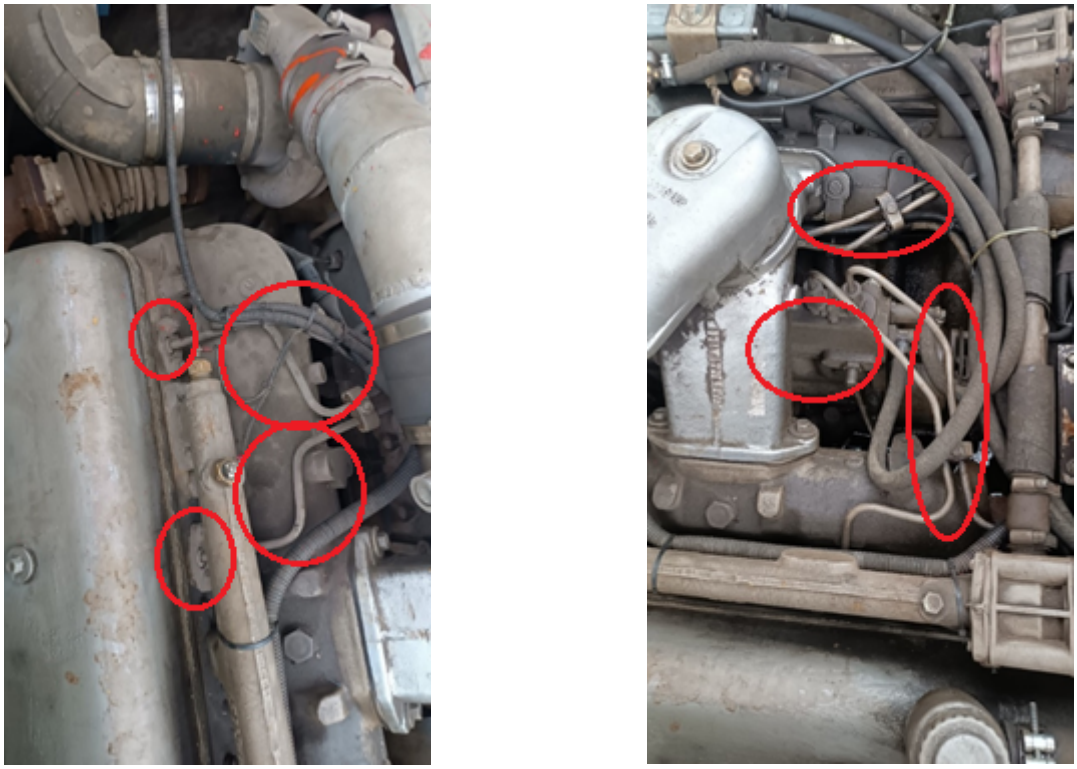


**Рис. 3.** Схема ТК топливной системы (фото авторов)

стикой системы охлаждения, так как одним из важнейших их общих свойств является герметичность.

Диагностика топливной системы во многом схожа с диагностикой системы охлаждения, так как одним из важнейших свойств является ее герметичность. Контролируемые элементы топливной системы показаны на рис. 3.

При проведении тепловизионного контроля топливной системы контролировалось тепловое состояние всех трубок от топливного насоса низкого давления (ТННД) до топливного насоса высокого давления (ТНВД) и от секций ТНВД до головки блока цилиндров. При этом учитывалась герметичность трубок. Также диагностируются секции ТНВД на предмет исправной работы.

Состояние блока цилиндров и ГБЦ, а также деталей, находящихся внутри них, контролировалось по температуре внешней поверхности. Схема контроля показана на рис. 4.

При диагностике воздухонагнетателей контролировались температурные проблемы, вызванные возможными течами масла из тела турбины, а также герметичностью системы выхлопа, особенно в месте соединения с турбиной. Контролируемые элементы воздухонагнетательной системы показаны на рис. 5.

Второе стендовое исследование проводилось в тех же точках, что и первое, поскольку двигатели подобны и задачи исследования общие. Однако состояние двигателя, задействованного в стендовом этапе исследования, имело ряд технических особенностей, позволяющих предположить наличие неисправностей: вне зависимости от времени прогрева двигатель не достигал оптимальной рабочей температуры.

Учитывая сказанное, поэтапно опишем и проанализируем собранные экспериментальные данные тепловизионной диагностики полностью исправного ДВС.

На рис 6. показаны тепловизионные снимки системы охлаждения ЯМЗ-238, установленного на укладочном кране УК 25/9-18: блока термоста-

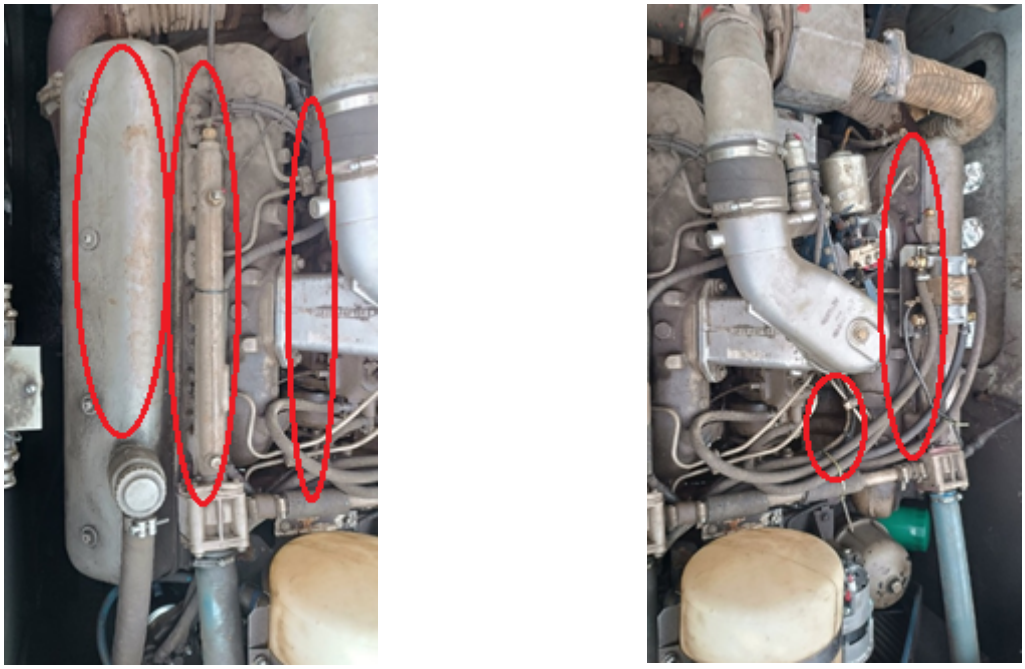


**Рис. 4.** Схема ТК тела двигателя (БЦ и ГБЦ) (фото авторов)

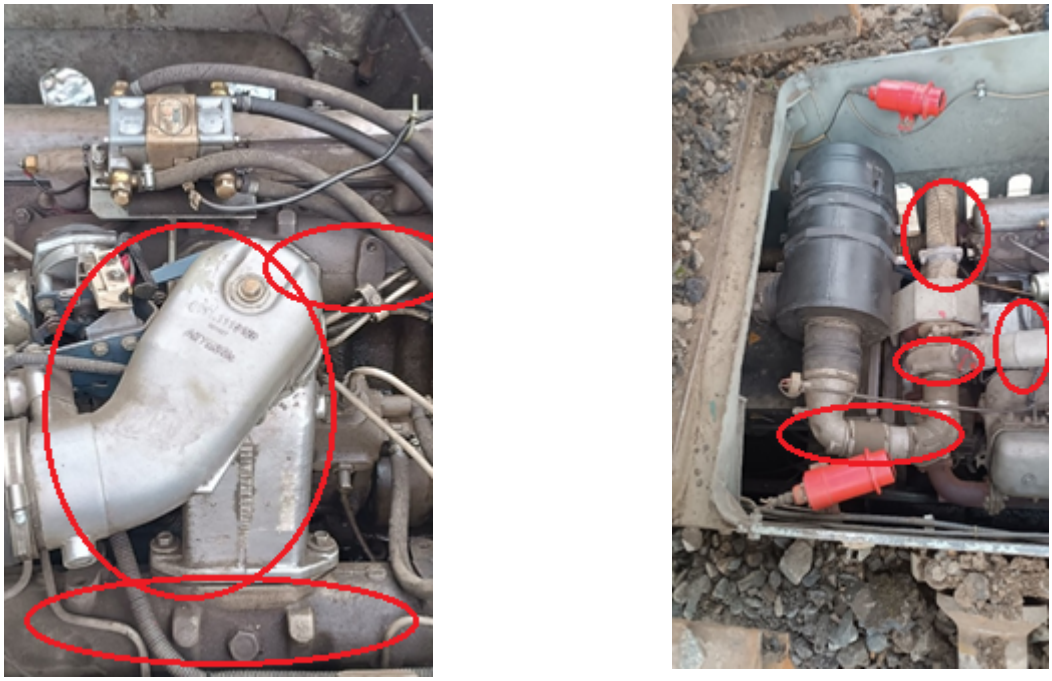


**Рис. 5.** Схема ТК воздухонагнетательной системы (фото авторов)

тов, выходного коллектора охлаждающей жидкости (ОЖ), трубок системы охлаждения малого и полного контуров системы охлаждения. Температура элементов в норме не должна превышать 85–90 °С.

Из снимка видно, что температура контролируемых деталей однородна и составляет 77,8 °С, что свидетельствует о правильной работе системы. Также тепловая карта показывает, что в местах соединений коллектора ОЖ с блоком термостатов, а также блока термостатов и трубок СО, подтеков ОЖ нет, что говорит о герметичности системы, которая характеризуется при тепловизионном контроле локальными областями с более

низкой температурой [2, 12, 13]. Радиатор СО не имеет переохлажденных секций, что также говорит о его исправной работе.

Результаты контроля элементов топливной системы приведены на рис. 7. Важнейшим объектом контроля в этом случае является ТНВД. Его исправная работа обеспечивает правильное и своевременное распределение топлива по цилиндрам ДВС. Исправность детали характеризуется правильной работой всех секций ТНВД. При тепловом контроле это равномерная температура, не превышающая 60 °С.

Из рис. 7 видно, что температура всего ТНВД однородна и составляет от 49,5 до 55 °С. В местах соединения с топливными трубками как высокого, так и низкого давления подтеканий дизельного топлива не обнаружено. Трубки высокого и низкого давления также герметичны. Для топливных трубок низкого давления температура составляет 31 °С, а для высокого — от 43,2 до 44,6 °С. Так как ни одна из температур не выходит за пределы допустимых границ в 60 °С, делаем вывод об исправной работе системы.

На снимке (рис. 8) видны клапанная крышка, головка блока цилиндров и сам блок цилиндров. При тепловизионном контроле исправность этих деталей характеризуется однородной температурой, отсутствием локальных перегревов и холодных областей, а также герметичностью в местах соединений. Температура блока и ГБЦ по снимку составляет от 80,4 до 89,9 °С, что укладывается в температурный режим исправной работы ДВС, где предельно допустимая температура при исправной работе равна 100 °С при холостых оборотах, и 130 °С при работе с максимальной нагрузкой. Температура клапанной крышки также не выходит за пределы допусков (65 °С) и составляет 43–59,4 °С в самой теплонагруженной части. Места соединений БЦ с ГБЦ, ГБЦ с клапанной крышкой, а также ГБЦ с коллектором ОЖ и топливными трубками герметичны,

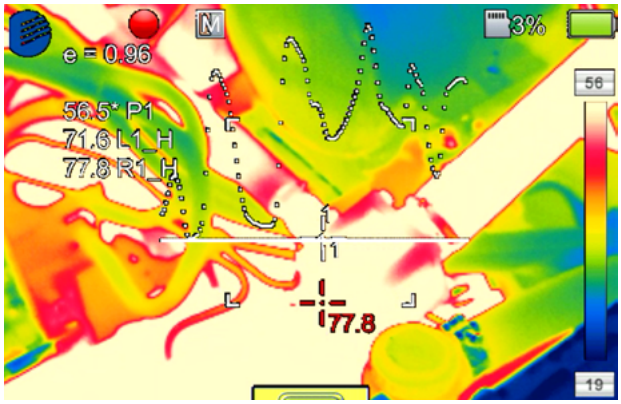



**Рис. 6.** Тепловизионный снимок контролируемых элементов в СО ДВС (фото авторов)

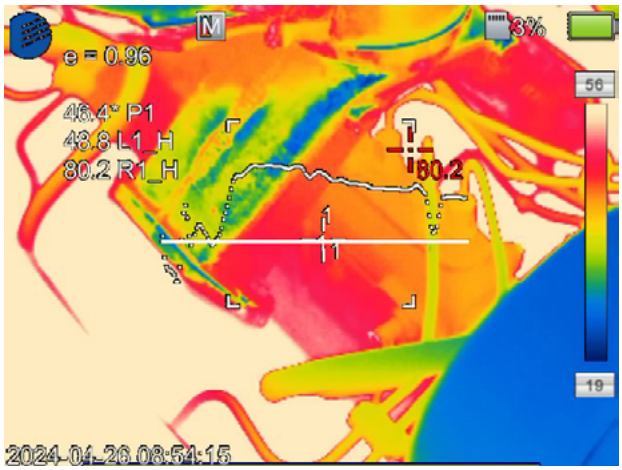



**Рис. 7.** Тепловизионные снимки контролируемых элементов в топливной системе ДВС (фото авторов)

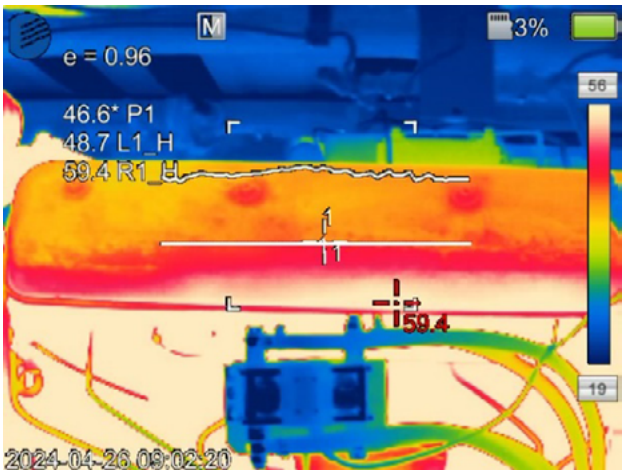



**Рис. 8.** Тепловизионные снимки контролируемых элементов БЦ и ГБЦ (фото авторов)

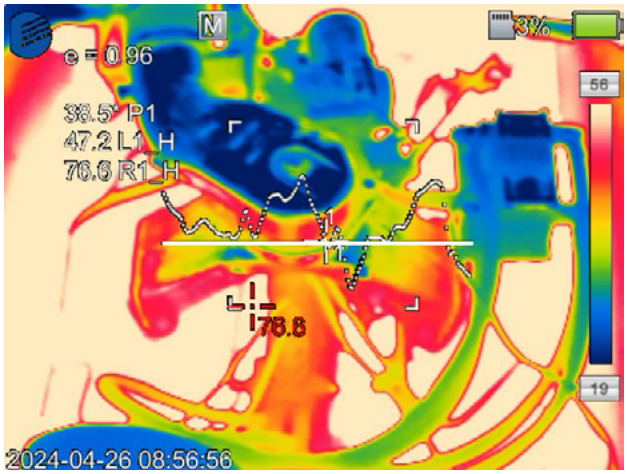



**Рис. 9.** Тепловизионный снимок впускного коллектора воздухонагнетательной системы (фото авторов)

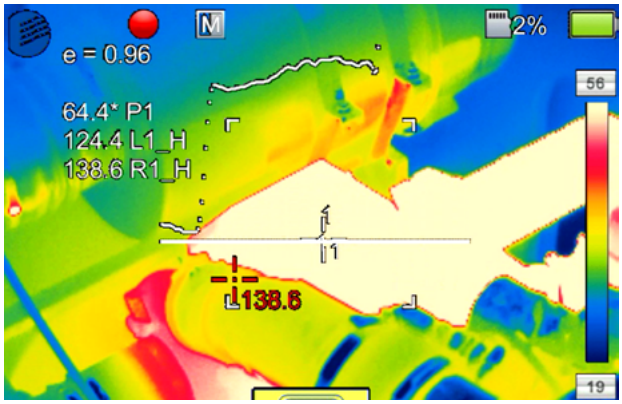



**Рис. 10.** Тепловизионный снимок турбонагнетателя (фото авторов)

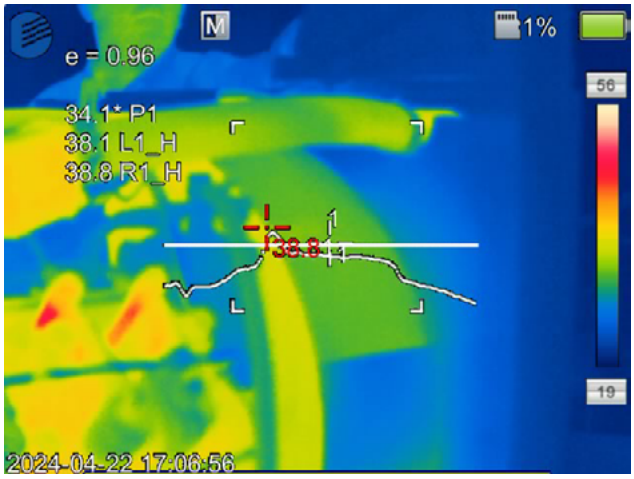



**Рис. 11.** Тепловизионный снимок неисправного ДВС ЯМЗ-238 (фото авторов)

подтеков рабочих жидкостей не обнаружено. Можно сделать вывод об исправности контролируемых деталей.

Завершающим этапом тепловизионной диагностики двигателя, работающего в штатном режиме, стал контроль воздухонагнетательной системы (рис. 9, 10). При тепловом контроле воздухонагнетателей отсутствует требование однородности температуры ввиду иного характера и принципа работы такой системы, проверяется только герметичность соединений и температура впускного коллектора, воздуховодов (рис. 9) и самого воздухонагнетателя (рис. 10).

На рис. 9 виден впускной коллектор ДВС и воздуховод, подходящий к нему от турбонагнетателя, установленного на трубе выхлопной системы. Соединения внутри системы воздуховодов, а также в местах соединения с ГБЦ были проверены на герметичность, утечек обнаружено не было.

Тепловизионный снимок турбонагнетателя приведен на рис. 10. Температура воздухонагнетательного устройства составила 105,6 °С при максимально допустимой в 130 °С. Также была проведена проверка герметичности соединений. В турбине утечек масла не обнаружено. С учетом всего вышеописанного по двигателю крана УК 25/9-18 можно сделать вывод, что он исправен и готов к дальнейшей эксплуатации без дополнительного технического вмешательства.

Для подтверждения возможности диагностики не только исправной работы, но и обнаружения неисправностей, как уже существующих, так и зарождающихся, были проведены исследования на стендовом двигателе ЯМЗ-238. Техническое состояние двигателя характеризовалось появившейся невозможностью достижения им оптимальной рабочей температуры (рис. 11).

Из рис. 11 видно, что температура коллектора ОЖ и трубок полного и малого контуров СО не достигает своих рабочих значений, соответ-

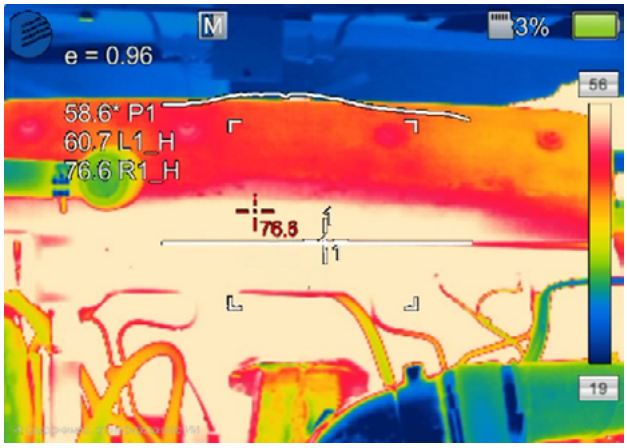



**Рис. 12.** Тепловизионный снимок неисправного ДВС ЯМЗ-238Б-14 (фото авторов)

ственно, до своей рабочей температуры не прогревается сама охлаждающая жидкость. Температура составляет для коллектора СО — 44,2 °С, а для трубок — 33,7 °С. Такое может произойти в нескольких случаях, когда:

– двигатель работает без нагрузки;

– неисправен блок термостатов СО.

К данному двигателю был подключен генератор, поэтому первый случай исключается. Было принято решение о разборе системы охлаждения и диагностике блока термостатов. В результате оба термостата были неисправны и заклинили в открытом положении, не давая двигателю прогреваться, пуская ОЖ по полному контуру. Был произведен ремонт блоков термостатов, и двигатель запущен без этой неисправности.

В ходе исследования, на этапе контроля состояния БЦ и ГБЦ, была обнаружена область локального перегрева, которая зеркально не была отражена на другой половине блока цилиндров (рис. 12).

Температура клапанной крышки, находящаяся на середине головки блока цилиндров, составила 76,6 °С. Подобный случай может быть вызван скоплением нагара в камере сгорания. Нагар нарушает теплопередачу между границами камеры сгорания и охлаждающей жидкостью, что повышает температуру отработанных газов. В свою очередь, отработанные газы, проходя через выпускной клапан в головку блока цилиндров и далее в выхлопную систему, повышают температуру самой головки. Вследствие этого система охлаждения может не справиться в зависимости от условий окружающей среды с отведением теплоты, что приведет к локальному перегреву головки блока цилиндров.

В процессе ремонта предположение, выдвинутое по результатам тепловизионного исследования, подтвердилось.

Обобщая приведенные данные, можно сделать ряд практически значимых выводов:

1. Проведенные исследования двигателей внутреннего сгорания, установленных на работающей машине специального подвижного состава и на стенде в лаборатории, подтвердили возможность диагностики их технического состояния с помощью тепловизионного контроля.

2. Полученные тепловые карты позволяют достаточно качественно и точно диагностировать техническое состояние двигателей внутреннего сгорания и выявлять на разных стадиях их неисправности.

3. В настоящее время проведенные исследования позволяют считать метод пассивного теплового контроля более простым и оперативным в сравнении с другими методами. В дальнейшем накопление базы тепловых карт различных двигателей в различном техническом состоянии позволит определять не только наличие неисправностей, но и ее характер без разбора ДВС.

## Список источников

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга): Распоряжение ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р / Нормативные документы Западно-Сибирской железной дороги — филиала ОАО «РЖД». — URL: http://zszd.rzd.ru/dbmm/download?vp=17&load=y&col_id=121&id=18071.

2. Балагин О. В. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния секций холодильников тепловозных дизелей: дисс. … канд. техн. наук / О. В. Балагин. — Омск, 2005. — 165 с.

3. Панченко М. Н. Оценка технического состояния тепловозных дизелей по неравномерности частоты вращения коленчатого вала: дисс. ... канд. техн. наук / М. Н. Панченко. — СПб., 2020. — 208 с.

4. Горбачев А. А. Методика диагностики двигателей внутреннего сгорания строительно-дорожных машин по акустическим параметрам / А. А. Горбачев, А. А. Воробьев, А. М. Кудрин // Строительные и дорожные машины. — 2022. — № 4. — С. 7–10.

5. Гюнтер Г. Диагностика дизельных двигателей. Серия «Автомеханик» / Г. Гюнтер.: пер. с нем. — М.: ЗАО «КЖП За рулем», 2004. — 176 с.

6. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: справочное издание / В. П. Вавилов. — М.: Машиностроение, 1991. — 240 с.

7. Dudek K. Thermography as a Diagnosing System / K. Dudek // Journal of Transdisciplinary Systems Science. — 1998. — Vol. 3. — Pp. 68–79.

8. Sroka Z. J. Thermal Load of Tuned Piston / Z. J. Sroka // Archives of Civil and Mechanical Engineering. — 2012. — Vol. 12. — Pp. 342–347. — DOI: 10.1016/j.acme.2012.05.004

9. Балагин Д. В. Теплоэнергетическая визуализация технических объектов как способ оценки качества их функционирования / Д. В. Балагин, А. И. Володин // Инновации для транспорта: сборник научных статей с международным участием в трех частях. Ч. 2 / Омский государственный университет путей сообщения. — Омск, 2010. — 112 с. — С. 14–17.

10. Балагин О. В. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния секций холодильников тепловозных дизелей: дисс. … канд. техн. наук / О. В. Балагин. — Омск, 2005. — 165 с.

11. Балагин О. В. Применение тепловизионного контроля в обследовании узлов тепловоза / О. В. Балагин // Тезисы докладов XXX межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Самарская гос. акад. путей сообщения. — Самара, 2003. — С. 65–66.

12. Володин А. И. Термодинамическая визуализация тепловозного дизеля как способ оценки качества его функционирования / А. И. Володин, Д. В. Балагин, А. Я. Яскин // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: сборник материалов V научно-практической конференции, посвященной Дню Российской науки. — Омск: ОмГУПС, 2011. — С. 72–78.

13. Алексеенко В. М. Тепловая диагностика элементов подвижного состава: монография / В. М. Алексеенко. — М.: Маршрут, 2006. — 398 с.

Дата поступления: 20.04.2025
Решение о публикации: 11.05.2025

**Контактная информация:**
КУДРИН Антон Михайлович — аспирант;
anton_kudrin@mail.ru
ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, проф.; 79219751198@yandex.ru
БЕЛЯЕВ Андрей Александрович — аспирант;
belyaevaa@list.ru

# Thermal Imaging Control of Power Unit Elements in Specialised Railway Rolling Stock

**A. M. Kudrin, A. A. Vorobyev, A. A. Belyaev**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** *Kudrin A. M., Vorobyev A. A., Belyaev A. A.* Thermal Imaging Control of Power Unit Elements in Specialised Railway Rolling Stock. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 419–429. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-419-429

## Summary

**The purpose:** To research the possibility of diagnostics of power unit elements in specialized railway rolling stock using passive thermal control technology. **Methods:** The following analyses were conducted: an assessment of the technical condition of the specialized railway rolling stock and internal combustion engines; an experimental study of the thermal field; and a comparative analysis of internal combustion engines with different technical parameters. Thermal imaging studies were carried out on two structurally similar YAMZ-238 engines. **Results:** The method of passive thermal control has been selected following a thorough analysis of faults and their diagnostics. The results of thermal imaging control of internal combustion engines in a fully serviceable condition, as well as those with different faults, have been described. It is concluded that there is potential for the implementation of thermal imaging control in the context of routine and field inspections of rolling stock. The thermal maps obtained provide an accurate diagnostic tool for the assessment of the technical condition of internal combustion engines and enable the identification of potential failures at different stages. Comprehensive thermal imaging control of internal combustion engines was carried out by taking pictures of internal combustion engine systems and detecting the presence or absence of malfunction in them. During the diagnostic process, the cooling system, fuel system, engine body and air-ignition system were subjected to thermal imaging. During the diagnostics, the external temperature of elements and their hermeticity were thoroughly controlled both within the body of the investigated part and in the points of their connection with other elements. **Practical significance:** A promising method of controlling the technical condition of internal combustion engines of railway rolling stock and their malfunction detection has been proposed. The research has been carried out, confirming the expediency of thermal imaging control application. The future accumulation of heat map data on engines in different technical conditions will allow for accurate fault detection and identification of its underlying cause, without the need to disassemble the internal combustion engine.

**Keywords:** Railway rolling stock, internal combustion engine, diesel engine, nondestructive testing, thermal imaging control, fault diagnostics, thermal imager, overheating.

## References

1. *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga "RZhD" na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga): Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 17.04.2018 № 769/r. Normativnye dokumenty Zapadno-Sibirskoy zheleznoy dorogi — filiala OAO "RZhD"* [Strategy for scientific and technological development of the Russian Railways holding company for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Paper): Order of Russian Railways dated 17.04.2018 № 769/r. Regulatory documents of the West Siberian Railway — a branch of Russian Railways]. Available at: http://zszd.rzd.ru/dbmm/download?vp=17&load=y&col_id=121&id=18071. (In Russian)

2. Balagin O. V. *Razrabotka tekhnologii teplovizionnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya sektsiy kholodil'nikov teplovoznykh dizeley: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development

of technology for thermal imaging monitoring of the technical condition of refrigerator sections of diesel locomotives: diss. … Cand. of Engineering Sciences]. Omsk, 2005, 165 p. (In Russian)

3. Panchenko M. N. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya teplovoznykh dizeley po neravnomernosti chastoty vrashcheniya kolenchatogo vala: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Assessment of the technical condition of diesel locomotive diesel engines by the unevenness of the crankshaft rotation frequency: diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. St. Petersburg, 2020, 208 s. (In Russian)

4. Gorbachev A. A., Vorob'ev A. A., Kudrin A. M. Metodika diagnostiki dvigateley vnutrennego sgoraniya stroitel'no-dorozhnykh mashin po akusticheskim parametram [Methodology for diagnosing internal combustion engines of road construction machines by acoustic parameters]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines]. 2022, Iss. 4, pp. 7–10. (In Russian)

5. Gyunter G. *Diagnostika dizel'nykh dvigateley. Seriya "Avtomekhanik"; per. s nem.* [Diagnostics of diesel engines. Series "Auto mechanic"; trans. from German]. Moscow: ZAO "KZhP Za rulem" Publ., 2004, 176 p. (In Russian)

6. Vavilov V. P. *Teplovye metody nerazrushayushchego kontrolya: spravochnoe izdanie* [Thermal methods of non-destructive testing: reference publication]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1991, 240 p.

7. Dudek K. Thermography as a Diagnosing System. Journal of Transdisciplinary Systems Science, 1998, vol. 3, pp. 68–79.

8. Sroka Z. J. Thermal Load of Tuned Piston. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2012, vol. 12, pp. 342–347. DOI: 10.1016/j.acme.2012.05.004

9. Balagin D. V., Volodin A. I. Teploenergeticheskaya vizualizatsiya tekhnicheskikh ob"ektov kak sposob otsenki kachestva ikh funktsionirovaniya [Thermal power engineering visualization of technical objects as a method for assessing the quality of their functioning]. *Innovatsii dlya transporta: sbornik nauchnykh statey s mezhdunarodnym uchastiem v trekh chastyakh. Ch. 2* [Innovations for transport: a collection of scientific articles with international participation in three parts. Part 2]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2010, 112 p, pp. 14–17. (In Russian)

10. Balagin O. V. *Razrabotka tekhnologii teplovizionnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya sektsiy kholodil'nikov teplovoznykh dizeley: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of technology for thermal imaging monitoring of the technical condition of refrigerator sections of diesel locomotive engines: diss. … Cand. of Engineering Sciences]. Omsk, 2005, 165 p. (In Russian)

11. Balagin O. V. Primenenie teplovizionnogo kontrolya v obsledovanii uzlov teplovoza [Application of thermal imaging control in inspection of diesel locomotive units]. *Tezisy dokladov XXX mezhvuzovskoy nauchnoy konferentsii studentov i aspirantov. Samarskaya gos. akad. putey soobshcheniya* [Abstracts of reports of the XXX interuniversity scientific conference of students and postgraduates. Samara State Academy of Railways]. Samara, 2003, pp. 65–66. (In Russian)

12. Volodin A. I., Balagin D. V., Yaskin A. Ya. Termodinamicheskaya vizualizatsiya teplovoznogo dizelya kak sposob otsenki kachestva ego funktsionirovaniya [Thermodynamic visualization of a diesel locomotive as a method for assessing the quality of its operation]. *Innovatsionnye proekty i novye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: sbornik materialov V nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu Rossiyskoy nauki* [Innovative projects and new technologies in education, industry and transport: collection of materials of the V scientific and practical conference dedicated to the Day of Russian Science]. Omsk: OmGUPS Publ., 2011, pp. 72–78. (In Russian)

13. Alekseenko V. M. *Teplovaya diagnostika elementov podvizhnogo sostava: monografiya* [Thermal diagnostics of rolling stock elements: monograph]. M.: Marshrut Publ., 2006, 398 p. (In Russian)

Received: April 20, 2025
Accepted: May 11, 2025

**Author's information:**
Anton M. KUDRIN — Postgraduate Student; anton_kudrin@mail.ru
Alexander A. VOROBEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; 79219751198@yandex.ru
Andrey A. BELYAEV — Postgraduate Student; belyaevaa@list.ru

УДК 656.212.5

# Вероятностная оценка уклона путей в сортировочном парке при реализации режима интервально–прицельного торможения

**А. А. Климов**

Сибирский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

**Для цитирования:** *Климов А. А.* Вероятностная оценка уклона путей в сортировочном парке при реализации режима интервально-прицельного торможения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 430–443. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-430-443

## Аннотация

**Цель:** Определение критериев для оценки значения уклона путей в сортировочном парке при реализации режима интервально-прицельного торможения отцепов. Действующие нормативы устанавливают одинаковые значения уклонов сортировочных путей для всех горочных станций. При этом на каждой сортировочной горке есть особенности конструкции и технического оснащения, перерабатываемый вагонопоток также имеет специфику, а метеорологические условия местности являются уникальными. Следовательно, значения уклонов сортировочных путей должны определяться с учетом указанных выше особенностей расчетным путем для каждой конкретной горки. **Методы:** При выполнении исследований использовались: требования нормативных документов к конструкции элементов продольного профиля сортировочных путей, существующие числовые характеристики основного удельного сопротивления движению вагонов и методики расчета работы удельных сил сопротивления движению вагонов при скатывании с горки. Исследование процесса накопления составов производилось методом имитационного моделирования скатывания отцепов по сортировочному пути от парковой тормозной позиции до точки остановки. Обработка результатов экспериментов выполнялась с использованием методов теории вероятностей и математической статистики. **Результаты:** Установлено, что оценка значения уклона основной части сортировочных путей может производиться на основании определения следующих показателей: вероятности недокатывания отцепов до стоящих в парке групп вагонов; вероятности соединения отцепов со стоящей в парке группой вагонов с повышенными скоростями; вероятности соответствия результатов скатывания отцепов потребным условиям эксплуатации. Приведенный метод оценки значения уклона основной части путей сортировочного парка может использоваться для сортировочных горок, на которых реализуется режим интервально-прицельного торможения. Особенностью данного режима регулирования скорости движения отцепов является отсутствие на сортировочном пути дополнительных технических средств, позволяющих воздействовать на движущийся отцеп, что определяет случайный характер процесса накопления составов, для оценки качества которого целесообразно использовать вероятностные показатели. **Практическая значимость:** Предлагаемый метод может использоваться для оценки качества функционирования сортировочных горок, а также при сравнении вариантов проектных решений при строительстве новых или реконструкции существующих сортировочных парков.

**Ключевые слова:** Уклон путей сортировочного парка, основное удельное сопротивление движению вагонов, имитационное моделирование процесса заполнения сортировочных путей, дальность пробега отцепов, скорость соударения вагонов, режимы регулирования скорости скатывания отцепов.

**Введение**

Согласно действующим нормативам [1] уклон основной части сортировочного пути проектируется на спуске 0,6 ‰ по направлению скатывания. Установленное значение уклона должно способствовать продвижению отцепов вглубь сортировочного парка (СП) и повышению качества процесса накопления составов. При заполнении путей СП должны исключаться разгоны и ускоренное движения отцепов, что может приводить к возникновению случаев их соединения со стоящими в парке вагонами с повышенными скоростями и создавать условия нарушения безопасности сортировочного процесса. Выходная часть парка (длиной 100–150 м) должна располагаться на подъеме по направлению скатывания — на противоуклоне со значением 2,0 ‰ [1], что в совокупности с укладкой охранных башмаков, установкой «барьерных групп» или дополнительных технических средств для задержания вагонов должно исключать возможность выхода подвижного состава за пределы СП.

Ранее допускались большие значения уклонов основной части сортировочного пути — от парковой тормозной позиции (ПТП) до участка выходной части, расположенной на противоуклоне:

– согласно [2] на эксплуатируемых горках с целью снижения затрат на реконструкцию допускалось проектировать начальную часть пути СП (длиной на половину состава) на спуске со значением уклона 1,0 ‰, а оставшуюся часть пути (до противоуклона) — на спуске с уклоном 0,6 ‰;

– согласно [3] основная часть пути СП должна была проектироваться в виде двухэлементного профиля: начальный участок (длиной на половину состава) располагался на спуске (до 1,0 ‰), последующий элемент (до противоуклона) — на спуске (не более 0,5 ‰), указанные условия проектирования применялись для неавтоматизированных горок.

В еще более ранних нормативах [4–6] допускалось увеличение значений уклонов сортировочного пути до 2,0 ‰, что обосновывалось эксплуатацией подвижного состава с подшипниками скольжения, имеющими большие значения сил основного сопротивления движению вагонов по сравнению с подшипниками качения.

Таким образом, в настоящее время для всех станций сети железных дорог установлено нормативное значение уклона основной части сортировочного пути — 0,6 ‰, что достаточно сложно обеспечить в реальных условиях эксплуатации, вследствие возникновения просадок участков пути и других причин, приводящих к отклонению продольного профиля подгорочного парка от проектного [7, 8]. В результате в СП образуются локальные участки пути, имеющие:

– уклоны более нормативного, что может способствовать разгону отцепов и увеличению вероятности соединения вагонов на пути СП с повышенными скоростями;

– уклоны менее нормативного (в том числе противоуклоны), что может приводить к снижению скорости скатывания отцепов (вплоть до их остановки), а в отдельных случаях и к обратному следованию — навстречу очередным отцепам, что также повышает вероятность возникновения случаев соударения вагонов с повышенными скоростями.

Одним из основных факторов, определяющих результат скатывания отцепов по сортировочному пути, является воздействие сил сопротивления движению вагонов, из которых наибольшее влияние оказывают:

– основное удельное сопротивление движению ($w_{\text{о}}$), имеющее широкий диапазон возможных значений, что значительно повышает фактор случайности при определении точки остановки отцепа на пути СП;

– удельное сопротивление движению от среды и ветра ($w_{\text{св}}$), характер действия которого также носит случайный характер, связанный не только

с особенностями воздействия ветровых нагрузок на подвижной состав (вагоны разного типа, порывистость ветра и др.), но и с текущим заполнением соседних сортировочных путей, что создает (или не создает — если соседние пути парка свободные) дополнительную защиту от ветра на вагоны, находящиеся на рассматриваемом пути.

Отдельные сортировочные станции в силу местных условий имеют отклонения продольного профиля путей сортировочных парков от нормативных значений, как следствие исторического развития и поэтапной реализации реконструктивных мероприятий в периоды действия различных нормативных требований. На таких станциях приведение продольного профиля в соответствие с действующими нормативами, как правило, требует реконструкцию не только сортировочного парка, но и горочной горловины, а также выходной горловины парка приема, вытяжных путей формирования и входной горловины парка отправления (для сортировочных станций с последовательным расположением парков), что связано со значительными затратами и в основном приводит к поиску дополнительных организационно-технологических решений или внедрением современных технических средств управления роспуском, направленных на повышение безопасности сортировочного процесса.

На большинстве горок в Российской Федерации в СП имеется одна тормозная позиция, расположенная в начальной части полезной длины сортировочного пути. Поэтому дальность пробега отцепов и показатели процесса заполнения путей СП при реализации режима интервально-прицельного торможения во многом определяются скоростью выхода отцепа с ПТП. При наличии дополнительных технических средств на сортировочных путях возможна реализация других режимов регулирования скорости скатывания отцепов, получивших распространение на зарубежных железных дорогах [9]:

– квазинепрерывного регулирования, заключающегося в использовании на всем маршруте скатывания отцепов точечных вагонных замедлителей, ускорителей и ускорителей-замедлителей;

– принудительного перемещения вагонов вглубь сортировочного парка с использованием специальных технических средств (вагоноосаживателей, робототехники и др.);

– совокупности квазинепрерывного регулирования скорости скатывания отцепов и принудительного перемещения вагонов (как правило, в СП), которые могут применяться на разных участках сортировочной горки и путей накопления составов.

При реализации указанных способов регулирования скорости скатывания отцепов уклоны путей в СП могут быть увеличены с учетом числа и места расположения дополнительных технических средств. Это приводит к увеличению капитальных затрат на реализацию проекта, а также эксплуатационных расходов на содержание и обслуживание технических средств (особенно в зимний период в регионах с большим снегоприносом). В том числе поэтому указанные режимы регулирования скорости скатывания отцепов пока не нашли широкого применения в РФ.

Наиболее распространенным режимом регулирования скорости скатывания отцепов на сети железных дорог РФ является интервально-прицельное торможение, заключающееся в создании необходимых пространственно-временных интервалов между смежными (последовательно скатывающимися) отцепами на протяжении общей для обоих отцепов части маршрута следования. Особенностью данного режима является то, что регулирование скорости скатывания отцепов производится только на тормозных позициях. Следовательно, общий запас энергии отцепа на вершине горки (в начале маршрута) должен обеспечивать достижение потребной дальности пробега с учетом его торможения на промежуточных

точках маршрута скатывания. Исключение преждевременной остановки отцепа обеспечивается конфигурацией продольного профиля спускной части (где уклоны проектируются на спуске по направлению скатывания) и путей СП, элементы которого должны также располагаться на спусках по направлению движения отцепов, что создает условия для дальнейшего движения отцепа за счет действия силы тяжести (в том числе в случаях избыточного торможения, когда отцеп может остановиться в пределах тормозной позиции).

Необходимо отметить, что при интервально-прицельном торможении последнее воздействие на движущийся отцеп можно произвести на ПТП, расположенной в начале полезной длины пути СП (устройство второй ПТП в СП допускается при определенных условиях, но большинство горок сети железных дорог РФ оборудованы одной ПТП). Дальнейшее скатывание отцепов производится по сортировочному пути, не оборудованному техническими средствами регулирования скорости скатывания, в связи с чем данный процесс следует рассматривать как случайный, а фактическая дальность пробега отцепа может оказаться как менее потребной (при недокатывании отцепа до группы вагонов и образовании на участке сортировочного пути пространственного промежутка — «окна»), так и более потребной дальности (что приведет к соединению отцепов со стоящими в парке вагонами), при этом скорость соединения вагонов может превысить допустимое значение (согласно ПТЭ — 5 км/ч для основной части отцепопотока [10]).

Таким образом, к основным причинам возникновения случаев нарушения условий безопасности процесса заполнения путей СП при роспуске и выполнения дополнительной маневровой работы при накоплении составов следует отнести:

– несоответствие значений уклонов сортировочных путей действующим нормативам вследствие отклонения продольного профиля от проектного в процессе эксплуатации или особенностей развития станции;

– реализацию режима интервально-прицельного торможения, при котором в СП после ПТП отсутствует возможность регулирования скорости движения отцепов, что определяет случайный характер его скатывания по пути накопления;

– широкий диапазон возможных значений сопротивления ($w_{\text{о}}$), которое является случайной величиной и характеризует ходовые характеристики скатывающихся вагонов;

– случайный характер воздействия на отцепы сопротивления ($w_{\text{св}}$), которое может принимать как положительные значения (уменьшать скорость движения), так и отрицательные значения — создавать условия для движения отцепов в обратном направлении.

Действующие нормативные требования к значению уклона сортировочных путей сформировались с учетом опыта эксплуатации сортировочных устройств. При этом нормативное значение уклона сортировочного пути (0,6 ‰), установленное для всех сортировочных горок сети, не является расчетной характеристикой, учитывающей специфику расположения, технического оснащения и технологии работы конкретной станции. Поэтому задача по установлению критериев для оценки значения уклона продольного профиля основной части сортировочного пути и формированию методики их определения является актуальной на современном этапе развития теории расчета сортировочных горок.

## Методы исследования

Решение данной задачи должно производиться с учетом особенностей технического оснащения СП и применяемого режима корректировки скорости движения отцепов. Так, для режима квазинепрерывного регулирования скорости, принудительного перемещения вагонов и совокупностей

указанных способов могут применяться отдельные методики, учитывающие возможность увеличения значения уклона путей в СП при расположении в парке дополнительных технических средств регулирования скорости движения отцепов.

Для режима интервально-прицельного торможения оценку значения уклона основной части сортировочного пути целесообразно производить на основании анализа дальности пробега отцепов в парке, которая также является случайной величиной, зависящей от:

– характеристик отцепа (числа вагонов в отцепе, типа и массы каждого вагона в отцепе);

– характеристик сортировочного пути (параметров плана и продольного профиля);

– метеорологических условий местности (температуры наружного воздуха, расчетного направления и скорости ветра).

Потребная дальность пробега каждого отцепа определяется по условию его докатывания до ближайшей на сортировочном пути группы вагонов и соединения с ней (при этом скорость соединения вагонов не должна превысить допустимую скорость соударения). При отсутствии в СП дополнительных технических средств для корректировки скорости движения отцепов задача определения потребной дальности пробега для каждого отцепа сводится к установлению необходимой скорости выхода отцепа с ПТП, обеспечивающей достижение указанного результата. В условиях эксплуатации необходимая скорость выхода отцепа с ПТП определяется:

– на автоматизированных горках с использованием подсистемы контроля заполнения сортировочных путей (КЗП);

– на механизированных горках — оператором тормозной позиции;

– на немеханизированных горках — регулировщиком скорости движения вагонов.

Во всех случаях необходимая скорость выхода отцепа с ПТП определяется с учетом ряда указанных выше факторов, которые в основном являются случайными величинами и могут изменяться в процессе следования отцепа по пути накопления состава. Вследствие этого, возникают случаи недостижения отцепами расчетной точки остановки на пути СП. В результате на пути накопления образуются «окна» — свободные участки пути (пространственные промежутки между вагонами). Либо возникают случаи, когда отцеп докатывается до находящегося на пути накопления подвижного состава, но соединение вагонов может производиться как с допустимыми значениями скоростей, так и с повышенными скоростями.

В связи с этим предлагается производить оценку значения уклона основной части путей СП с использованием следующих критериев:

1. Вероятности превышения допустимой скорости соединения отцепов с вагонами, находящимися на пути накопления составов ($P_1$).

2. Вероятности недокатывания отцепов до стоящих в парке вагонов и образования «окон» ($P_2$).

3. Вероятности докатывания отцепов до стоящих в парке вагонов и соединения с допустимой скоростью ($P_3$).

Расчет указанных критериев производится для каждого ($i$-го) отцепа по результатам моделирования скатывания по сортировочному пути от ПТП до места остановки. Каждый критерий может быть определен и в целом для всего накапливаемого состава по формуле:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_i}{n}, \qquad (1)$$

где $p_i$ — соответствующая вероятность для каждого $i$-го отцепа, направляемого на путь накопления;

$n$ — число отцепов в накопленном составе.

Результаты расчета вероятностей как для каждого отцепа, так и для всего накапливаемого состава должны соответствовать условию:

$$P_1 + P_2 + P_3 = 1. \quad (2)$$

Выбор наилучшего варианта следует производить по условию:

$$\begin{cases} P_1 \to \min \\ P_2 \to \min \\ P_3 \to \max \end{cases}. \quad (3)$$

В качестве комплексного критерия, характеризующего процесс накопления всего состава на рассматриваемом пути СП, также используется критерий, отражающий общий показатель процесса заполнения — среднее число осаживаний, приходящееся на один накопленный состав ($N_{\text{ос}}$).

Учитывая то, что наилучшими и наихудшими ходовыми свойствами обладают отцепы из одиночных вагонов, для оценки значения уклона основной части сортировочных путей моделируется скатывание одиночных вагонов. В качестве примера расчет произведен для вагонов, имеющих наибольший разброс возможных значений случайной величины $w_{\text{о}} \in [0{,}5; 4{,}5]$ Н/кН ([2]) — для легкой весовой категории.

Скатывание отцепов производилось для расчетных неблагоприятных метеорологических условий, определенных для одного расчетного месяца по методике [11]. Скорость выхода отцепов с ПТП определялась с учетом потребной дальности пробега каждого отцепа, при этом скатывание на свободный сортировочный путь производилось со скоростью, рассчитанной с учетом технических характеристик замедлителей ПТП.

Оценка значения уклона основной части пути накопления составов производилась на основании результатов имитационного моделирования процесса заполнения путей СП (с использованием специализированного программного комплекса, разработанного в СГУПСе [12]). Для заданных условий производилось моделирование движения отцепов по сортировочному пути от нижнего конца ПТП до точки остановки (или до ближайшего вагона, находящегося на сортировочном пути), на основании чего определялись установленные критерии оценки процесса накопления всего состава [13, 14].

Результаты моделирования использовались для оценки значений уклона основной части сортировочного пути. При необходимости указанные критерии можно использовать для сравнения вариантов конструкции продольного профиля сортировочных парков автоматизированных, механизированных и немеханизированных горок, где реализуется режим интервально-прицельного торможения отцепов.

При имитационном моделировании скорость выхода отцепа в парк (с ПТП) определялась обратным счетом по условию докатывания до заданной точки остановки. Расчет выполнялся для средних значений величины $w_{\text{о}}$ легкой весовой категории. Фактическая дальность пробега отцепа определялась как среднее значение для серии из 500 экспериментов по скатыванию одного и того же одиночного вагона определенного типа (с одинаковыми значениями массы), но с разными значениями сопротивления ($w_{\text{о}}$), которые генерировались автоматически на основании заданных числовых характеристик.

## Результаты исследований

По результатам имитационного моделирования процесса заполнения сортировочного пути определены следующие показатели (табл. 1).

По результатам моделирования установлено, что для накопления состава установленной длины на рассматриваемый путь необходимо направить 68 отцепов из одиночных вагонов. Так как моделировалось движение вагонов легкой весовой категории, оценка качества заполнения путей СП фактически производилась по результатам скатывания «плохих» и «очень плохих бегунов» в неблагоприятных условиях. В результате для заполнения всего пути накопления потребо-

Таблица 1. Фрагмент результатов моделирования процесса заполнения сортировочного пути (отцепы из одиночных вагонов, легкая весовая категория, условия неблагоприятные)

| Номер отцепа | Масса отцепа, т | Показатели процесса заполнения пути | | | Средняя фактическая дальность пробега, м |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | |
| **Группа № 1** (скатывание производится на свободный сортировочный путь) | | | | | |
| 1 | 25 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 478 |
| 2 | 24 | 0,318 | 0,504 | 0,178 | 433 |
| 3 | 22 | 0,322 | 0,454 | 0,224 | 417 |
| 4 | 23 | 0,346 | 0,416 | 0,238 | 362 |
| 5 | 24 | 0,282 | 0,454 | 0,264 | 328 |
| 6 | 26 | 0,268 | 0,448 | 0,284 | 293 |
| 7 | 25 | 0,254 | 0,462 | 0,284 | 262 |
| 8 | 25 | 0,184 | 0,510 | 0,306 | 229 |
| 9 | 23 | 0,186 | 0,454 | 0,36 | 201 |
| 10 | 23 | 0,138 | 0,470 | 0,392 | 174 |
| 11 | 25 | 0,106 | 0,466 | 0,428 | 148 |
| 12 | 23 | 0,054 | 0,470 | 0,476 | 124 |
| 13 | 27 | 0,016 | 0,458 | 0,526 | 101 |
| 14 | 27 | 0,000 | 0,442 | 0,558 | 80 |
| 15 | 22 | 0,000 | 0,436 | 0,564 | 60 |
| 16 | 24 | 0,000 | 0,492 | 0,508 | 41 |
| 17 | 27 | 0,000 | 0,418 | 0,582 | 24 |
| 18 | 24 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 8 |
| **Группа № 2** (оставшаяся часть пути после осаживания группы № 1) | | | | | |
| 19 | 24 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 473 |
| … | … | … | … | … | … |

валось выполнить 4 осаживания, при этом необходимость выполнения осаживания возникала после скатывания отцепов № 18, 36, 53 и 63, когда оставшаяся свободная часть сортировочного пути (потребная дальность пробега) была меньше длины следующего отцепа.

Графическая интерпретация вероятности соединения вагонов с повышенной скоростью ($P_1$) для рассматриваемого варианта накопления состава на сортировочном пути приведена на рис. 1.

Согласно рис. 1, накопление состава произведено четырьмя группами, при этом фактически состав образовался из 5 групп вагонов. Из-за незначительной длины свободной части сортировочного пути, оставшейся для накопления групп № 4 и 5, вероятность соединения вагонов с повышенной скоростью ($P_1$) для указанных групп вагонов уменьшается по мере приближения к ПТП, что и отражено на рис. 1.

Наибольшую вероятность превышения допустимой скорости соударения вагонов имеют первые вагоны каждой группы с последующим убыванием значений $P_1$ по мере заполнения пути СП и сокращения оставшейся свободной части пути (потребной дальности пробега). Соотношение вероятности соединения вагонов с повышенной скоростью и фактической дальности пробега отцепов на примере первой группы вагонов накапливаемого состава приведено на рис. 2.

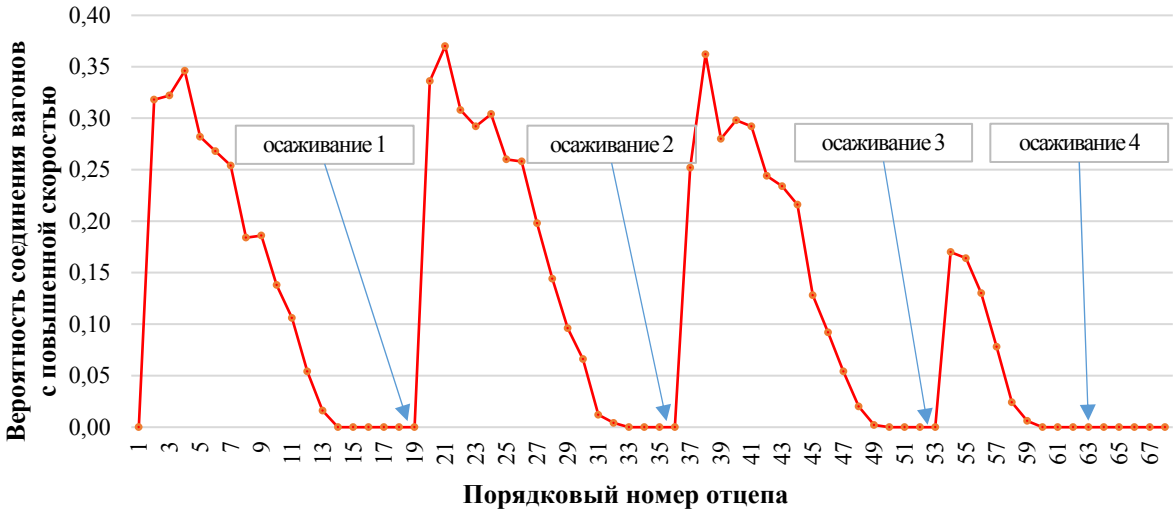



**Рис. 1.** Изменение вероятности соединения вагонов с повышенной скоростью ($P_1$) при накоплении состава из одиночных порожних вагонов, условия неблагоприятные

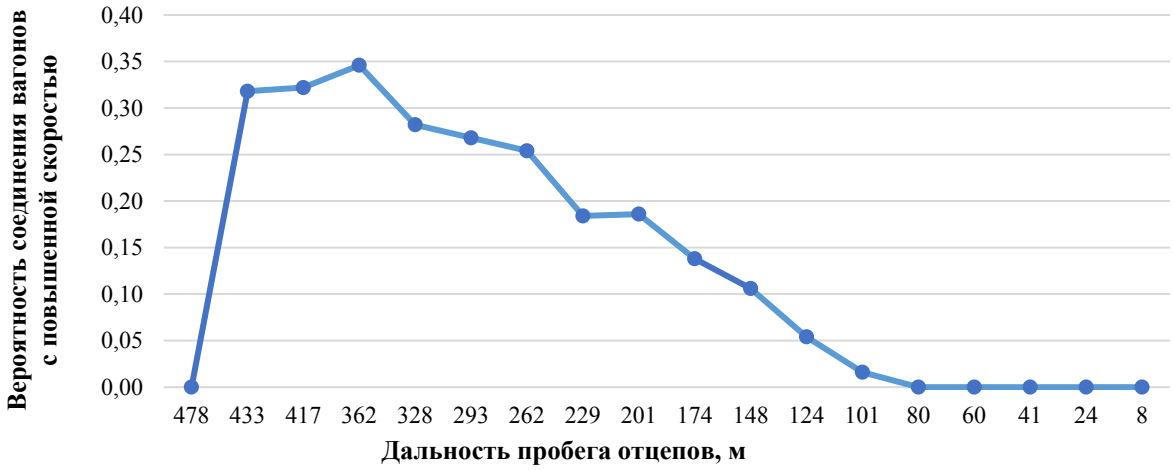



**Рис. 2.** Соотношение фактической дальности пробега отцепов и вероятности соединения вагонов с повышенной скоростью, группа № 1

Таким образом, для неблагоприятных условий, при скатывании одиночных вагонов легкой весовой категории («плохих бегунов») и нормативном значении уклона основной части сортировочного пути (0,6 ‰) получены следующие результаты:

– максимальная дальность пробега отцепов на свободный сортировочный путь составляет около 480 м (значение получено с учетом ограничения по скорости входа на замедлители ПТП и, как следствие, скорости выхода отцепов с парковой тормозной позиции);

– обеспечение вероятности превышения допустимой скорости соударения вагонов на уровне $P_1$ = 0,0 достигается только для начального участка сортировочного пути длиной не более 100 м от ПТП.

Необходимо отметить, что в данном случае приведены результаты расчета для неблагоприятных условий работы и в реальных условиях эксплуатации показатели процесса заполнения сортировочного пути при роспуске отцепопотока с разным числом вагонов могут быть лучше.

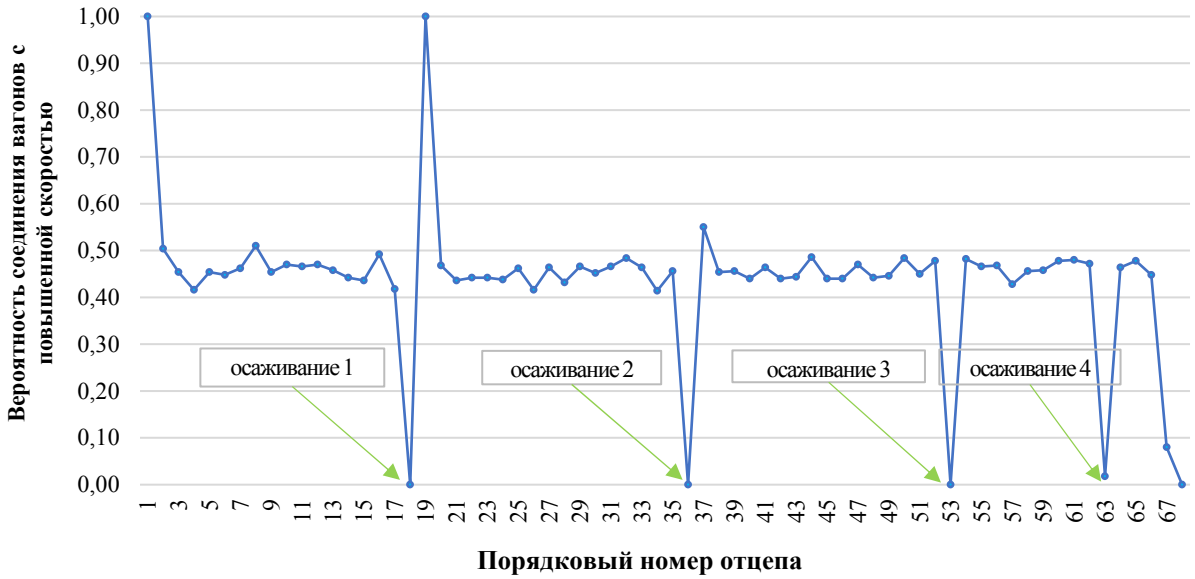



**Рис. 3.** Вероятность недокатывания отцепа до стоящей на сортировочном пути группы вагонов ($P_2$) при накоплении состава из одиночных порожних вагонов, условия неблагоприятные

Кроме того, на автоматизированных сортировочных горках, оборудованных системой КЗП, значение скорости выхода отцепов с ПТП определяется с учетом ходовых характеристик каждого отцепа, рассчитанных по результатам прохождения предыдущих контрольных точек по маршруту скатывания. В связи с этим в реальных условиях эксплуатации автоматизированных сортировочных горок вероятность докатывания отцепов до стоящих в парке вагонов и соединения с ними с допустимой скоростью ($P_3$) будет увеличиваться.

Графическая интерпретация вероятности преждевременной остановки отцепов (недокатывания до стоящей на пути накопления группы вагонов — $P_2$) приведена на рис. 3.

Согласно рис. 3, основная часть отцепов имеет значение вероятности около $P_2 = 0,45$, что объясняется широким диапазоном возможных значений основного удельного сопротивления движению и точностью выполнения расчетов — при моделировании перемещение отцепа рассчитывается с шагом 1 см. Первые отцепы групп № 1 и 2 имеют вероятность $P_2 = 1,0$, так как длина свободного участка пути более потребной дальности пробега. Вероятность $P_2 = 0,0$ для последних отцепов каждой группы (так как в данном случае длина оставшейся части пути менее длины последующего скатывающего отцепа) — по данному значению и определяется потребность выполнения осаживания очередной группы вагонов на сортировочном пути.

Графическая интерпретация вероятности выполнения необходимых условий заполнения сортировочного пути, когда отцеп должен докатиться до ближайшей группы вагонов и соединиться с ней с допустимой скоростью ($P_3$) приведена на рис. 4.

Согласно рис. 4 значение вероятности увеличивается по мере заполнения сортировочного пути и достигает значения $P_3 = 1,0$ для отцепов, после скатывания которых необходимо выполнять осаживание.

Результаты расчета рассматриваемых критериев оценки значения уклона основной части сортировочного пути по результатам моделирования накопления всего состава приведены на рис. 5.

Согласно полученным результатам для принятых условий проведения экспериментов веро-

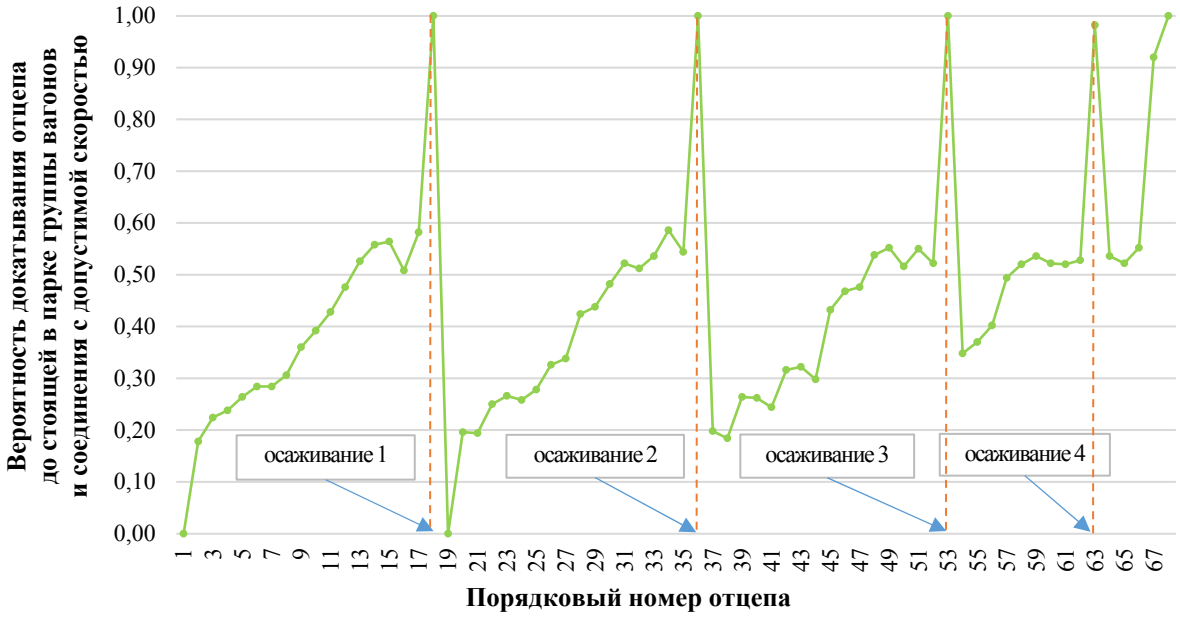



**Рис. 4.** Вероятность докатывания отцепа до стоящей на сортировочном пути группы вагонов и соединения с допустимой скоростью ( $P_2$ ) при накоплении состава из одиночных порожних вагонов, условия неблагоприятные

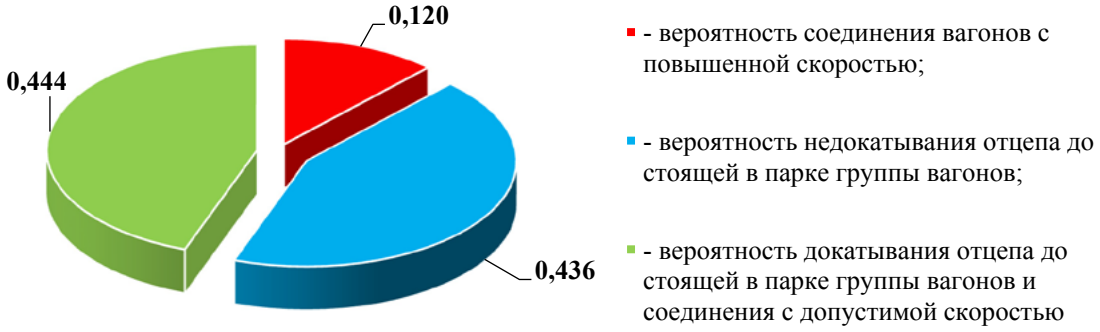



**Рис. 5.** Распределение вероятностей $P_1$, $P_2$ и $P_3$ по результатам моделирования накопления состава на сортировочном пути

ятность превышения допустимой скорости соединения вагонов при накоплении всего состава на сортировочном пути при роспуске достигает значения $P_1 = 0{,}12$. Полученное значение рекомендуется использовать при сравнении вариантов конструкции продольного профиля основной части пути СП.

## Выводы

Разработанный метод вероятностной оценки значения уклона основной части пути накопления составов можно использовать и при сравнении вариантов конструкции продольного профиля сортировочных парков. Полученные результаты показывают, что установленные нормативные значения уклона сортировочного пути (0,6 ‰) не гарантируют соблюдение условий обеспечения безопасности сортировочного процесса при реализации режима интервально-прицельного торможения. Сравнение вариантных значений уклона основной части сортировочного пути для каждой станции в первую очередь целесообразно проводить по критерию вероятности превышения допустимой скорости соединения вагонов ( $P_1$ ).

**Благодарности**

Исследование выполнено в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

**Список источников**

1. СП 119.13330.2024. СНИП 32-01-95. Свод правил. Железные дороги колеи 1520 мм: утв. Мин. строит. и жил.-коммун. хоз. РФ, 01.07.2024, № 432/пр.

2. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм: утв. МПС РФ 10.10.03. — М.: Техинформ, 2003. — 168 с.

3. Инструкция по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР: ВСН 56-78. — Введ. 01.01.1979 / Минтрансстрой СССР, МПС СССР. — М.: Транспорт, 1978. — 175 с.

4. Технические указания на проектирование станций и узлов: утв. МПС СССР 24.11.1947 / ВНИИ ж.-д. трансп. — М.: Трансжелдориздат, 1948. — 124 с.

5. Технические указания по проектированию станций и узлов на железных дорогах общей сети Союза ССР: ВСН 56-61: утв. МПС СССР 12.06.1961. — М.: Трансжелдориздат, 1961. — 151 с.

6. Технические указания по проектированию станций и узлов на железных дорогах общей сети Союза ССР: изменения и дополнения № 1: ВСН 56-65: утв. МПС СССР 30.07.1965. — М.: Оргтрансстрой, 1965. — 26 с.

7. Боровлев П. В. Оценка отклонения профиля пути сортировочного парка в режиме реального времени / П. В. Боровлев // Железная дорога: путь в будущее: сборник материалов I Международной научной конференции аспирантов и молодых ученых, Москва, 28–29 апреля 2022 года. — М.: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2022. — С. 300–304.

8. Коваленко Н. А. Факторы, определяющие величину и нормы закрепления «барьерных групп» / Н. А. Коваленко, А. А. Бородин, К. А. Тарасов // Мир транспорта. — 2019. — Т. 17. — № 6(85). — С. 242–257. — DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-242-257.

9. Шейкин В. П. Эффективность систем квазинепрерывного регулирования скорости отцепов на сортировочных горках с использованием точечных вагонных заместителей / В. П. Шейкин, В. А. Кобзев, В. И. Метельский // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 1992. — № 5. — С. 17–21.

10. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утв. приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250. — М.: ИНФРА-М, 2022. — 561 с.

11. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР: ВСН 207-89 / МПС СССР. — М.: Транспорт, 1992. — 104 с.

12. Свид. 2023618062 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета показателей процесса заполнения путей сортировочного парка / А. А. Климов, А. А. Гунбин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО СГУПС (RU). — № 2023616946; заявл. 11.04.2023; опубл. 18.04.2023.

13. Климов А. А. Принципы моделирования процесса заполнения путей сортировочного парка при расформировании составов / А. А. Климов // Политранспортные системы: материалы XII Международной научно-технической конференции. В 3 частях, Новосибирск, 21–22 сентября 2022 года. Часть 3. — Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2022. — С. 126–131.

14. Климов А. А. Анализ уклона сортировочных путей в современных условиях эксплуатации / Климов А. А. // Пятая международная научно-практическая конференция «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах» (Санкт-Петербург, 11–13 октября 2023 г.): сборник трудов : в 2 частях / Под ред. О. С. Валинского, А. А. Краснощека, П. К. Рыбина. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023. — Ч. 1. — С. 85–94.

Дата поступления: 24.04.2025
Решение о публикации: 10.05.2025

**Контактная информация:**
КЛИМОВ Александр Александрович — канд. техн. наук, доц.; a-aklimov@yandex.ru

# Probabilistic Assessment of the Marshalling Yard Track Gradient when Implementing the Interval–Targeted Braking Mode

**A. A. Klimov**

Siberian Transport University, 191, Dusi Kovalchuk Str., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

**For citation:** *Klimov A. A.* Probabilistic Assessment of the Marshalling Yard Track Gradient when Implementing the Interval-Targeted Braking Mode. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 430–443. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-430–443

## Summary

**Purpose:** To establish the criteria for evaluating the track gradient in a marshalling yard when implementing the interval-targeted braking mode. The prevailing regulatory framework stipulates uniform values for the sorting track gradients across all gravity hump stations. It is important to note that each sorting hump is designed and equipped differently, and each has its own specific wagon flow. Furthermore, the meteorological conditions of different areas are unique. Consequently, the sorting track gradients should be calculated with reference to the aforementioned features for each specific gravity hump. **Methods:** The following research methods were employed: an analysis of the regulatory documents for the design of elements of the sorting track longitudinal profile; the existing numerical characteristics of the main specific resistance to the movement of wagons; and the methods for calculating the specific resistance forces acting on the wagons rolling down the gravity hump. The study of the accumulation of wagons was carried out using the method of imitation modelling of the wagon cuts rolling down the marshalling yard sorting tracks from the braking position to the stopping point. The experimental results were analyzed using the probability theory and mathematical statistics. **Results:** It has been determined that the assessment of the sorting track gradient can be conducted by determining the following indicators: the probability of uncoupled wagons being under-rolled to the designated wagon groups in the yard; the probability of wagon cuts being attached to a designated wagon group at a higher speed in the yard; and the compliance of the moving wagon cuts with the required operating conditions. The given method of estimating the sorting yard track gradient can be used for gravity humps on which the interval-targeted braking mode is implemented. The method's distinctive feature is that it does not involve the use of additional technical mechanisms along the sorting track that influence the rolling wagon cuts. The random nature of train accumulation is determined by this absence. To assess its quality, it is recommended that probabilistic indicators be used. **Practical significance:** The proposed method can be used to assess the performance of gravity humps, as well as to compare design options for the construction of new sorting yards or the reconstruction of existing ones.

**Keywords:** marshalling yard track gradient, the main specific resistance to the movement of wagons, simulation modelling of sorting track filling process, the run distance of the wagon cuts, speed of wagon collision, speed regulating modes for wagon cuts rolling.

## References

1. *SP 119.13330.2024. SNIP 32-01-95. Svod pravil. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm: utv. Min. stroit. i zhil.-kommun. khoz. RF, 01.07.2024, № 432/pr* [SP 119.13330.2024. SNiP 32-01-95. Code of Practice. 1520 mm Gauge Railways: approved. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, 01.07.2024, № 432/pr]. (In Russian)

2. *Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm: utv. MPS RF 10.10.03* [Rules and Standards for the Design of Marshalling Facilities on 1520 mm Gauge Railways:

approved. MPS RF 10.10.03]. Moscow: Tekhinform Publ., 2003, 168 p. (In Russian)

3. *Instruktsiya po proektirovaniyu stantsiy i uzlov na zheleznykh dorogakh Soyuza SSR: VSN 56-78, vved. 01.01.1979, Mintransstroy SSSR, MPS SSSR* [Instructions for the Design of Stations and Junctions on Railways of the USSR: VSN 56-78, introduced 01.01.1979, USSR Ministry of Transport Construction, USSR MPS]. Moscow: Transport Publ., 1978, 175 p. (In Russian)

4. *Tekhnicheskie ukazaniya na proektirovanie stantsiy i uzlov: utv. MPS SSSR 24.11.1947, VNII zh.-d. transp.* [Technical guidelines for the design of stations and junctions: approved by the USSR MPS on 24.11.1947, VNII zh.-d. transp.]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1948, 124 p. (In Russian)

5. *Tekhnicheskie ukazaniya po proektirovaniyu stantsiy i uzlov na zheleznykh dorogakh obshchey seti Soyuza SSR: VSN 56-61: utv. MPS SSSR 12.06.1961* [Technical guidelines for the design of stations and junctions on the railways of the common network of the USSR: VSN 56-61: approved by the USSR MPS on 12.06.1961]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1961, 151 p. (In Russian)

6. *Tekhnicheskie ukazaniya po proektirovaniyu stantsiy i uzlov na zheleznykh dorogakh obshchey seti Soyuza SSR: izmeneniya i dopolneniya № 1: VSN 56-65: utv. MPS SSSR 30.07.1965* [Technical guidelines for the design of stations and junctions on the railways of the common network of the USSR: amendments and additions № 1: VSN 56-65: approved by the USSR MPS on 30.07.1965]. Moscow: Orgtransstroy Publ., 1965, 26 p. (In Russian)

7. Borovlev P. V. Otsenka otkloneniya profilya puti sortirovochnogo parka v rezhime real'nogo vremeni [Estimation of the deviation of the track profile of the marshalling yard in real time]. *Zheleznaya doroga: put' v budushchee: sbornik materialov I Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii aspirantov i molodykh uchenykh, Moskva, 28–29 aprelya 2022 goda* [Railway: the path to the future: collection of materials of the I International Scientific Conference of graduate students and young scientists, Moscow, April 28–29, 2022]. M.: Nauchno-issledovatel'skiy institut zheleznodorozhnogo transporta Publ., 2022, pp. 300–304. (In Russian)

8. Kovalenko N. A., Borodin A. A., Tarasov K. A. Faktory, opredelyayushchie velichinu i normy zakrepleniya "bar'ernykh grupp" [Factors determining the size and standards of fixing "barrier groups"]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2019, vol. 17, Iss. 6(85), pp. 242–257. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-242-257. (In Russian)

9. Sheykin V. P., Kobzev V. A., Metel'skiy V. I. Effektivnost' sistem kvazinepreryvnogo regulirovaniya skorosti ottsepov na sortirovochnykh gorkakh s ispol'zovaniem tochechnykh vagonnykh zamestiteley [Efficiency of quasi-continuous speed control systems for uncoupled trains on hump yards using point wagon substitutes]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the All-Union Research Institute of Railway Transport]. 1992, Iss. 5, pp. 17–21. (In Russian)

10. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii: utv. prikazom Mintransa Rossii ot 23.06.2022 № 250* [Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation: approved. by order of the Ministry of Transport of Russia dated 23.06.2022 № 250]. Moscow: INFRA-M Publ., 2022, 561 p. (In Russian)

11. *Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh Soyuza SSR: VSN 207-89, MPS SSSR* [Rules and standards for the design of marshalling devices on the railways of the USSR: VSN 207-89, MPS USSR]. Moscow: Transport Publ., 1992, 104 p. (In Russian)

12. Klimov A. A., Gunbin A. A. *Programma dlya rascheta pokazateley protsessa zapolneniya putey sortirovochnogo parka* [Program for calculating the indicators of the process of filling the tracks of a marshalling yard]. Svidetel'stvo RF, no. 2023618062, 2023. (In Russian)

13. Klimov A. A. Printsipy modelirovaniya protsessa zapolneniya putey sortirovochnogo parka pri rasformirovanii sostavov [Principles of modeling the process of filling the tracks of a marshalling yard during the disbanding of trains]. *Politransportnye sistemy: materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. V 3 chastyakh, Novosibirsk, 21–22 sentyabrya 2022 goda. Chast' 3* [Polytransport systems: materials of the XII International scientific and technical conference. In 3 parts, Novosibirsk,

September 21–22, 2022. Part 3]. Novosibirsk: Sibirskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2022, pp. 126–131. (In Russian)

14. Klimov A. A. Analiz uklona sortirovochnykh putey v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii [Analysis of the slope of marshalling tracks under modern operating conditions]. *Pyataya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh" (Sankt-Peterburg, 11–13 oktyabrya 2023 g.): sbornik trudov: v 2 chastyakh; pod red. O. S. Valinskogo, A. A. Krasnoshcheka, P. K. Rybina* [Fifth international scientific and practical conference "Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems" (St. Petersburg, October 11–13, 2023): collection of papers: in 2 parts; ed. O. S. Valinsky, A. A. Krasnoshchek, P. K. Rybin]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2023, part 1, pp. 85–94. (In Russian)

Received: April 24, 2025
Accepted: May 10, 2025

**Author's information:**
Aleksandr A. KLIMOV — PhD in Engineering, Associate Professor; a-aklimov@yandex.ru

УДК 621.332.3

# Особенности проектирования контактной сети в современных условиях

**А. В. Агунов, Д. Д. Иванов**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Агунов А. В., Иванов Д. Д.* Особенности проектирования контактной сети в современных условиях // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 444–454. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-444-454

## Аннотация

**Цель:** Произвести анализ, направленный на выявление ограничений, связанных с применением существующих модификаций контактной подвески и методов их расчета в современных условиях. **Методы:** Разработана математическая модель расчета цепной полукомпенсированной контактной подвески на основе метода конечных элементов (далее — МКЭ), с реализацией этой модели в программном комплексе ANSYS Workbench. Для подтверждения эффективности разработанной модели произведено сравнение результатов расчетов, полученных с помощью данной МКЭ-модели, с результатами, полученными по существующей методике. Это позволило оценить преимущества и недостатки каждого подхода и обосновать необходимость перехода на более современные и точные методы расчета. **Результаты:** Анализ показал, что существующие методы расчета контактных подвесок не учитывают реальные условия, что может вызывать недочеты как в проектировании, так и в эксплуатации. В процессе работы продемонстрирована необходимость совершенствования существующих методов и их адаптации к реалиям, с акцентом на внедрение современных подходов, таких как математическое моделирование, что позволит значительно увеличить точность и достоверность расчетов. **Практическая значимость:** Различия в расчетах подчеркивают необходимость внедрения современных методов для определения параметров контактной сети, особенно при тяжелых условиях. Модели с применением метода конечных элементов обладают широким функционалом, позволяя учитывать такие факторы, влияющие на работу контактной сети, как ток, температура нагрева и изменение натяжения проводов. Они могут быть эффективно использованы специалистами в проектировании, в том числе при переходе к технологии BIM и в научной деятельности.

**Ключевые слова:** Контактная сеть, контактная подвеска, несущий трос, контактный провод, температура нагрева провода, стрела провеса, натяжение несущего троса.

## Введение

Основным потребителем электрической энергии на электрифицированных железных дорогах является электроподвижной состав (ЭПС), относящийся к первой категории по надежности электроснабжения [1], питание которого должно осуществляться от двух независимых взаиморезервирующих источников питания [2]. Контактная подвеска как часть тяговой сети является сложным инженерным сооружением, обеспечивающим процесс передачи электроэнергии к ЭПС для осуществления необходимых производственных и технологических операций. Однако ввиду конструктивных особенностей, не позволяющих выполнить резервирование, к ней предъявляют ряд особых требований.

Сегодня в Российской Федерации широкое распространение получила модификация контактной сети (КС) КС-160, разработанная в 2001–2009 гг. в нескольких вариантах по роду тока и способу натяжения проводов. Стратегия развития транспорта в Российской Федерации подразумевает развитие тяжеловесного движения, увеличение удельного веса и длины поездов, а также развитие железных дорог с максимальной скоростью движения 160 километров в час и более [3]. Рост объемов и темпов перевозок сопровождается высокими токовыми нагрузками на контактную сеть, при которых температура нагрева проводов может достигать, а в некоторых случаях и превысить допустимые для медного несущего троса (НТ) 100 °С [4], а для низколегированного медного контактного провода (КП) — 80 °С [5]. Однако существующие модификации контактных сетей не рассчитаны для таких условий работы. При нагреве проводов до температур, близких к экстремальным, значительно увеличивается риск повреждений, вызванных нарушениями вертикального габарита контактной подвески.

## Контактная сеть в современных условиях проектирования и эксплуатации

Во исполнение поручения президента Российской Федерации [6] реализован комплекс мероприятий по развитию доступности центрального транспортного узла. Так, в рамках объекта «Организация пригородно-городского пассажирского железнодорожного движения на участке Крюково — Раменское (МЦД-3)» в период с 2022 по 2024 г. реализовано строительство парка экипировки электропоездов ЭГЭ2Тв-024 «Иволга-4.0», электрифицированного по системе тягового электроснабжения постоянного тока с полукомпенсированной контактной сетью по проекту КС-160. Московские центральные диаметры (МЦД) представляют собой сеть железнодорожных маршрутов для пригородных электропоездов, проложенных через центр столицы, при этом интервал движения поездов по ним составляет в среднем 5 минут. Контактная сеть нового парка по балансовой и эксплуатационной ответственности относится к Панковской дистанции электроснабжения (ЭЧ-3) Московской дирекции по энергообеспечению Трансэнерго — филиала ОАО «РЖД». Упрощенный фрагмент схемы питания и секционирования парка экипировки представлен на рис. 1.

На I и II главных путях смонтирована контактная подвеска М-120+2хНлФ-100+2М 120, а на боковых путях — М-120+2хНлФ-100. Технология работы нового парка предусматривает подготовку ЭПС перед отправкой в рейс (в направлении МЦД-3), а также прием и отправление грузовых поездов массами до 6000 т в Рязанском направлении. Процесс подготовки электропоезда в рейс связан с потреблением из тяговой сети электроэнергии собственных нужд для обогрева (в зимний период) или охлаждения (в летний период) пространства для пассажиров, заряда аккумуляторных батарей и других технологических операций. На электропоездах «Иволга» установлены тяговые двигатели мощностью 380 кВт и преобразователи собственных нужд типа ПСН-200-У1 максимальной выходной мощностью 175 кВт.

Согласно данным Панковской дистанции электроснабжения, в 2024 г. при одновременном нахождении электропоездов типа «Иволга», готовящихся в рейс на 33Д–40Д путях, и грузового поезда массой 6000 т с локомотивом 2ВЛ-10, находящегося в режиме тяги на 53 пути, нарушился вертикальный габарит контактной подвески на 33Д, 35Д и 53 путях вследствие нагрева проводов контактной подвески до температуры, близкой или выше допустимой по термическому разуплотнению провода, что привело к значительному нарушению графика движения поездов. Дистанциями электроснабжения ежегодно составляется проект планово-предупредительных работ в целях предупреждения возникновения

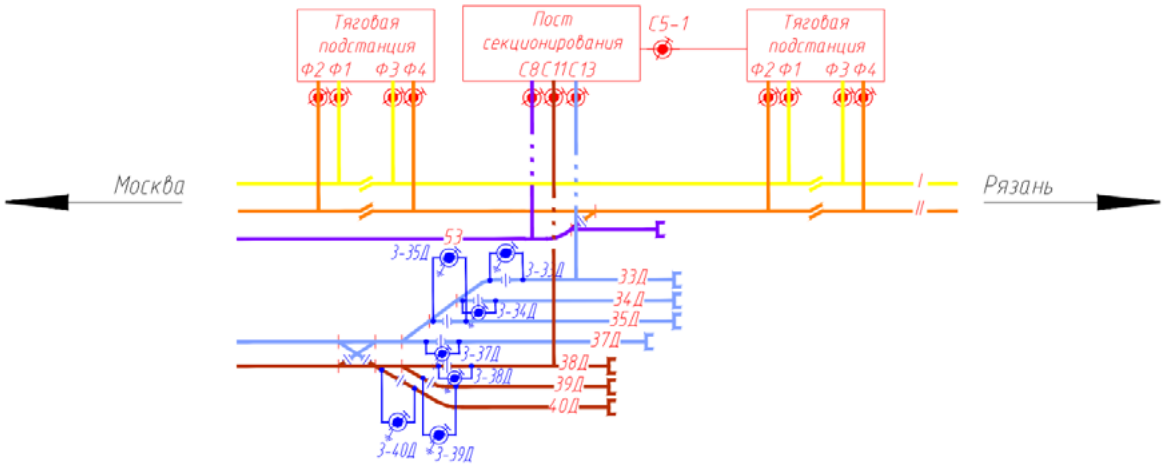



**Рис. 1.** Фрагмент схемы питания и секционирования парка экипировки поездов

отказов технических средств, однако темпы роста железнодорожных перевозок часто не позволяют полностью исключить вероятность отказа. На рис. 2 представлена диаграмма отказов технических средств на контактной сети Панковской дистанции электроснабжения с разделением по годам.

Опыт применения типовой КС-160 на особо грузонапряженных участках или с интенсивным пассажирооборотом не ставит под сомнение возможность использования данной модификации в современных условиях. Однако ввиду того, что существующая типовая КС разрабатывалась без учета перспективы увеличения токовых нагрузок, на ряде участков возникает рост интенсивности отказов технических средств.

Проектная документация и результаты инженерных изысканий, реализация которых выполняется в рамках стратегии ОАО «РЖД», — это комплексные инфраструктурные проекты, источниками финансирования которых являются как средства ОАО «РЖД», так и средства федерального бюджета. Применение технологии BIM-моделирования с выходом постановлений Правительства РФ [7, 8] стало обязательным при разработке проектной документации на объектах, финансирование которых осуществляется из государственного бюджета вне зависимости от их сметной стоимости. Проектирование объектов железнодорожной инфраструктуры с применением BIM находится еще на своем начальном

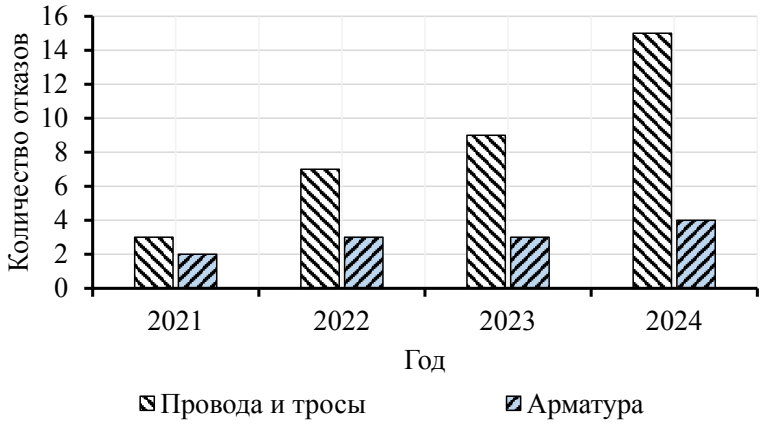



**Рис. 2.** Количество отказов на контактной сети с разделением по годам

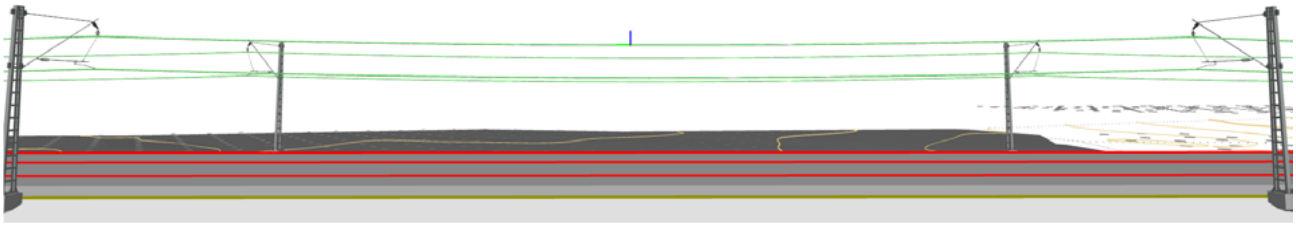


**Рис. 3.** Визуализация информационной модели железнодорожного участка с контактной сетью, выполненная на базе «Топоматик Robur — Инженерные сети»

этапе, однако согласно [1] на объектах железнодорожного транспорта заказчик оставляет за собой право включения в задание на проектирование требований по разработке документации в формате информационной модели.

В настоящее время разработан ряд программного обеспечения, использующего технологию BIM. Для объектов ОАО «РЖД» проектирование ведется на базе программного комплекса «Топоматик Robur — Инженерные сети» (разработка НПФ «Топоматик») с базой данных по контактной сети, не имеющей аналогов. На рис. 3 приведен фрагмент визуализации информационной модели железнодорожного участка с контактной сетью, разработанной одним из проектных институтов транспортного строительства при участии автора.

Как видно из рис. 3, имитационное моделирование в данном ПО в части проводов контактной подвески достаточно условное, не учитывающее реальные стрелы провеса проводов, расстановку звеньевых струн, рессорных тросов и тросов средней анкеровки. Это связано с отсутствием возможности проведения механических расчетов КС в данной программе. Опыт проектирования контактной сети показывает возможность применения данного ПО только при достаточно простых условиях, например новое строительство в «чистом поле». При усложнении исходных данных, которые требуют учета соблюдения вертикального габарита контактной подвески (строительство путепроводов, пересекающих ж/д пути; тоннелей или мостов «с ездой по низу»), выполнение механических расчетов с построением стрел провеса проводов является острым вопросом при полноценном отказе от 2D-проектирования. Данный факт показывает необходимость расширения существующих возможностей BIM-проектирования в сторону учета реальных условий и требований к проектированию.

## Существующие методы расчета цепных контактных подвесок

Работа КС обусловлена различными сочетаниями нагрузок по [9]. Полукомпенсированные контактные подвески сильнее подвержены температурным перемещениям проводов по сравнению с компенсированными. Это связано с отсутствием компенсаторов температурных удлинений в узле анкеровки несущего троса на анкерной опоре. Сегодня для расчета пространственного положения проводов полукомпенсированной контактной подвески применяют расчеты, основанные на решении уравнения состояния и уравнения равновесия, которые рассмотрены в работе [10].

Для подвесок с простыми опорными струнами вертикальная составляющая стрелы провеса несущего троса для различных режимов работы:

$$F_x = \frac{g_x\, l^2}{8\, T_x} - f_x \frac{K}{T_x}, \qquad (1)$$

где $g_x$ — нормативная нагрузка на несущий трос в заданном режиме работы, даН;

$l$ — длина пролета между опорами контактной сети (точками крепления несущего троса), м;

$T_x$ — натяжение несущего троса в заданном режиме, даН;

$f_x$ — стрела провеса контактного провода, м;

$K$ — номинальное натяжение контактного провода (проводов), которое принимают постоянным, даН.

Здесь стрела провеса контактного провода:

$$f_x = \frac{\left(l - 2\,c_x\right)^2}{8\left(T_x + K\right)}\left[g_x - g_0\,\frac{T_x}{T_0}\right], \qquad (2)$$

где $c_x$ — расстояние от оси опоры до первой около опорной струны в пролете $l$, м;

$g_0$ — нормативная нагрузка на несущий трос в режиме беспровесного положения контактного провода (принимается как нагрузка от собственного веса подвески), даН;

$T_0$ — натяжение НТ в режиме беспровесного положения КП, даН.

Как видно из уравнений (1) и (2), определение стрелы провеса несущего троса и контактного провода сопряжено с расчетом натяжения, нормативных нагрузок на провода в искомых режимах, а также натяжения НТ в режиме беспровесного положения КП. Расчеты нормативных нагрузок для различных режимов отражены в [10]. Натяжения НТ при температуре расчетного режима определяют на основании уравнения:

$$t_x = A_0 + \frac{B_x}{Z_x^2} - \frac{T_x}{\alpha_{\text{н}} E_{\text{н}} S_{\text{н}}}, \qquad (3)$$

где $A_0$ — коэффициент, учитывающий нагрузки, температуру и натяжение несущего троса в режиме беспровесного положения КП;

$B_x$ — коэффициент, учитывающий приведенные линейные нагрузки, длину эквивалентного пролета и коэффициент линейного расширения материала в расчетном режиме;

$Z_x$ — коэффициент приведенного натяжения несущего троса в расчетном режиме, учитывающий конструктивный коэффициент цепной подвески, даН;

$T_x$ — натяжение несущего троса в расчетном режиме, даН.

Решение уравнение (3) сопряжено с определением коэффициента $Z_x$:

$$Z_x = T_x + \varphi_x K, \qquad (4)$$

где $\varphi_x$ — конструктивный коэффициент цепной подвески.

Значение конструктивного коэффициента меняется в зависимости от натяжения несущего троса:

$$\varphi_x = \frac{\dfrac{(l - 2c_x)^2}{l^2}}{\left(1 + \left[1 - \dfrac{(l - 2c_x)^2}{l^2}\right]\dfrac{K}{T_x}\right)}. \qquad (5)$$

Коэффициенты (4) и (5), зависящие от натяжения $T_x$, значительно усложняют уравнение (3), что требует значительных временных затрат на его решение. Сегодня данная методика, разработанная еще в прошлом веке, широко применяется при проектировании контактной сети.

Наиболее ограничивающим с точки зрения вертикальных перемещений проводов является режим максимальной температуры, $t_{\max}$. В таком режиме натяжение несущего троса уменьшается прямо пропорционально воздействию температуры. Расчеты проводов КС при $t_{\max}$ должны учитывать нагрев проводов от солнечной радиации и значения тока нагрузки.

Ток, протекающий по всем продольным и поперечным проводам и тросам контактной подвески, составляет определенную картину токораспределения. Учитывая то, что существующие типовые модификации КС разработаны для максимальной температуры нагрева 80 °С по причине ограничений, связанных с температурными перемещениями проводов, — при механических расчетах

$t_{max}$ принимают равной 80 °С без учета реальной картины токораспределения. Совершенствование электротепловых расчетов связано с трудами таких ученых, как А. Б. Батрашов [11], А. В. Воронин [12] и др.

Опыт проектирования КС на основе существующего метода расчета показывает необходимость в его совершенствовании в условиях роста темпа и объемов перевозок с учетом требований к современному проектированию. Разработка и реализация математической модели электротепломеханического расчета контактной подвески позволит учесть такой параметр, как реальное значение температуры нагрева провода от протекающего тока с учетом токораспределения по поперечным и продольным проводам, которое ранее было подвергнуто упрощению, а также объективно оценить возможность применения существующих модификаций КС в условиях перспективы развития ж/д транспорта. Реализацию модели можно выполнить на основе метода конечных элементов с применением программного комплекса Ansys Workbench. Дополнительной целью в части модернизации существующего метода расчета является интеграция модели электротепломеханического расчета контактной подвески в BIM-проектирование.

## Совершенствование существующих методов расчета цепных контактных подвесок

Для исследования был принят пролет типовой полукомпенсированной контактной подвески переменного тока КС-160-3 с проводами М-120+МФ-100, длиной 65 м, со смещенными опорными струнами из провода БСМ1 сечением 4 мм$^2$, в середине которого подключается питающая линия (ПЛ) от тяговой подстанции. К рассмотрению принимается режим, когда на одной зоне питания находятся два ЭПС. С точки зрения нагрева проводов — данный режим является наиболее тяжелым. Значение тока ПЛ в месте подключения к контактной подвеске составляет 500 А и принимается на основании тяговых и электрических расчетов, выполненных методом сечения графика движения поездов, для экспериментального участка при пропуске пакета поездов массами до 6000 т. Максимальная температура окружающего воздуха принимается +30 °С.

Геометрия исследуемого пролета представляется поперечными и продольными проводами расчетного диаметра. Математическая модель определения значения величины тока, протекающего по всем продольным и поперечным проводам, основана на дифференциальной форме уравнений Д. К. Максвелла. Система уравнений основана на законе (теореме) Гаусса и законе Ампера — Максвелла:

$$\begin{cases} div\vec{D} = \rho \\ rot\,\vec{H} = \vec{j} + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{cases}, \qquad (6)$$

где $D$ — электрическая индукция, Кл/м$^3$;

$\rho$ — объемная плотность стороннего электрического заряда, Кл/м$^3$;

$H$ — напряженность магнитного поля, А/м;

$J$ — плотность электрического тока (плотность тока проводимости), А/м$^2$;

$t$ — время, с.

Определение температуры нагрева провода связано с первым законом термодинамики. На рис. 4 схематично приведен баланс тепловой энергии для участка провода контактной подвески [11].

Поступающая тепловая энергия, Дж:

$E_{IN} = E_{SN} + E_{k\,IN}$.

Отбираемая тепловая энергия, Дж:

$E_{OUT} = E_R + E_C + E_{k\,OUT}$.

Тепловая энергия внутри тела, Дж:

$E_G = E_{ST} + E_J$.

$E_{ST}$ — сохраненная тепловая энергия, Дж;

$E_{k\,IN}\left(E_{k\,OUT}\right)$ — энергия, поступающая (отбираемая) в результате кондуктивного теплообмена, Дж;

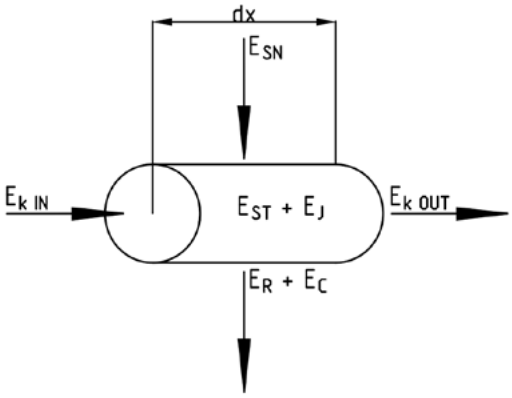



**Рис. 4.** Баланс тепловой энергии для участка провода контактной подвески:

$E_{SN}$ — энергия нагрева от солнечной радиации;

$E_C\left(E_R\right)$ — энергия кондуктивного (лучистого) теплообмена, Дж;

$E_J$ — энергия, выделяемая при резистивном нагреве, Дж.

Таким образом, классический первый закон термодинамики, записанный для участка провода, имеет вид:

$$\frac{dE_{ST}}{dx} = E_{IN} - E_{OUT} + E_G. \quad (7)$$

Уравнение нестационарного теплового баланса для КС, выраженное в потоке тепла на единицу длины провода, основанное на законе Фурье и уравнении теплового баланса, можно представить как [11]:

$$cm_{\text{ПГ}}\frac{\partial T}{\partial t} - kS\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = Q_J + Q_{SH} - Q_c - Q_R, \quad (8)$$

где $c$ — теплоемкость материала провода, Дж/(кг · К);

$m_{\text{ПГ}}$ — погонная масса провода, кг/м;

$T$ — температура, К;

$t$ — время, с;

$k$ — коэффициент теплопроводности материала провода, Вт/(м · К);

$S$ — площадь сечения провода, м$^2$;

$\partial x$ — длина провода, м;

$Q_J, Q_{SH}, Q_c, Q_R$ — погонный поток тепла от резистивного нагрева, солнечной радиации, конвективного охлаждения, лучеиспускания, Вт/м.

Результаты электротеплового расчета методом конечных элементов температуры нагрева проводов КС в рассматриваемом пролете при воздействии внешних факторов с учетом токораспределения представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, нагрев проводов от величины протекающего тока с учетом температуры окружающего воздуха равномерно распространяется по длине всего пролета по направлению к нагрузке (ЭПС). Значения температуры частично превышают допустимые, что говорит о необходимости рассмотрения мероприятий по усилению СТЭ в целях их снижения. Рассматриваемая модель разработана на основе опыта работы [11] в части электротеплового расчета.

Переход к электротепломеханическому расчету связан с созданием математической модели механического расчета и переносом результатов электротеплового расчета в каждый из узлов «сетки». Предлагаемая математическая модель описывается уравнением предварительно натянутого стержня в рамках классической теории Эйлера — Бернулли. Пренебрегая изгибной жесткостью стержня, уравнение примет вид [13]:

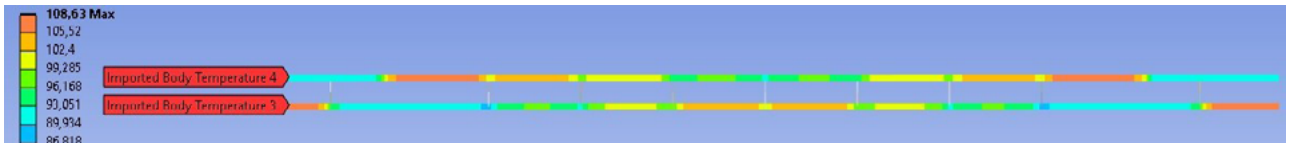



**Рис. 5.** Результаты электротеплового расчета проводов КС

$$-H\frac{d^2v'}{dx'^2}+q'(x')=0, \qquad (9)$$

где $x'$ — продольная координата оси стержня;

$v'$ — поперечное перемещение оси стержня;

$H$ — натяжение, Н;

$q'(x')$ — распределенная поперечная нагрузка.

Двойное интегрирование данного уравнения при $q'=\mathrm{const}(x')$ дает известное выражение для провеса стержня по параболическому закону [14].

Для механического расчета начальными являются условия задания натяжения несущего троса в режиме беспровесного положения контактного провода. Для несущего троса это натяжение составляет 1470 даН, а для контактного провода — 1050 даН. Дополнительно учитываются результаты электротеплового расчета. В таблице представлены результаты расчетов натяжения, а на рис. 6 высотного положения НТ выполненных на разработанной МКЭ-модели и сравнение их с результатами по классической методике [10].

Результаты расчетов и их сравнение показывают, что в существующей методике [10] значение натяжения НТ принимается на 149 даН выше, чем при расчетах по МКЭ-модели. В то же время при меньшем натяжении значение стрелы провеса, полученное по МКЭ-модели, получается меньше, чем по классической методике, на 0,5 м. Высотное положение НТ влияет на вертикальный габарит контактной подвески, который, в свою очередь, определяет длину пролета между опорами КС. Учет реальной картины токораспределения по проводам и, как следствие, нагрева проводов в механических расчетах может сократить затраты на строительно-монтажные работы по причине возможного увеличения длины пролета (только по условию соблюдения вертикального габарита КП).

## Заключение

С учетом вышеизложенного можно утверждать, что разработанная МКЭ-модель позволит выполнять электротепломеханические расчеты для цепной контактной подвески с большей точностью, что позволит избежать ошибок и разработки избыточных технических решений при проектировании. Преимущества МКЭ-моделей заключаются не только в их высокой точности, позволяющей более надежно прогнозировать поведение системы при различных условиях, но и в их универсальности и гибкости применения. Способность задавать разнообразные начальные условия, такие как температура окружающей среды, величина тока и натяжение проводов, позволяет проанализировать влияние этих

Результаты расчетов по разработанной МКЭ-модели и по методике [10]

| Параметр | Рассматриваемая методика | |
|---|---|---|
| | МКЭ модель | **Классическая методика** [10] |
| Натяжение НТ в режиме максимальной температуры, даН | 501 | 650 |

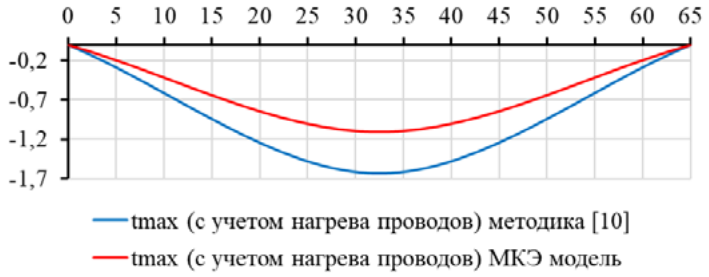



**Рис. 6.** Высотные положения НТ при расчетах на МКЭ-модели и по методике [10]

факторов на функциональность работы КС. Рассматриваемая МКЭ-модель может быть использована широким кругом специалистов для применения в различных отраслях, в том числе при расширении возможностей BIM-проектирования по причине полномасштабного моделирования расчетной геометрии. Описанная в данной работе МКЭ-модель сегодня дорабатывается на кафедре «Электроснабжение железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

## Список источников

1. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм. СНиП 32-01-95. Официальное издание. М.: ФГБУ «РСТ», 2024.

2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 1.2. Электроснабжение и электрические сети (Издание седьмое). М.: НЦ ЭНАС, 2002.

3. Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (с изменениями на 6 ноября 2024 года)». Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru.

4. ГОСТ 32697—2019. Тросы контактной сети железной дороги несущие. Технические условия. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019.

5. ГОСТ Р 55647—2018. Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2018.

6. Поручение Президента Российской Федерации В. В. Путина от 15.11.2017 № Пр-2320.

7. Постановление Правительства РФ от 20.12.2022 № 2357. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 05.03 2021 № 331. Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru.

8. Постановление Правительства РФ от 05.03.2021 № 331 «Об установлении случаев, при которых застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства».

9. СТН ЦЭ 141—99. Нормы проектирования контактной сети. — М.: ЦЭ МПС РФ, 2001. — 16 с.

10. Фрайфельд А. В. Проектирование контактной сети / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1991. — 335 с.

11. Батрашов А. Б. Совершенствование электротепловых расчетов и характеристик контактной сети постоянного тока: дисс. … канд. тех. наук / А. Б. Батрашов. — Екатеринбург, 2019. — 216 с.

12. Воронин А. В. Токораспределение между продольными проводами контактной сети и тепловой расчет ее элементов: дисс. … канд. тех. наук / А. В. Воронин. — М., 1946. — 143 с.

13. Работнов Ю. Н. Сопротивление материалов / Ю. Н. Работнов. — М.: Физматгиз, 1962. — 456 с.

14. Кудряшов Е. В. Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечно элементных моделей: дисс. … канд. тех. наук / Е. В. Кудряшов. — СПб., 2010. — 162 с.

Дата поступления: 23.03.2025
Решение о публикации: 18.05.2025

**Контактная информация:**
АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение железных дорог»; agunov@pgups.ru
ИВАНОВ Денис Дмитриевич — аспирант кафедры «Электроснабжение железных дорог»; denis_08a@mail.ru

# Designing a Modern Catenary System

**A. V. Agunov, D. D. Ivanov**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Agunov A. V., Ivamov D. D. Designing a Modern Catenary System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 444–454. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-444-454

## Summary

**Purpose:** To analyse and identify the limitations associated with the use of existing catenary suspension technologies and calculation methods in modern conditions. Methodology: A mathematical model for calculating a semi-compensated overhead suspension was developed. This model was based on the finite element method (hereinafter referred to as FEM), and its implementation was carried out in the ANSYS Workbench software package. To confirm the effectiveness of the developed model, the calculation results obtained using this FEM model were compared with the results obtained using the existing methodology. This enabled a thorough evaluation of the pros and cons of each method, highlighting the rationale behind transitioning to more contemporary and precise calculation techniques. **Results:** The analysis has revealed that the current calculation methods for catenary suspension do not accurately reflect real conditions, potentially leading to issues in design and operation. The research has demonstrated the need to improve the existing methods and adapt them to realities, with an emphasis on the introduction of modern approaches, such as mathematical modelling, which will significantly increase the accuracy and reliability of calculations. **Practical significance:** The disparities in the calculations emphasise the necessity to employ contemporary methodologies for determining the parameters of the catenary system, particularly in challenging circumstances. The finite element method is a highly versatile modelling technique. It can be used in models that will consider a range of factors impacting the operation of the catenary system, such as current, heating temperature and changes in wire tension. Design specialists can effectively utilise such models, including when transitioning to BIM technology and engaging in scientific activities.

**Keywords:** catenary system, catenary suspension, carrier cable, contact wire, wire heating temperature, sag, carrier cable tension.

## References

1. *SP 119.13330.2024. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm. SNiP 32-01-95. Ofitsial'noe izdanie* [SP 119.13330.2024. 1520 mm gauge railways. SNiP 32-01-95. Official publication]. Moscow: FGBU "RST" Publ., 2024. (In Russian)

2. *Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE). Glava 1.2. Elektrosnabzhenie i elektricheskie seti (Izdanie sed'moe)* [Electrical Installation Rules (PUE). Chapter 1.2. Power supply and electrical networks (Seventh edition)]. Moscow: NTs ENAS Publ., 2002. (In Russian)

3. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27.11.2021 № 3363-r "O Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda (s izmeneniyami na 6 noyabrya 2024 goda)"* [Order of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021 № 3363-r "On the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035 (as amended on November 6, 2024)"]. Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii www.pravo.gov.ru [Official Internet portal of legal information www.pravo.gov.ru]. (In Russian)

4. *GOST 32697—2019. Trosy kontaktnoy seti zheleznoy dorogi nesushchie. Tekhnicheskie usloviya. Ofitsial'noe izdanie* [GOST 32697—2019. Load-bearing cables of the railway contact network. Specifications. Official

publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian)

5. *GOST R 55647—2018. Provoda kontaktnye iz medi i ee splavov dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Tekhnicheskie usloviya. Ofitsial'noe izdanie* [GOST R 55647—2018. Contact wires made of copper and its alloys for electrified railways. Specifications. Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian)

6. *Poruchenie Prezidenta Rossiyskoy Federatsii V. V. Putina ot 15.11.2017 № Pr-2320* [Instruction of the President of the Russian Federation V.V. Putin dated 15.11.2017 № Pr-2320]. (In Russian)

7. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 20.12.2022 № 2357. O vnesenii izmeneniy v postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 05.03 2021 № 331* [Resolution of the Government of the Russian Federation dated 20.12.2022 № 2357. On Amendments to the Resolution of the Government of the Russian Federation dated 05.03 2021 № 331]. Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii www.pravo.gov.ru [Official Internet portal of legal information www.pravo.gov.ru]. (In Russian)

8. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 05.03.2021 № 331 "Ob ustanovlenii sluchaev, pri kotorykh zastroyshchikom, tekhnicheskim zakazchikom, litsom, obespechivayushchim ili osushchestvlyayushchim podgotovku obosnovaniya investitsiy, i (ili) litsom, otvetstvennym za ekspluatatsiyu ob"ekta kapital'nogo stroitel'stva, obespechivayutsya formirovanie i vedenie informatsionnoy modeli ob"ekta kapital'nogo stroitel'stva"* [Resolution of the Government of the Russian Federation of 05.03.2021 № 331 "On the establishment of cases in which the developer, technical customer, person providing or carrying out preparation of investment justification, and (or) the person responsible for the operation of a capital construction project ensure the formation and maintenance of an information model of a capital construction project"]. (In Russian)

9. *STN TsE 141—99. Normy proektirovaniya kontaktnoy seti* [STN CE 141-99. Standards for designing contact networks]. Moscow: TsE MPS RF Publ., 2001, 16 p. (In Russian)

10. Frayfel'd A. V., Brod G. N. *Proektirovanie kontaktnoy seti, 3-e izd., pererab. i dop.* [Design of contact networks, 3rd ed., revised and enlarged]. Moscow: Transport Publ., 1991, 335 p. (In Russian)

11. Batrashov A. B. *Sovershenstvovanie elektroteplovykh raschetov i kharakteristik kontaktnoy seti postoyannogo toka: diss. ... kand. tekh. nauk* [Improvement of electrothermal calculations and characteristics of a DC contact network: diss. ... Cand. Tech. sciences]. Ekaterinburg, 2019, 216 p. (In Russian)

12. Voronin A. V. *Tokoraspredelenie mezhdu prodol'nymi provodami kontaktnoy seti i teplovoy raschet ee elementov: diss. ... kand. tekh. nauk* [Current distribution between longitudinal wires of the contact network and thermal calculation of its elements: diss. ... candidate of technical sciences]. Moscow, 1946, 143 p. (In Russian)

13. Rabotnov Yu. N. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1962, 456 p. (In Russian)

14. Kudryashov E. V. *Sovershenstvovanie mekhanicheskikh raschetov kontaktnykh podvesok na osnove staticheskikh konechno elementnykh modeley: diss. ... kand. tekh. nauk* [Improvement of mechanical calculations of contact suspensions based on static finite element models: diss. ... candidate of technical sciences]. St. Petersburg, 2010, 162 p. (In Russian)

Received: March 23, 2025
Accepted: May 18, 2025

**Author's information:**
Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department of "Electric Power Supply of Railways"; agunov@pgups.ru
Denis D. IVANOV — Postgraduate Student, Department of "Electric Power Supply of Railways"; denis_08a@mail.ru

УДК 656.02

# Развитие методов математического моделирования для формирования транспортно-градостроительной структуры городских агломераций

**Л. А. Лосин[1, 2], Н. А. Калюжный[1]**

[1]Институт проблем региональной экономики РАН, Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Серпуховская ул., 38
[2]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Лосин Л. А., Калюжный Н. А.* Развитие методов математического моделирования для формирования транспортно-градостроительной структуры городских агломераций // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 455–466. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-455-466

## Аннотация

**Цель:** Показать возможность организации комплексной методологии формирования транспортно-градостроительной структуры городов и агломераций. **Методы:** Математическое моделирование, методы обработки больших объемов данных, методы геоинформационного анализа. **Результаты:** Приведены основные алгоритмы рассматриваемых математических моделей, которые охватывают спектр решаемых задач по развитию территориально-транспортной структуры: от стратегического планирования до экономического обоснования. Предложена последовательность использования методов моделирования для построения территориально-транспортной структуры городских агломераций, а также для решения иных задач в сфере транспортно-градостроительного планирования. Представленная методология основана на комплексном анализе существующих направлений и моделей транспортно-градостроительного планирования и моделирования. **Практическая значимость:** Объединение математических моделей в комплексной методологии формирования территориально-транспортной структуры городов и агломераций является важным научно обоснованным решением, внедрение которого может внести значительный вклад в территориальное развитие.

**Ключевые слова:** Математическое моделирование, транспортное планирование, агломерация, городской пассажирский транспорт, транспортная сеть, транспортно-пересадочный узел, матрица корреспонденций.

## Введение

Методы математического моделирования являются признанным инструментом решения задач транспортно-градостроительного планирования городов и регионов. Такие методы уже на протяжении многих десятилетий находят свое применение для обоснования проектных решений по развитию территории и транспортной инфраструктуры в составе разработки документов стратегического, территориального и транспортного планирования. При этом сфера применения моделирования не ограничивается только рамками проектной документации: такие подходы используются при проведении научных исследований в сфере градостроительства и экономической географии, для массовой оценки городской территории и объектов недвижимости и т. д. [1].

В петербургской (ленинградской) практике транспортно-градостроительного планирования также используются методы математического моделирования, в том числе на основе собственных разработок в части постановок задач, создания алгоритмического и программного обеспечения. Эффективность деятельности по разработке и применению методов моделирования стала возможной благодаря научному сотрудничеству ученых-математиков — авторов алгоритмов и программного обеспечения, а также практиков — транспортников-градостроителей, выступавших как постановщики задач и пользователи моделей [2]. История этих исследований и результаты работ по формированию транспортно-градостроительных моделей нашли свое отражение в ряде монографий и научных публикаций [3, 4].

Последовательность расчетных процедур при моделировании интенсивности потокораспределения в рамках города (агломерации) строится на основе так называемой четырехэтапной схемы моделирования (FSM), являющейся своего рода стандартом моделирования на макроуровне [5, 6]. При этом в практике транспортно-градостроительного планирования применяется, как правило, сценарный (или вариантный) подход, при котором путем обработки на модели различных вариантов проектных решений осуществляется выбор оптимального решения на основе группы критериев. Такой методический подход при всех его преимуществах не полностью раскрывает поле возможностей методов моделирования.

Публикации ряда авторов демонстрируют критическое отношение к привычным методическим подходам, отмечая теоретические, эксплуатационные и функциональные группы проблем современных методик применения методов моделирования. В частности, отмечается избыточная полнота информационной базы и сложность алгоритмического обеспечения [7, 8]. Использование менее подробной информационной базы моделирования может дать возможность при относительно небольших затратах ресурсов получить результаты, востребованные на уровне понимания общих закономерностей развития городов и их транспортных систем. Так, анализ направлений развития территории возможен на уровне матриц межрайонных корреспонденций, показывающих территориальное распределение спроса на передвижения на уровне расчетных районов или других территориальных единиц [9].

## Описание комплекса моделей

В последние годы в рамках расширения спектра решаемых задач был разработан ряд новых моделей и методик, направленных на решение задач транспортного и градостроительного планирования. Особенностью этих моделей стало то, что их направленность сконцентрировалась на укрупненном анализе транспортных систем, что позволило проводить анализ базовых параметров транспортно-градостроительной структуры городов (агломераций) без избыточной детализации информационной базы. Решаемые задачи при использовании таких моделей направлены на оптимизацию распределения городских передвижений по способам (видам), синтез сетей общественного транспорта, а также анализ приоритетности развития городских территорий. В частности, получили развитие досетевые модели расчета транспортного спроса, позволяющие осуществлять расчет параметров функционирования транспортной системы города (агломерации) на предварительных этапах разработки транспортно-градостроительной документации (табл. 1) [10].

Как указано выше, применение подобных моделей позволяет расширить спектр задач, решаемых на основе методов математического моделирования. Важно, что все указанные модели можно объединить в единый комплекс, позволяющий решать ряд взаимосвязанных транспор-

Таблица 1. Сравнение сетевого и досетевого подходов к расчету спроса на межрайонные передвижения

| Метод расчета матриц межрайонных передвижений | **Сетевой подход** (модель сетевого уровня) | **Досетевой подход** (модель досетевого уровня) |
|---|---|---|
| Определение затрат времени между пунктами отправления и прибытия | С учетом скоростных параметров элементов транспортной сети | На основе среднего уровня транспортного обслуживания |
| Факторы, влияющие на распределение корреспонденций | – взаиморасположение потокообразующих и потокопоглощающих центров;<br>– конфигурация и параметры транспортной сети;<br>– поведенческие факторы (функция тяготения) | – взаиморасположение потокообразующих и потокопоглощающих центров;<br>– поведенческие факторы (функция тяготения) |

Таблица 2. Основные модели и их характеристики

| Модель | Методы моделирования | Результаты моделирования | Публикации результатов |
|---|---|---|---|
| Модели оптимизации распределения передвижений по способам (видам) | | | |
| Модель влияния соотношения между индивидуальным и общественным транспортом на параметры транспортной системы | Досетевой расчет матриц корреспонденций, совмещенный с сетевым расчетом потоков в сети индивидуального общественного транспорта | Зависимости интенсивности потоков, объемов пассажирской работы, дальностей и скоростей передвижения от распределения долей между индивидуальным и общественным транспортом. Оценка наиболее эффективного соотношения между индивидуальным и общественным транспортом | [11] |
| Модель оптимизации распределения пассажирских корреспонденций по видам транспорта | Решение «энтропийной» задачи распределения долей по видам транспорта, совместно с досетевым расчетом матриц корреспонденций | Вероятности распределения корреспонденций по видам транспорта в масштабе всей транспортной системы агломерации | [10] |
| Модели синтеза сетей городского общественного транспорта | | | |
| Модель синтеза сети общественного транспорта (формирования каркаса сети общественного транспорта) | Досетевой расчет матриц корреспонденций и распределение пассажиропотоков на регулярной сетке при задании условия объединения потоков | Трассировки линий общественного транспорта с градацией по интенсивности пассажиропотоков | [12] |
| Модель транспортного спроса и потокораспределения на условной сети | Досетевой расчет матриц корреспонденций и распределение потоков на регулярной сетке при задании начальных скоростей | Структура (каркас) линий общественного транспорта | [13] |
| Модель формирования потокораспределения на условной сетке для построения сети скоростного транспорта | Досетевой расчет матриц корреспонденций и применение методов синтеза сети общественного транспорта на условной сетке | Определение объемов перевозок и направлений трассировок линий скоростного транспорта в соответствии с прогнозируемым спросом | [14] |
| Модель определения приоритетных локаций для размещения системы транспортно-пересадочных узлов (ТПУ) | Досетевой расчет матриц и пошаговая процедура расчетов пассажиропотоков на сети общественного транспорта при условии изменения затрат времени на пересадку в узлах | Классификация приоритетных локаций размещения ТПУ по уровню востребованности в рамках единой системы общественного транспорта агломерации | [15] |

*Окончание табл. 2*

| Модель | Методы моделирования | Результаты моделирования | Публикации результатов |
|---|---|---|---|
| Модели анализа приоритетности развития городских территорий | | | |
| Модель выявления городских территорий с недостаточным уровнем транспортного обслуживания | Совместное использование сетевого и досетевого подходов к расчету матриц корреспонденций | Классификация расчетных районов по уровню транспортного обслуживания на основе приоритета выравнивания территориальной дифференциации | [16] |
| Модель распределения корреспонденций по уровню транспортного обслуживания с учетом их классификации по топологическим признакам | Сетевой расчет матриц корреспонденций при классификации внутриагломерационных связей по топологическим признакам | Значения объемов транспортного спроса и пассажирской работы по видам внутриагломерационных связей | |
| Модель оценки потенциала полицентричности урбанизированных территорий на основе анализа спроса на пассажироперевозки | Сетевой расчет матриц корреспонденций при пошаговом изменении среднего времени передвижения по сети | Классификация расчетных районов по потенциалу организации на их базе субцентров («автономных» районов) | [17] |
| Модель экономической оценки территорий объектов транспортной инфраструктуры | Сетевой расчет матриц корреспонденций для обоснования рентных коэффициентов для всей совокупности земельных участков объектов транспортной инфраструктуры | Экономический потенциал территории объектов транспортной инфраструктуры | [18] |

тно-градостроительных задач агломерационного уровня. Целью такого объединения может стать комплексная методология формирования транспортно-градостроительной структуры городов и агломераций как системно связанная совокупность частных методов и методик. Все описываемые модели объединяет единый объект исследования — городские агломерации и их транспортные системы. Далее представлен перечень разработанных и апробированных моделей (табл. 2); расчетные эксперименты на этих моделях выполнены для Санкт-Петербургской городской агломерации.

На рис. 1 представлено соответствие разработанных моделей основным уровням транспортно-градостроительного планирования, определенным федеральными нормативно-правовыми документами. Под стратегическим транспортным планированием понимается определение целей, задач и направлений перспективного долгосрочного развития территориальной единой транспортной системы, объединенной в данном случае территорией Санкт-Петербургской городской агломерации [19].

## Модели оптимизации распределения передвижений по способам (видам)

Данная группа моделей дополняет известные методики распределения передвижений по видам транспорта. В группу объединены модели, направленные на поиск оптимального распределения передвижений как между индивидуальным и общественным транспортом, так и между отдельными видами общественного транспорта.

В модели влияния соотношения между индивидуальным и общественным транспортом на

**Стратегическое транспортное планирование**

- Модель влияния соотношения между индивидуальным и общественным транспортом на параметры транспортной системы
- Модель оптимизации распределения пассажирских корреспонденций по видам транспорта

**Территориальное планирование**

- Модель выявления городских территорий с недостаточным уровнем транспортного обслуживания
- Модель оценки потенциала полицентричности урбанизированных территорий на основе анализа спроса на пассажироперевозки

**Транспортное планирование**

- Модель синтеза сети общественного транспорта (формирования каркаса сети ГОТ)
- Модель транспортного спроса и потокораспределения на условной сети
- Модель формирования потокораспределения на условной сетке для построения сети скоростного транспорта
- Модель определения приоритетных локаций для размещения системы ТПУ
- Модель распределения корреспонденций по уровню транспортного обслуживания с учетом их классификации по топологическим признакам

**Экономические обоснования**

- Модель экономической оценки территорий транспортной инфраструктуры

**Рис. 1.** Основные модели и их соответствие уровням транспортно-градостроительного планирования

параметры транспортной системы ставится задача определить влияние соотношения индивидуального и общественного транспорта на параметры функционирования транспортной системы городской агломерации. Проведенный эксперимент базировался на сравнении вариантов распределения передвижений, заданных с определенным шагом. Реализуемый в модели подход показывает уровень эластичности транспортного спроса в зависимости от соотношения способов передвижений.

Модель оптимизации распределения пассажирских корреспонденций по видам транспорта основана на задании диапазонов эффективности каждого из видов общественного транспорта, представляемых в виде логонормальных распределений. Каждая корреспонденция в модели представляется в виде последовательности элементарных передвижений в соответствии с заданной номенклатурой видов общественного транспорта. В модели реализуется разбиение каждой корреспонденции на элементы (участки) таким образом, чтобы средневзвешенная скорость всей корреспонденции была равна заданной. Решение задачи в модели реализовано на основе «энтропийного» подхода, дающего возможность выбрать разбиение, отвечающее заданной функцией распределения системе предпочтений.

## Модели синтеза сетей городского общественного транспорта

Три из четырех моделей данной группы (табл. 2) основаны на формировании потоков на базе условной регулярной сетки, строящейся

с определенным шагом на всю территорию рассмотрения, т. е. на территорию городской агломерации. По сути, досетевой подход, применяемый для расчета транспортного спроса (построения матриц корреспонденций) в этих моделях, распространяется и на решение задачи формирования структуры потокораспределения, т. е. условно можно говорить о «дважды досетевом» подходе. Важно, что во всем цикле моделирования в этой группе моделей в составе исходного массива данных не используется фактическая или прогнозируемая транспортная сеть.

Результатом расчетов в этих моделях являются пассажиропотоки, «кристаллизующиеся» на условной регулярной сети (прямоугольной сетке с диагональными элементами). На основе предлагаемых методов моделирования систем городского общественного транспорта может быть сформирован базовый каркас транспортной сети, в первую очередь скоростной. Возможности предлагаемых методов заключаются в получении прогнозируемых параметров работы транспортных систем, демонстрирующих ситуацию наиболее полного раскрытия потенциала территории, т. е. формирование идеализированной структуры транспортного предложения. Сфера практического применения данной группы моделей — документы территориального планирования (генеральные планы), мастер-планы, программы развития транспортных систем городов и агломераций и т. д. Важно, что при использовании данного подхода не требуется задание трассировок линий различных видов транспорта.

Особое место в описываемой группе моделей занимает модель определения приоритетных локаций для размещения системы транспортно-пересадочных узлов. Модель основана на исследовании такой характеристики транспортных узлов, как «устойчивость узла», показывающей уровень их востребованности при заданной системе расселения и размещения мест приложения труда. Моделирование основано на пошаговом изменении задержек времени на вход в ТПУ, в результате чего определяются узлы со значительным, практически постоянным пассажиропотоком, что будет обеспечивать наибольшую эффективность функционирования транспортно-пересадочных узлов.

**Модели анализа приоритетности развития городских территорий**

Данная группа моделей направлена на исследования дифференциации территорий городских агломераций по различным признакам. Ключевым является использование факторов транспортной обеспеченности для классификации выделяемых в рамках исследований территориальных единиц — районов исследования.

В модели выявления городских территорий с недостаточным уровнем транспортного обслуживания исходя из приоритета выравнивания уровня транспортного обслуживания городской территории предлагаемый подход может использоваться при поиске и обосновании проектных решений по трассировке линий скоростного рельсового транспорта. Градация расчетных транспортных районов по уровню транспортного обслуживания базируется на сравнении объемов пассажирской работы, полученных с помощью различных подходов к расчетам матриц межрайонных передвижений: досетевым способом, сетевым способом или их комбинацией.

Модель распределения корреспонденций по уровню транспортного обслуживания с учетом их классификации по топологическим признакам основана на расчете матриц межрайонных передвижений, который может осуществляться как сетевым, так и досетевым способом. Полученные в ходе моделирования показатели дают представление о распределении корреспонденций в соответствии с типологией связей: радиальных, диаметральных, хордовых и т. д. На основе рас-

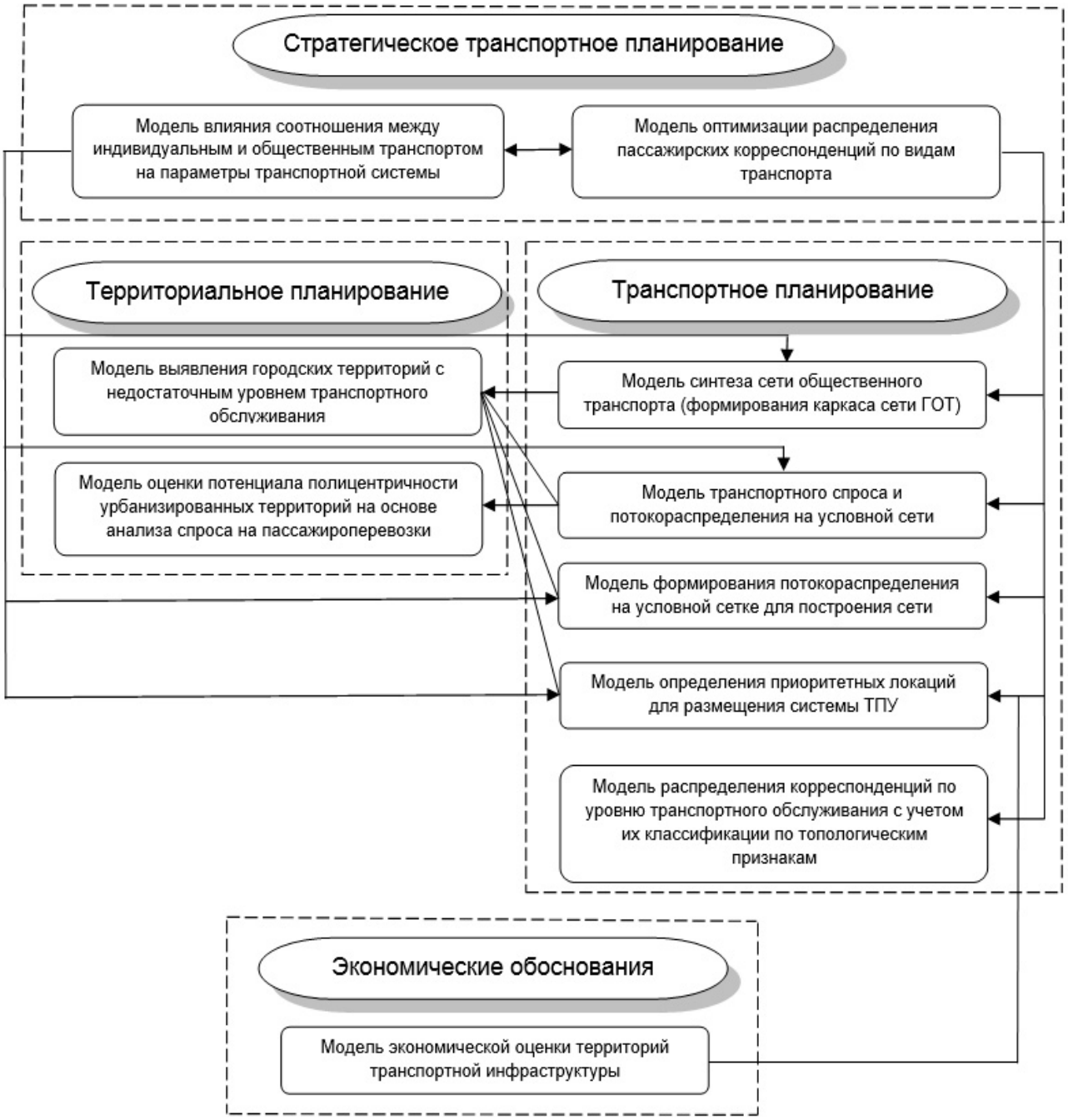



**Рис. 2.** Комплексная методология формирования транспортно-градостроительной структуры городов и агломераций

пределений объемов передвижений и объемов пассажирской работы могут быть сформулированы выводы о востребованности и приоритетности тех или иных типов внутригородских (внутриагломерационных) связей.

В основе модели оценки потенциала полицентричности урбанизированных территорий на основе анализа спроса на пассажироперевозки лежит понятие «коэффициента полицентричности», показывающего потенциал той или иной

территории с точки зрения эффективности организации на ее базе субцентра в рамках формирования полицентрической структуры города. Модель на основе анализа динамики показателей матриц межрайонных передвижений дает основание для классификации районов исследования по уровням потенциала полицентричности.

Модель экономической оценки территорий объектов транспортной инфраструктуры базируется на сравнении вводимых функций для кадастровой оценки территорий (например, функция территории «транспортно-пересадочный узел»). Поскольку в общем случае такая оценка базируется на величине доходности территории, в модели экономическая оценка территории объектов транспортной инфраструктуры основывается на определении «транспортных» факторов, имеющих «платежеобразующую природу», для обеспечения конкретного функционального назначения объекта. В модели нормируются значения этих факторов и дифференцируется базовый рентный коэффициент функции в соответствии со значением рентных коэффициентов факторов экономической оценки.

На основе анализа функционала представленных моделей предлагается последовательность их применения для формирования транспортно-градостроительной структуры городов и агломераций. Данная методология базируется на иерархии уровней планирования: стратегическое транспортное планирование, территориальное планирование, транспортное планирование и экономические обоснования развития территории (рис. 2).

## Выводы

На основе сформированных моделей, ориентированных на решение транспортно-градостроительных задач на уровне общих показателей развития территории и транспортной системы, может быть предложена комплексная методология формирования транспортно-градостроительной структуры городов и агломераций. В основе методологии лежит последовательность использования описываемых методов моделирования для построения транспортно-градостроительной структуры городских агломераций.

## Список источников

1. Капский Д. В. Транспорт в планировке городов: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»: в 10 частях / Д. В. Капский, Л. А. Лосин. — Минск: БНТУ, 2019. — Ч. 1: Транспортное планирование: математическое моделирование. — 94 с.

2. Мягков В. Н. 55 лет лаборатории математического моделирования функционально-пространственного развития городов Ленинградского отделения ЦЭМИ — ЭМИ РАН — ИПРЭ РАН / В. Н. Мягков, Л. А. Лосин, Н. В. Булычева // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2024. — № 1(76). — С. 116–125.

3. Мягков В. Н. Математическое обеспечение градостроительного проектирования. / В. Н. Мягков, Н. С. Пальчиков, В. П. Федоров; отв. ред. Б. Л. Овсиевич. — Л.: Наука, Ленингр. отделение, 1989. — 144 с.

4. Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии / Ред. засл. деятель науки, д-р ф.-м. н. И. В. Романовский // Сборник трудов СПб ЭМИ РАН. № 9. Математические модели в исследовании процессов развития городской среды. — СПб.: Нестор-История, 2015. — 84 с.

5. Якимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов / М. Р. Якимов. — М.: Логос, 2013. — 188 с.

6. Ortuzar J. D. Modeling Transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen // John Wiley & Sons Ltd. — 2001. — 594 p.

7. Davidson P. A new approach to transport modelling — the Stochastic Segmented Slice Simulation (4S) model and its recent applications / P. Davidson // Australasian Transport Research Forum, Proceedings 28−30 September 2011. — Adelaide. — 2011

8. McNally M. G. The Four Step Model / M. G. McNally // Department of Civil and Environmental Engineering and Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, U.S.A. — 2007.

9. Свердлин Л. И. Транспортные обоснования композиции генерального плана города / Л. И. Свердлин // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XI Международной научно-практической конференции. — Екатеринбург: АМБ, 2005. — С. 40–43.

10. Федоров В.П. Методы математического моделирования для проектирования городской транспортной системы на досетевом уровне / В. П. Федоров, Л. А. Лосин // Транспорт Российской Федерации. — 2012. — № 2(39). — С. 42–45.

11. Булычева Н. В. Исследование влияния параметров транспортной модели на результаты расчетов пассажиропотоков (на примере Санкт-Петербурга) / Н. В. Булычева, Д. В. Капский, Л. А. Лосин // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. — 2023. — Т. 59. — № 3. — С. 253–264.

12. Федоров В. П. Формирование вариантов развития городских транспортных сетей: разработка метода / В. П. Федоров // Транспорт Российской федерации. — СПб.: ООО «Т-Пресса», 2012. — № 3-4 (40-41). — С. 17–21.

13. Булычева Н. В. Моделирование системы общественного транспорта на основе пассажиропотоков, сформированных на условной сети / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2021. — № 2(65). — С. 86–92.

14. Булычева Н. В. Оценка роли метрополитена в структуре системы пассажирского транспорта в крупном городе / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2022. — № 3(70). — С. 93–102.

15. Калюжный Н. А. Информационно-программный комплекс Citraf и его применение для решения задачи по определению мест формирования транспортно-пересадочных узлов / Н. А. Калюжный, А. И. Лисененков, Л. А. Лосин // Вестник гражданских инженеров. — СПбГАСУ, 2018. — Вып. 5(70). — С. 174–181.

16. Булычева Н. В. Определение пассажирских корреспонденций с недостаточным уровнем транспортного обслуживания (на примере сети общественного транспорта Санкт-Петербурга) / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. — Минск: БНТУ, 2018. — С. 79–88.

17. Лосин Л. А. Определение потенциала полицентричности городских районов на основе математического моделирования систем городского пассажирского транспорта / Л. А. Лосин, Н. А. Калюжный // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 47–59.

18. Калюжный Н. А. Экономическая оценка территорий объектов транспортной инфраструктуры (на примере транспортно-пересадочного узла «Девяткино») / Н. А. Калюжный // Транспорт Российской Федерации. — 2020. — № 3–4(88–89). — С. 24–27.

19. Лосин Л. А. Стратегическое транспортное планирование развития Санкт-Петербургской городской агломерации / Л. А. Лосин, В. В. Солодилов // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2020. — № 1(60). — С. 84–93.

Дата поступления: 11.04.2025
Решение о публикации: 18.05.2025

**Контактная информация:**
ЛОСИН Леонид Андреевич — канд. техн. наук, заведующий лабораторией; nipigrad@yandex.ru
КАЛЮЖНЫЙ Николай Анатольевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник; nicholaskalyuzhny@gmail.com

# Development of Mathematical Modelling Methods for Creating the Transport and Urban Planning Structure of Agglomerations

**L. A. Losin[1, 2], N. A. Kalyuzhny[1]**

[1]Institute for Regional Economic Studies, Russian Academy of Sciences, 38, Serpuhovskaya str., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation
[2]Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** *Losin L. A., Kalyuzhny N. A.* Development of Mathematical Modelling Methods for Creating the Transport and Urban Planning Structure of Agglomerations. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 455–466. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-455-466

## Summary

**Purpose:** To demonstrate the potential of a comprehensive methodology for the formation of the transport and urban planning structure of cities and agglomerations. **Methods:** Mathematical modelling, the processing of large data sets, and geoinformation analysis. **Results:** The primary algorithms of the mathematical models under consideration have been outlined. They combine a range of tasks for the development of the area transport structure from strategic planning to economic justification. The sequence of using modelling methods for constructing the territorial and transport structure of urban agglomerations, as well as for solving other tasks related to transport and urban planning, has been proposed. The methodology presented is based on a thorough analysis of existing trends and models in transport and urban planning and modelling. **Practical significance:** Incorporating mathematical models into a systematic approach for shaping the area and transport infrastructure of cities and agglomerations represents a significant scientific advancement. Implementing this approach can be instrumental in catalyzing the area development.

**Keywords:** Mathematical modelling, transport planning, agglomeration, urban transport, transport network, transport hub, matrix of correspondences.

**References**

1. Kapski D. V., Losin L. A. *Transport v planirovke gorodov: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov spetsial'nosti 1-44 01 02 "Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya": v 10 chastyakh. Ch. 1: Transportnoe planirovanie: matematicheskoe modelirovanie* [Transport in urban planning: a teaching aid for students majoring in 1-44 01 02 "Traffic Organization": in 10 parts. Part 1: Transport planning: mathematical modeling]. Minsk: BNTU Publ., 2019, 94 p. (In Russian)

2. Myagkov V. N., Losin L. A., Bulycheva N. V. *55 let laboratorii matematicheskogo modelirovaniya funkcionalno-prostranstvennogo razvitiya gorodov Leningradskogo otdeleniya CEMI — EMI RAN — IPRE RAN* [55 years of the Laboratory of Mathematical Modeling of Functional and Spatial Development of Cities, CEMI — EMI RAN — IPRE RAN, Russian Academy of Sciences]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2024, Iss. 1(76), pp. 116–125. (In Russian)

3. Myagkov V. N., Palchikov N. S., Fyodorov V. P. *Matematicheskoe obespechenie gradostroitelnogo proektirovaniya; otv. red. B. L. Ovsievich* [Mathematical support of urban planning; under general editorship of B. L. Ovsievich]. Leningrad: Nauka Publ., 1989, 144 p. (In Russian)

4. Ekonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii. Red. zasl. deyatel' nauki, d-r f.-m. n. I. V. Romanovskiy [Ekonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii. Ed.

Honored Scientist, Doctor of Physics and Mathematics I. V. Romanovsky]. *Sbornik trudov SPb EMI RAN. № 9. Matematicheskie modeli v issledovanii protsessov razvitiya gorodskoy sredy* [Collection of works of St. Petersburg Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences. № 9. Mathematical models in the study of urban development processes]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2015, 84 p. (In Russian)

5. Yakimov M. R. *Transportnoe planirovanie: sozdanie transportnyh modeley gorodov* [Transport planning: creation of transport models of cities]. Moscow: Logos Publ., 2013, 188 p. (In Russian)

6. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modeling Transport. John Wiley & Sons Ltd, 2001, 594 p.

7. Davidson P. A new approach to transport modelling — the Stochastic Segmented Slice Simulation (4S) model and its recent applications. Australasian Transport Research Forum, Proceedings 28–30 September 2011, Adelaide, 2011.

8. McNally M. G. The Four Step Model. Department of Civil and Environmental Engineering and Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, U.S.A., 2007.

9. Sverdlin L. I. *Transportnye obosnovaniya kompozicii generalnogo plana goroda* [Transport substantiation of the composition of the city master plan]. Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya: materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Social and economic problems of city transport systems and their influence areas development and functioning]. Yekaterinburg: AMB Publ., 2005, pp.40–43. (In Russian)

10. Fyodorov V. P., Losin L. A. *Metody matematicheskogo modelirovaniya dlya proektirovaniya gorodskoy transportnoy sistemy na dosetevom urovne* [Methods of mathematical modeling of the urban transport system designing at the pre-network level]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2012, Iss. 2(39), pp. 42–45. (In Russian)

11. Bulycheva N. V., Kapski D. V., Losin L. A. Issledovanie vliyaniya parametrov transportnoi modeli na rezultaty raschetov passazhiropotokov (na primere Sankt-Peterburga) [Studying the influence of transport model parameters on the results of passenger traffic calculations (on the example of St. Petersburg)]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-matematicheskikh nauk* [Proceedings of National Academy of sciences of Belarus. Physics and Mathematics series]. 2023, vol. 59, Iss. 3, pp. 253–264. (In Russian)

12. Fyodorov V. P. Formirovanie variantov razvitiya gorodskih transportnyh setey: razrabotka metoda [Formation of options for the development of urban transport networks: development of a method]. *Transport of the Russian Federation* [Transport of the Russian Federation], 2012, № 3-4(40-41), pp. 17–21. (In Russian)

13. Bulycheva N. V., Losin L. A. Modelirovanie sistemy odschestvennogo transporta na osnove passazhiropotokov, sformirovannyh na uslovnoy seti [Modeling of a municipal transport system on the basis of passenger flows formed on a conditional network]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2021, Iss. 2(65), pp. 86–92. (In Russian)

14. Bulycheva N. V., Losin L. A. Otsenka roli metropolitena v strukture sistemy passazhirskogo transporta v krupnom gorode [Assessment of the role of the metro in the structure of the passenger transport system in a large city]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and development prospects]. 2022, Iss. 3(70), pp. 93–102. (In Russian)

15. Kalyuzhny N. A., Lisenenkov A. I., Losin L. A. Informatsionno-programmnyy kompleks Citraf i ego primenenie dlya resheniya zadachi po opredeleniyu mest formirovaniya transportno-peresadochnykh uzlov [Information and software complex Citraf and its application to solve the problem of determining the locations of transport hubs]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of civil engineers]. SPbGASU, 2018, Iss. 5(70), pp. 174–181. (In Russian)

16. Bulycheva N. V., Losin L. A. Opredelenie passazhirskih korrespondenciy s nedostatochnym urovnem transportnogo obsluzhivaniya (na primere seti obschestvennogo transporta Sankt-Peterburga) [Application

of methods of mathematical modeling to determine the location of transportation facility of cities (the case of the placement of transfer hubs in St. Petersburg)]. *Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya i funktsionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya* [Social and economic problems of city transport systems and their influence areas development and functioning], Minsk: BSTU Publ., 2018, pp.79–88. (In Russian)

17. Losin L. A., Kalyuzhny N. A. Opredelenie potenciala policentrichnosti gorodskih rayonov na osnove matematicheskogo modelirovaniya system gorodskogo passazhirskogo transporta [Determination of the polycentricity potential of urban areas based on mathematical modeling of urban transport systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University], 2025, vol. 22, Iss. 1, pp. 47–59. (In Russian)

18. Kalyuzhny N. A. Ekonomicheskaya ocenka territoriy ob'ektov transportnoy infrastruktury (na primere transportno-peresadochnogo uzla "Devyatkino") [Economic assessment of the territories of transport infrastructure facilities (using the example of the Devyatkino transport hub)]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2020, Iss. 3–4 (88–89), pp. 24–27. (In Russian)

19. Losin L. A., Solodilov V. V. Strategicheskoe transportnoe planirovanie razvitiya Sankt-Peterburgskoy gorodskoy aglomeracii [The strategical transport planning of development of St. Petersburg city agglomeration]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2020, № 1(60), pp. 84–93. (In Russian)

Received: April 11, 2025
Accepted: May 18, 2025

**Author's information:**
Leonid A. LOSIN — PhD in Engineering, Laboratory Head, nipigrad@yandex.ru
Nikolai A. KALYUZHNY — PhD in Engineering, Senior Researcher, nicholaskalyuzhny@gmail.com

УДК 528.065/.067, 625.7

# Метод выявления колейности и вертикальных конструкций по облакам точек автомобильных дорог на основе экстремальных уклонов

**Е. А. Гребенюк[1,2]**

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера Б
[2]Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 603000, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65

**Для цитирования:** *Гребенюк Е. А.* Метод выявления колейности и вертикальных конструкций по облакам точек автомобильных дорог на основе экстремальных уклонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 467–475. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-467-475

## Аннотация

При проведении обследований автомобильных дорог с применением технологии лазерного сканирования остро стоит задача идентификации элементов дорожного обустройства и колейности по облакам точек. На практике не всегда возможно проводить сканирование с соблюдением всех правил, в связи с чем в облаках точек присутствует большое число шумов, а сама плотность точек местами не позволяет задействовать алгоритмы автоматической классификации; кроме того, сложность и отсутствие оптимизации ряда алгоритмов зачастую требуют ограничения размера исследуемых данных и потребляют значительную часть доступных аппаратных ресурсов компьютера. В связи с этим обработка данных носит преимущественно ручной характер. **Цель:** Предложить метод идентификации наклонных (и вертикальных) конструкций, а также колейности на основе анализа уклонов между соседними точками облака точек с упором на производительность на больших данных и прогнозируемой величиной расхода вычислительных ресурсов компьютера. **Методы:** В данном исследовании используется преобразование облака точек с классифицированной землей через CSF-алгоритм. Рассматриваемый метод был реализован на языке программирования C++ как надстройка к САПР nanoCAD для работы с облаками точек в ее среде. В качестве вспомогательного инструмента формирования контуров была использована геометрическая библиотека с открытым исходным кодом GEOS. Апробация предложенного метода проведена на материалах лазерного сканирования дорог Санкт-Петербурга. **Практическая значимость:** Вычислительная сложность метода квадратично зависит от размера облака точек и не зависит от его объема, что позволяет использовать метод для обработки облаков точек плохого качества. В результате пользователь получает набор полигонов (замкнутых контуров) для требуемых величин уклонов с возможностью отрисовки только полигонов заданной площади.

**Ключевые слова:** Автомобильные дороги, колейность, облака точек, эксплуатация дорог, лазерный сканер, классификация облака точек.

## Введение

Лазерное сканирование наряду с фотограмметрией активно применяется для задач обследования инфраструктуры автомобильных дорог, особенно при создании эксплуатационных цифровых моделей. Несмотря на более высокую стоимость по сравнению с традиционными изысканиями и необходимость соблюдения определенного режима работ, данные лазерного сканирования позволяют решать большее число задач в отличие

от традиционных изысканий, а главное — позволяют минимизировать влияние человеческого фактора на достоверность получаемых сведений о местности. Несмотря на принципиальную разность в процедуре съемок и оборудовании, данные фотограмметрии могут быть представлены в формате облака точек, а параллельно с лазерной съемкой также могут формироваться панорамные изображения, в связи с чем к результатам обоих вариантов съемки могут быть применены одни и те же алгоритмы и подходы работы с данными, включая проблематику обработки данных.

Комплексная оценка существующих технических средств и способов сканирования представлена в диссертации Дмитрия Викторовича Берегового. Для классификации объектов местности используется спектральный анализ пикселей полученных изображений при фотограмметрии. Векторизация сырых данных (растровых изображений) опирается на распознанные классы с последующим формированием полигональных объектов для групп пикселей (точек местности) одного класса. В качестве среды анализа используется программа ArcMap из поставки ПО ArcGIS. Также автор упоминает особенность последнего времени — использование машинного обучения для распознавания образов в отснятых данных [1]. Тема использования машинного обучения и нейронных сетей для идентификации отдельных групп объектов фигурирует в трудах А. Ткачевой, А. Федоровой и др. [2, 3].

Помимо задач инвентаризации и перевода в цифровой вид имеющейся транспортной инфраструктуры, лазерное сканирование и фотограмметрия активно применяется для оценки поперечной ровности автомобильных дорог и вычисления объемов работ для ремонта дорожного полотна [4]. Предлагаются методики съемки поверхности автодороги и отрисовки по ним продольных и поперечных профилей покрытия в среде САПР IndorCAD для получения площади и глубины колейности, а также оценки отклонений фактических геометрических характеристик трассы от проектных (нормативных) значений [5]. В альтернативу оценки глубины колеи при помощи лазерного сканирования также могут использоваться и фотограмметрические данные, в доказательство этого приводится пример автомобиля ГАЗ-3221 «Газель» с установленным фотограмметрическим оборудованием для авторского способа измерения колейности [6]. Для постобработки полученных данных лазерного сканирования для идентификации колейности по сравнению с измерениями трехметровой рейкой наиболее предпочтительно использовать метод вейвлетов [7].

Не всегда обследование состояния автомобильных дорог может проводиться в удобное время в отсутствие других транспортных средств и при соответствующей погоде; в силу естественных причин получаемые в результате обработки сырые данные (облаков точек) зачастую имеют большой процент шума и брака, в связи с чем идентификация каких-либо элементов инфраструктуры, а также колейности носит затяжной характер с использованием в основном ручного труда. При массовых съемках неизбежны накладки, приводящие к получению подобных некачественных данных, в связи с чем на первый план выходят подходы, позволяющие в автоматическом или полуавтоматическом режиме обрабатывать сырые данные (облаков точек и/или изображений).

На основе авторского опыта участия в мероприятиях по обследованию автомобильных дорог Санкт-Петербурга для формирования по ним цифровых моделей организации дорожного движения и составленному методу оценки трудозатрат на обработку данных лазерного сканирования, трудозатраты на первичное позиционирование элементов транспортной инфраструктуры по облакам точек занимают существенное время,

фактически порядка 200 человеко-дней из расчета 8-часового рабочего дня на 1000 км. Наибольший объем работ из этого времени приходится именно на ручную отрисовку границ и положения характерных объектов инфраструктуры, так как технические задания требуют геодезической точности позиционирования границ и элементов транспортной инфраструктуры в цифровой модели [8].

**Метод исследования**

Для облегчения существенной доли ручного труда в части определения положения точечных и линейных элементов транспортной инфраструктуры, а также выявления ям и колейности предлагается рассмотреть следующий метод обработки облаков точек, основанный на анализе экстремальных уклонов между соседними точками облака точек.

Шаг 1 (опциональный): выравнивание облака точек по высоте в плоскости сканирования.

Шаг 2: выделение точек земли при помощи Cloth Simulation Filter [9].

Шаг 3: формирование сетки точек с заданным размером ячейки сетки.

Шаг 4: вычисление максимального уклона (угла) для каждой ячейки сетки для действительных точек на заданном удалении от данной.

Шаг 5: выделение участков с уклонами больше заданного значения (или в диапазоне значений) в группы и их отрисовка в векторном виде.

Предлагаемое на шаге 1 выравнивание облака точек заключается в корректировке отметок $Z$ точек облака на значение, рассчитываемое от оси дороги/трека проезда сканирующего автомобиля (если речь о мобильном лазерном сканировании). При наличии на местности выраженного рельефа и, как следствие, выраженного продольного профиля дороги существующие алгоритмы классификации облаков точек показывают заведомо худший результат, чем если бы речь шла о равнинной местности. Так как задачи определения позиционирования элементов инфраструктуры автомобильной дороги и колейности касаются в большей части планового положения, то высотой $Z$ точек можно пренебречь или в крайнем случае, имея точные плановые координаты, установить значение $Z$ по оригинальным данным для соответствующих точек.

**Выделение точек земли**

В 2016 г. Wuming Zhang предложил способ фильтрации (Cloth Simulation Filter, CSF далее) облака точек на «точки земли» и «остальные точки», основываясь на идее создания промежуточной структуры для расчетных точек облака точек. Анализируя отношения между ячейками структуры и точками облака точек, выделяется поверхность земли. Соответственно, не вошедшие в данное число точки относятся к другой группе [9]. Использующий минимальное число настраиваемых параметров расчета CSF-метод также обладает сравнительно небольшой затратой памяти вычислительной машины для своей реализации по сравнению с иными алгоритмами выделения шумов и классификации облаков точек. Автором оригинального метода были также предложены к использованию его разновидности, например P-CSF с использованием полярных координат для вычисления оси сканируемых тоннелей и фильтрации шумов облаков точек для данных сооружений [10]. На основе данного метода классификации различные авторские коллективы предлагают свои реализации алгоритмов выделения точек земли [11], считая его эталонным.

Настоящий метод опирается на облака точек с классифицированной землей именно через CSF-алгоритм. В оригинальном виде он реализован в виде одноименного плагина в программе с открытым исходным кодом для работы с облаками точек — CloudCompare. На ранних этапах исследования выполнен его перенос в состав функций надстройки TBS Cloud для nanoCAD

с улучшениями в части работы с памятью для обработки большего объема данных при меньшем использовании доступной оперативной памяти ПК.

Достаточными расчетными параметрами CSF для выделения точек земли облаков точек по линейным объектам предлагается считать следующие значения. В скобках даны формулировки из оригинальной статьи [9], до них — формулировка в плагине в среде CloudCompare:

- Cloth resolution (GR, grid resolution): 1.0;
- Max iterations (dT, time step) = 700;
- Classification threshold (RI, rigidness) = 0.2;
- Slope processing (ST, steep slope fit factor) = true.

Приведенные параметры были определены экспериментально, как дающие сравнительно точный результат при умеренных временных затратах на расчет. Флаг Slope processing отвечает за учет вертикальных конструкций: бордюрного камня, подпорных стенок. Classification threshold — фактически означает, что в поверхность точек земли попадут точки не выше этого значения от поверхности проезжей части дороги. Размер сетки Cloth resolution принят 1.0, так как не было замечено принципиального влияния меньших значений на точность результата (а скорость расчета падала квадратично при уменьшении шага сетки). Величина Max iterations принята чуть более рекомендуемой по умолчанию за счет анализа более плотного облака точек (в оригинальной статье автор исследует LIDAR-данные со значительно меньшей плотностью точек).

## Формирование сетки точек с заданным размером ячейки сетки

Для полученного облака точек по земле и наземным сооружениям необходимо сформировать плоскую сеть размерами $M \times N$ с шагом $S$ в пределах ограничивающей призмы (BBOX) геометрического множества точек облака точек. В частных случаях целесообразно использовать сеть, повернутую относительно прямого участка оси трассы, — для минимизации количества пустых ячеек и, как следствие, лишнего расхода памяти и вычислительных ресурсов ПК. При этом $M$ будет характеризовать координаты $X$, а $N$ — координаты $Y$, если речь идет о правой декартовой системе координат, в которой, как правило, располагаются облака точек. Пусть точка $P_{\min}$ будет характеризовать левую нижнюю вершину ограничивающей призмы, а $P_{\max}$ — верхнюю правую вершину, при этом для удобства расчетов координаты минимальной точки будут взяты с округлением до целых в меньшую сторону, а максимальной точки — в большую сторону из расчета, что единицы измерения облака точек — метры.

При программной реализации сети по умолчанию все ячейки будут иметь фиксированное значение 0. Так как облака точек отображают реальную местность, нулевая высота (в России для Балтийской системы высот 1977 г.) явление достаточно редкое; тем более что координаты точек часто имеют 4-5 знаков после запятой (при съемке в метрах), в связи с чем можно пренебречь точками облака точек, имеющих чисто нулевые координаты. В противном случае при инициализации массива $M \times N$ необходимо задать такое значение $Z$ по умолчанию, какое не будет встречаться ни у одной точки облака точек.

Значением ячейки сетки будет высота точки облака точек $Z$. При возможности в программной реализации ее также следует представлять в более экономном по расходу памяти варианте — например, путем вычитания минимальной отметки $Z$ облака точек и представления остатка как целого числа unsigned short, домноженного на 1000 (для единиц высоты в мм) в альтернативу хранения прямого значения $Z$ в виде числа float/double, занимающего большее число байтов в памяти.

Принцип заполнения ячеек сети будет заключаться в итеративном переборе точек облака

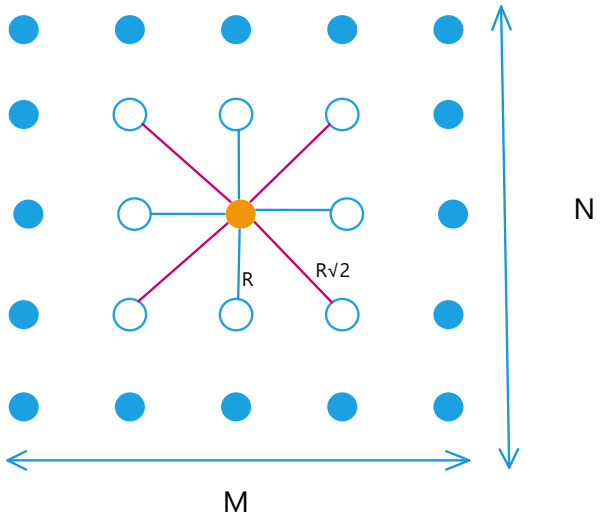



**Рис. 1.** Схема выборки точек вокруг данной на расстоянии *R*

точек, вычислении для координат точки $P_x, P_y, P_z$ ее позиции в сети $M \times N$ вида $m;n$ и записи в ячейку сети $m;n$ значения $Z$ анализируемой точки (подробнее см. формулу 1 ниже).

$$m = \left\lfloor \frac{(P_x - P_{\min x})}{S} \right\rfloor; n = \left\lfloor \frac{(P_y - P_{\min y})}{S} \right\rfloor. \quad (1)$$

Помимо пары чисел $m;n$, задающих положение точки в сети $M \times N$, положение также может описываться одним числом $T$ из предположения, что отсчет точек в сети идет слева направо и снизу вверх:

$$T = m \cdot S + n. \quad (2)$$

Использование варианта описания положения точки в сети через число удобно при программной реализации в виде выделения массива памяти заданного размера (на языке C/C++ это функция calloc/malloc). Очевидно, что увеличение площади анализируемых данных будет иметь квадратичную зависимость с выделяемыми ресурсами.

## Вычисление максимальных уклонов точек

Для сформированной сети $M \times N$ необходимо создать равновеликую по размеру (и памяти) структуру $P \times Q$, ячейки которой будут содержать информацию по уклонам. Под уклонами будем понимать максимальный угол между данной точкой $P$ и действительными соседними точками на заданном расстоянии *R*. Под «действительными» будем понимать те ячейки, где величина $Z$ не равна значению по умолчанию (обычно нулю). Если на расстоянии *R* вблизи анализируемой точки нет действительных точек, то уклон для нее будет равен нулю.

Целевым значением угла будет величина арктангенса от абсолютной разности высот анализируемой и соседней точек к расстоянию между анализируемой и соседней точкой. В представленном выше примере есть 2 типа расстояний — равные *R* в случае удаления соседней точки по одной из осей и *R* √2 для случая диагонального расположения. Соответственно, для большего шага будут иные кратные значения, но для чистоты анализа корректно оставлять величину шага анализа *R*, равную изначальному размеру сетки *S*. Вычисленное значение в радианах приводится для удобства контроля к градусной мере, но может и не приводиться для уменьшения числа операций, тем более что взятие обратных тригонометрических функций более вычислительно затратно.

## Выделение участков с экстремальными уклонами и их отрисовка

Под экстремальными будем понимать уклоны, лежащие в диапазоне больше заданного значения $[A_{\min}; A_{\max}]$. Зная величины точек $P_{\min}$ и $P_{\max}$, определяющих границы сетки $M \times N$, а также сформированной на ее основе $P \times Q$, для каждой ячейки сети $P \times Q$ можно определить координаты точек, величина уклона которых попадает в анализируемый диапазон $[A_{\min}; A_{\max}]$. Для полученных точек строятся контуры в виде квадратов с размером, по умолчанию чуть большим, чем шаг сети. Перекрывающиеся области объединяются в фигуры с использованием методов геометрической библиотеки с открытым исходным кодом GEOS, а по величине их площади можно производить фильтрацию результатов. Программная реализация расчета и вывода результатов представлена на рис. 2 ниже в среде nanoCAD в виде надстройки TBS Cloud на языке программирования C++. В представленном виде шаг сетки 1 см, величина уклона, по которому производился поиск, — 85°, максимальный — 90°. В результате четко видны 2 вертикальные стойки (дорожного знака и светофорной колонки), а также некоторое число шумов на проезжей части от проезжавших машин.

## Заключение

Представленный метод позволяет автоматизировать камеральную обработку облаков точек в части идентификации вертикальных конструкций и колейности. Метод может быть полезен при обработке облаков точек с высоким процентом шума, но в любом случае будет требовать ручной верификации полученных результатов. Помимо описанной сферы применения, с его помощью также можно выявлять места перехода обочины в откос или проезжей части в обочину, отталкиваясь от нормативных уклонов элементов поперечного профиля дороги. В широком смысле метод может применяться не только для автомобильных дорог, и даже не только для дорог — а для классификации в облаках точек наклонных и вертикальных конструкций; а если заменить восприятие осей координат $Y$ и $Z$ (или $X$ и $Z$), то и анализ горизонтальных конструкций.

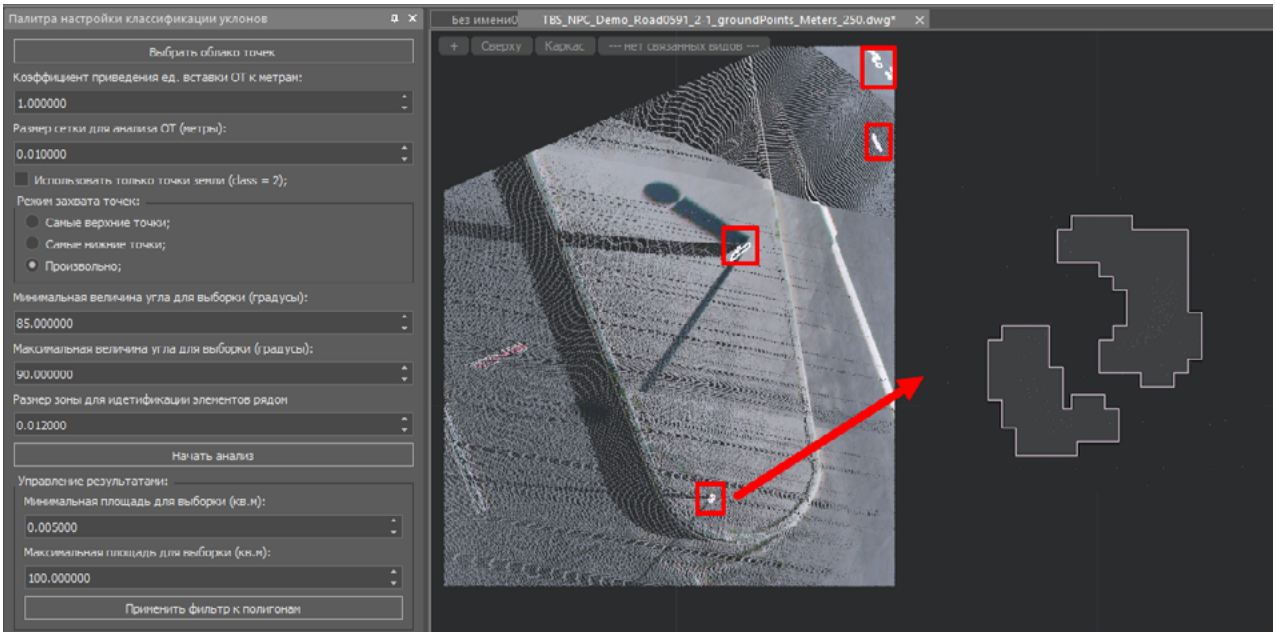



**Рис. 2.** Пример результата реализации метода в nanoCAD

Как показало тестирование практической реализации метода в виде надстройки к популярной САПР общего назначения nanoCAD, наиболее длительной и ресурсоемкой операцией является выделение полигональных контуров из набора точек с целевыми значениями уклонов. В дальнейшем автором будет вестись работа над оптимизацией скорости и производительности программной реализации метода.

## Список источников

1. Береговой Д. В. Создание топографических планов на основе данных съемки с беспилотного летательного аппарата и автоматизации процесса дешифрирования: специальность 25.00.32 «Геодезия»: дисс. … канд. наук / Д. В. Береговой. — СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2018.

2. Ткачева А. Использование данных дистанционного зондирования земли при трехмерном моделировании естественных ландшафтных сцен / А. Ткачева // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. — 2014. — № 5(57). — С. 136–144.

3. Федорова А. А. Сравнение методов классификации облаков точек, полученных с помощью технологии LIDAR / А. А. Федорова, Д. Д. Нурлыева, А. С. Желанкина, Е. А. Елисеева и др. // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных, 27–28 апреля 2022 года. — М.: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2022. — Т. 1. — С. 262–267.

4. Масурадзе Ш. Г. Решение инженерных дорожных задач на основе данных мобильного лазерного сканирования / Ш. Г. Масурадзе, И. Г. Майсурадзе // САПР и ГИС автомобильных дорог. — 2016. — № 2(7). — С. 50–53. — DOI: 10.17273/CADGIS.2016.2.2.

5. Позняк И. Метод оценки колейности автомобильных дорог с использованием мобильного лазерного сканирования / И. Позняк, И. Масурадзе, Ш. Масурадзе // Конструкторское Бюро. — 2017. — № 5.

6. Меньшиков А. Фотограмметрический метод измерения колейности усовершенствованных дорожных покрытий / А. Меньшиков, Н. Скоморохова // Наука, техника и образование. — 2016. — № 7(25). — С. 48–49. — DOI: 10.20861/2312-8267-2016-25-002.

7. Лушников Н. Измерение глубины колеи на покрытии автомобильной дороги методом лазерного сканирования / Н. Лушников, П. Лушников, Т. Лалова, Д. Ковалев // Дороги и мосты. — 2020. — № 2(44). — С. 138–144.

8. Гребенюк Е. А. Мобильное лазерное сканирование городских дорог: оценка трудозатрат для получения качественного результата / Е. А. Гребенюк, С. И. Ротков // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон», 19–21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. — М.: Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, 2023. — С. 701–709. — DOI: 10.20948/graphicon-2023-701-709.

9. Wumming Z. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation / Z. Wumming, Q. Jianbo, W. Peng et al. // Remote Sensing. — 2016. — Vol. 8(6). — DOI: 10.3390/rs8060501.

10. Zhiyang Z. P-CSF Polar coordinate cloth simulation filtering algorithm for multi-type tunnel point clouds / Z. Zhiyang, C. Bingtao, L. Yuan et al. // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2025. — Vol. 155. — Part 1. — DOI: 10.1016/j.tust.2024.106144.

11. Выстрчил М. Г. Алгоритм выделения точек земной поверхности из данных воздушного лазерного сканирования / М. Г. Выстрчил, Т. И. Балтыжакова, А. Ю. Романчиков, А. А. Аникеева // Геодезия и картография. — 2024. — № 2. — С. 2–11. — DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-2-11.

Дата поступления: 25.04.2025
Решение о публикации: 29.05.2025

**Контактная информация:**
ГРЕБЕНЮК Егор Александрович — инженер;
Inj5@yandex.ru

# A Method for the Detection of Motorway Rutting and Vertical Structural Damage Using Point Clouds on Extreme Gradients

**E. A. Grebenyuk[1,2]**

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 B, Polytechnicheskaya str., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation
[2]Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU), 65, Ilinskaya str., Nizhny Novgorod, 603000, Russia

**For citation:** *Grebenyuk E. A.* A Method for the Detection of Motorway Rutting and Vertical Structural Damage Using Point Clouds on Extreme Gradients. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 467–475. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-467-475

## Summary

In the context of road survey with laser scanning technology, the identification of road structure elements and rutting using point clouds poses a significant challenge. In practice, it is not always feasible to perform scanning in accordance with all the established rules. This is due to the fact that point clouds may contain a significant amount of noise, and in certain areas, a lack of point density precludes the utilization of automatic classification algorithms. Furthermore, the complexity and lack of optimization of a number of algorithms often necessitates the limitation of the data researched and the significant consumption of available computer hardware resources. Consequently, the processing of the data is predominantly manual. **Purpose:** A method for identifying sloping/vertical structures and rutting should be developed. This method should be based on slope analysis between neighbouring cloud points. The focus should be on big data performance and the predictive value of hardware computing resource consumption. **Methods**: The present study employs point cloud transformation in conjunction with land classification according to the CSF algorithm. The method under consideration was implemented in the C++ programming language as an add-on to nanoCAD system of automated design (SAD) for working with point clouds in its environment. The GEOS open source geometry library was used as an auxiliary tool for the generation of contour. The validation of the proposed method was carried out by laser scanning inspection of St. Petersburg roads. **Practical significance:** The computational complexity of the method is dependent to a quadratic degree on the size of the point cloud, whilst remaining independent of its volume, a property that facilitates its application in the processing of lower quality point clouds. **Results**: A user is provided with a set of polygons (closed contours) for the required slope values, with the option of drawing polygons of a specified area.

**Keywords:** Motorways, ruts, point clouds, road maintenance, laser scanners, point cloud classification.

## References

1. Beregovoy D. V. *Sozdanie topograficheskikh planov na osnove dannykh s"emki s bespilotnogo letatel'nogo apparata i avtomatizatsii protsessa deshifrirovaniya: spetsial'nost' 25.00.32 “Geodeziya”: diss. ... kand. nauk* [Creation of topographic plans based on unmanned aerial vehicle survey data and automation of the interpretation process: specialty 25.00.32 “Geodesy”: diss. ... candidate of sciences]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet Publ., 2018. (In Russian)

2. Tkacheva A. Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli pri trekhmernom modelirovanii estestvennykh landshaftnykh stsen [Use of remote sensing data in three-dimensional modeling of natural landscape scenes]. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M. F. Reshetneva*

[Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev]. 2014, Iss. 5(57), pp. 136–144. (In Russian)

3. Fedorova A. A., Nurlyeva D. D., Zhelankina A. S., Eliseeva E. A. et al. Sravnenie metodov klassifikatsii oblakov tochek, poluchennykh s pomoshch'yu tekhnologii LIDAR [Comparison of classification methods for point clouds obtained using LIDAR technology]. *Iskusstvennyy intellekt v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya i obrabotki dannykh, 27–28 aprelya 2022 goda* [Artificial Intelligence in Automated Control Systems and Data Processing, April 27–28, 2022]. Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet imeni N. E. Baumana (natsional'nyy issledovatel'skiy universitet) Publ., 2022, vol. 1, pp. 262–267. (In Russian)

4. Masuradze Sh. G., Maysuradze I. G. Reshenie inzhenernykh dorozhnykh zadach na osnove dannykh mobil'nogo lazernogo skanirovaniya [Solving road engineering problems based on mobile laser scanning data]. *SAPR i GIS avtomobil'nykh dorog* [CAD and GIS of highways]. 2016, Iss. 2(7), pp. 50–53. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.2.2. (In Russian)

5. Poznyak I., Masuradze I., Masuradze Sh. Metod otsenki koleynosti avtomobil'nykh dorog s ispol'zovaniem mobil'nogo lazernogo skanirovaniya [Method for assessing rutting of roads using mobile laser scanning]. *Konstruktorskoe Byuro* [Design Bureau]. 2017, Iss. 5. (In Russian)

6. Men'shikov A., Skomorokhova N. Fotogrammetricheskiy metod izmereniya koleynosti usovershenstvovannykh dorozhnykh pokrytiy [Photogrammetric method for measuring rutting of improved road surfaces]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, technology and education]. 2016, Iss. 7(25), pp. 48–49. DOI: 10.20861/2312-8267-2016-25-002. (In Russian)

7. Lushnikov N., Lushnikov P., Lalova T., Kovalev D. Izmerenie glubiny kolei na pokrytii avtomobil'noy dorogi metodom lazernogo skanirovaniya [Measuring the rut depth on the road surface using laser scanning]. *Dorogi i mosty* [Roads and Bridges]. 2020, Iss. 2(44), pp. 138–144. (In Russian)

8. Grebenyuk E. A., Rotkov S. I. Mobil'noe lazernoe skanirovanie gorodskikh dorog: otsenka trudozatrat dlya polucheniya kachestvennogo rezul'tata [Mobile laser scanning of urban roads: assessment of labor costs for obtaining a high-quality result]. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii po komp'yuternoy grafike i zreniyu "Grafikon", 19–21 sentyabrya 2023 g., Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova RAN* [Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision "Graphicon", September 19–21, 2023, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences]. Moscow: Institut prikladnoy matematiki im. M. V. Keldysha RAN Publ., 2023, pp. 701–709. DOI: 10.20948/graphicon-2023-701-709. (In Russian)

9. Wumming Z., Jianbo Q., Peng W. et al. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. Remote Sensing, 2016, vol. 8(6). DOI: 10.3390/rs8060501.

10. Zhiyang Z., Bingtao C., Yuan L. et al. P-CSF Polar coordinate cloth simulation filtering algorithm for multi-type tunnel point clouds. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, vol. 155, part 1. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106144.

11. Vystrchil M. G., Baltyzhakova T. I., Romanchikov A. Yu., Anikeeva A. A. Algoritm vydeleniya tochek zemnoy poverkhnosti iz dannykh vozdushnogo lazernogo skanirovaniya [Algorithm for extracting earth's surface points from airborne laser scanning data]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography]. 2024, Iss. 2, pp. 2–11. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-2-11. (In Russian)

Received: April 25, 2025
Accepted: May 29, 2025

**Author's information:**
Egor A. GREBENYUK — Engineer; Inj5@yandex.ru

УДК 625.1

# Методика выбора мест и способов заготовки материалов верхнего строения пути при восстановлении железных дорог силами Железнодорожных войск и структурных подразделений ОАО «РЖД»

**А. А. Мирошник**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Мирошник А. А.* Методика выбора мест и способов заготовки материалов верхнего строения пути при восстановлении железных дорог силами Железнодорожных войск и структурных подразделений ОАО «РЖД» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 476–483. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-476-483

## Аннотация

**Цель:** Оптимальный выбор мест и способов заготовки материалов верхнего строения пути при восстановлении железных дорог силами Железнодорожных войск и структурных подразделений ОАО «РЖД». **Метод:** Линейное программирование. **Результаты:** Предложена оптимальная методика выбора мест и способов заготовки материалов верхнего строения пути. **Практическая значимость:** Методику выбора мест и способов заготовки материалов верхнего строения пути силами Железнодорожных войск и структурных подразделений ОАО «РЖД» можно рекомендовать использовать при восстановлении железных дорог в границах территориальной ответственности, например в районе проведения специальной военной операции.

**Ключевые слова:** Материалы верхнего строения пути, материально-техническое обеспечение, восстановление железных дорог, математическая модель, система материально-технического обеспечения, целевая функция, ограничения модели.

## Введение

Основой автоматизированной методики выбора мест и способов заготовки материалов в системе материально-технического обеспечения является одноименная задача (модель), сформулированная в [1, 2] как задача линейного программирования. Автором предложен подход использования модели линейного программирования для выбора мест и способов заготовки материалов верхнего строения пути (далее — ВСП) в рамках моделирования системы материально-технического обеспечения Железнодорожных войск при взаимодействии со структурными подразделениями (спецформированиями) ОАО «РЖД».

В настоящее время значительный фонд оптимизационных программ, созданных для ЭВМ старого поколения, невозможно использовать для реализации в IBM-совместимых компьютерах на базе современных процессоров. Наряду с этим разработка таких программ для указанных выше ПЭВМ требует существенных затрат временных и интеллектуальных ресурсов. Поэтому представление, в рамках приложения, порядка применения в среде пакета прикладных программ MathCAD широкого класса задач оптимизации — задач линейного программирования является весьма актуальным.

Задача выбора мест и способов заготовки материалов ВСП при восстановлении железных

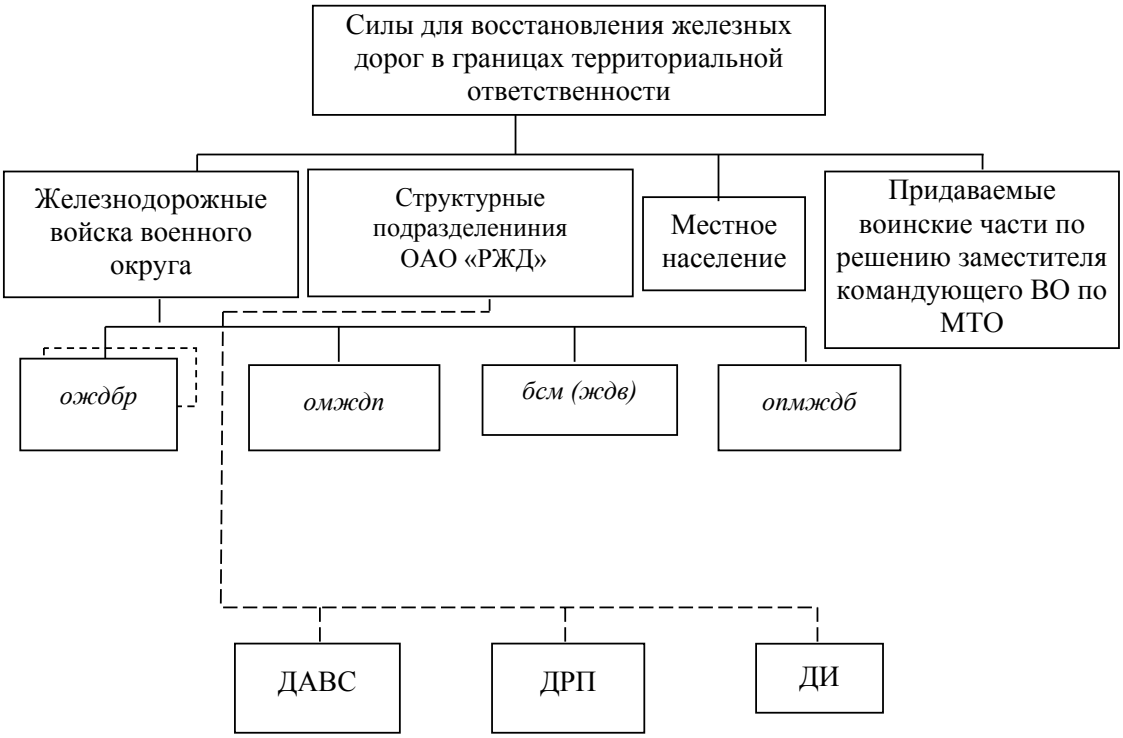



**Рис. 1.** Структура сил для восстановления железных дорог в границах территориальной ответственности

дорог является актуальной и непростой. Структура сил, предназначенных для восстановления железных дорог в границах территориальной ответственности, представлена на рис. 1.

В реальных условиях возможны изменения типового состава по задачам и условиям их выполнения, используя линейное програмирование [3–5].

## Постановка задачи

На восстанавливаемом участке располагаются $N$ ($r$ = 1, 2, ... $N$) мест потребления материалов ВСП. Надобность материалов в $r$-месте в τ-е сутки (τ = 1, 2, …, $T$) — $Q_{r\tau}$ (км). Материалы ВСП возможно заготовлять в $m$ ($i$ = 1, 2, …, $m$) местах по одному из $n$ ($j$ = 1, 2, …, $n$) предложенных способов. Допустимость принятия материалов ВСП в месте $i$ по способу $j$ в τ-е сутки — $\Pi_{ij\tau}$ (км). Приведенные затраты составляют $C_{ijr}$ (чел.-дней). Транспортировку материалов ВСП в τ-е сутки осуществляет автотранспорт грузоподъемностью $g_\tau$ (т). Пробег в сутки с грузом равен $l_\tau$ (км). Протяженность между $r$-м местом потребления материалов ВСП и $ij$-м местом заготовки равно $l_{ijr}$ (км).

Определим оптимальный (своевременный и полный) план заготовоки материалов ВСП, учитывая наличие автотранспорта и ресурсные затраты.

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{r=1}^{N}\sum_{\tau=1}^{T} C_{ijr}x_{ijr\tau} \to \min; \quad (1)$$

ограничения:

$$\sum_{r=1}^{N} x_{ijr\tau} \le \Pi_{ij\tau} \quad (\tau = \overline{1,T}), \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} x_{ijr\tau} = Q_{r\tau} \quad (\tau = \overline{1,T},\ r = \overline{1,N}), \quad (3)$$

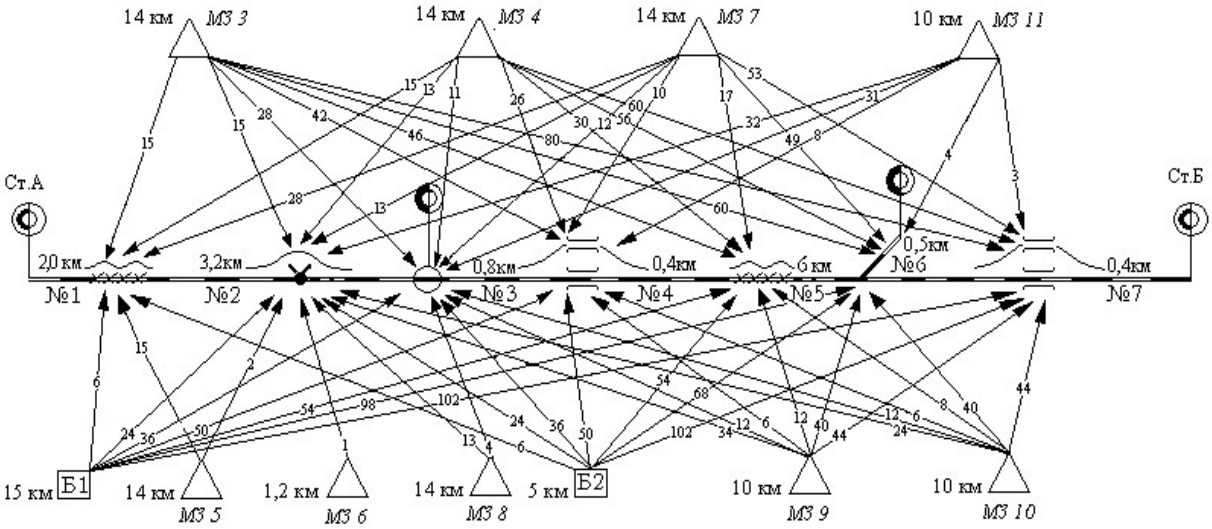



**Рис. 2.** Возможные места заготовки и плечи подвоза материалов верхнего строения пути

Таблица 1. Наличие материалов и возможности их заготовки

| Номера объектов, *r* | Наличие $П_{ij\tau}$ | | | | Номер схемы заготовки |
|---|---|---|---|---|---|
| | День 3 τ | День 4 τ | День 5 τ | День 6 τ | |
| База 1 | 15 | — | — | — | 1 |
| База 2 | 5 | — | — | — | 2 |
| *мз* 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| *мз* 4 | 2 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| *мз* 5 | 2 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| *мз* 6 | 1,2 | — | — | — | 3 |
| *мз* 7 | 2 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| *мз* 8 | 2 | 4 | 4 | 4 | 6 |
| *мз* 9 | — | 2 | 4 | 4 | 3 |
| *мз* 10 | — | 2 | 4 | 4 | 7 |
| *мз* 11 | — | 2 | 4 | 4 | 3 |

Таблица 2. Потребность материалов для восстановления ВСП

| Номера объектов, *r* | Потребность по дням восстановления $Q_{r\tau}$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | День 3 τ | День 4 τ | День 5 τ | День 6 τ |
| 1 | 2,0 | — | — | — |
| 2 | — | 3,2 | — | — |
| 3 | — | — | 0,8 | |
| 4 | — | — | — | 0,4 |
| 5 | | 2,0 | 4,0 | — |
| 6 | — | — | — | 0,5 |
| 7 | — | — | — | 0,4 |
| Итого | 2,0 | 5,2 | 4,8 | 1,3 |

Таблица 3. Характеристики возможностей автотранспорта

| Грузоподъемность автотранспорта по суткам, т | | | | Средне-суточный пробег, км | Вес 1 км материалов ВСП, т |
|---|---|---|---|---|---|
| День 3 τ | День 4 τ | День 5 τ | День 6 τ | | |
| 30 | 130 | 100 | 20 | 100 | 210 |

Таблица 4. Макет приведенных затрат ресурсов $C_{ijr}$

| Номера баз (пунктов заготовок) | Наличие материалов на каждом пункте | Номера объектов | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | | Потребность материалов $Q_r$ на каждом из них | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Таблица 5. Макет формы исходных данных

| Имеющиеся материалы $П_{ij\tau}$ | | Надобность материалов для объектов $Q_{r\tau}$ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | День 3 | День 4 | | День 5 | | День 6 | | |
| | | № объектов | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 5 | 3 | 5 | 4 | 6 | 7 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{r=1}^{N} l_{ijr}\cdot x_{ijr\tau} \le \frac{g_\tau \cdot l_\tau}{p_1} \quad (\tau=\overline{1,T}), \qquad (4)$$

где $p_1$ — вес 1 км ВСП, т.

Зависимость (1) — целевая функция задачи, устанавливает минимизацию затрат потребляемых ресурсов. Ограничения (2), (3) и (4) означают ограничения по:

– наличию материалов ВСП на базах и местах заготовки;

– потребности в материалах восстанавливаемых объектов;

– потребности в автомобильном транспорте.

Данные (исходные) представлены на рис. 2 и в табл. 1–4.

Кроме этого, в табл. 5 приведена структура искомых величин задачи, т. е. множество таких $x_{i,j}$ $(i=\overline{1,11},\ j=\overline{1,7})$.

## Результаты исследования

Решение задачи начинается с ввода данных в матрицы и переменные, представленные на рис. 3. Данные в матрицу **nal** переносятся из табл. 1, в матрицу **z** — из табл. 4, в матрицу **at** — из табл. 3, а матрица **r** формируется на основе рис. 1, причем *i*-я строка в ней должна содержать расстояния от *i*-го пункта заготовки (базы) до всех объектов в порядке возрастания их номеров. Если на рис. 1 пункт заготовки(база) с объектом не соединяется, то в матрицу записываем 500.

Матрица **ob** формируется на основе информации из табл. 5. Следующим шагом решения задачи является формирование исходного допустимого решения задачи [6, 7] (рис. 4).

Искомым величинам задачи $x_{i,j}$ присваивают нулевые значения. Все остальные данные (рис. 3) вводятся без изменений.

Следует отметить, что ограничения по неотрицательности переменных ($x_{i,j} \ge 0$) задаются одним оператором $x \ge 0$.

На рис. 5 изображенны ограничения по:

– наличию материалов ВСП на *i*-й базе (пункте, месте заготовки);

– по потребности *r*-го объекта в материалах ВСП для определенного дня работы.

**Массив наличия**

$$\mathbf{nal} := \begin{pmatrix} 15&0&0&0\\ 5&0&0&0\\ 2&4&4&4\\ 2&4&4&4\\ 2&4&4&4\\ 12&0&0&0\\ 2&4&4&4\\ 2&4&4&4\\ 0&2&4&4\\ 0&2&4&4\\ 0&2&4&4 \end{pmatrix}$$

**Массив расстояний между базами (пунктами заготовки) и объектами**

$$\mathbf{r} := \begin{pmatrix} 6&24&36&50&54&98&102\\ 6&24&36&50&54&38&102\\ 15&15&28&42&46&60&80\\ 15&13&11&26&30&56&60\\ 15&2&500&500&500&500&500\\ 500&1&500&500&500&500&500\\ 28&13&12&13&17&49&53\\ 500&13&4&500&500&500&500\\ 500&84&12&6&12&40&44\\ 500&24&12&6&8&40&44\\ 500&32&31&8&500&3&4 \end{pmatrix}$$

**Массив приведенных затрат**

$$\mathbf{z} := \begin{pmatrix} 92&122&208&386.5&321&581&703\\ 67.2&92.8&180.5&355&130.6&549.5&674\\ 0&115.5&200&367&151.8&492&599\\ 123&87.1&136.7&268.5&129.2&391&476\\ 213.3&178.6&0&0&0&0&0\\ 0&96.2&0&0&0&0&0\\ 149.5&200.2&96.5&189&110.3&354.5&435\\ 0&104.6&133.3&0&0&0&0\\ 0&129.1&141.5&147.5&98.8&310&369.5\\ 0&129.2&141.5&149.5&98.8&310&369.5\\ 0&143&174&159.5&0&201&262.5 \end{pmatrix}$$

**Массив возможностей автотранспорта подвоза**

$$\mathbf{at} := (30\ 130\ 100\ 20\ 100\ 210)$$

**Массив номеров дней работы, номеров объектов и потребностей**

$$\mathbf{ob} := \begin{pmatrix} 3&4&4&5&5&6&6&6\\ 1&2&5&3&5&4&6&7\\ 2&3.2&2&0.8&4&0.4&0.5&0.4 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{nstr} := 11 \quad \mathbf{nstlb} := 8$$

**Рис. 3.** Исходные данные задачи

**Модификация массива приведенных затрат**

$ORIGIN := 1$ $\quad j := 1..nstlb$ $\quad i := 1..nstr$

$$nnl(k,m) := \begin{cases} 1 & \text{if } (k > 0 \wedge m > 0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \qquad a_{i,j} := nnl\left(nal_{i,ob_{1,j}-2}, z_{i,ob_{2,j}}\right) \qquad zmod_{i,j} := z_{i,ob_{2,j}}$$

$$c_{i,j} := zmod_{i,j} \cdot a_{i,j}$$

**Целевая функция задачи**

$$f(x) := \sum_{i=1}^{nstr} \sum_{j=1}^{nstlb} c_{i,j} \cdot x_{i,j}$$

**Исходное решение задачи**

$i := 1..nstr \quad j := 1..nstlb \quad x_{i,j} := 0$

**Блок решения задачи**

**Given**

$x \geq 0$

**Рис. 4.** Формирование допустимого (исходного) решения задачи

**Ограничения по наличию материалов на базах и пунктах заготовки в Д3, Д4, Д5 и Д6**

| | | | |
|---|---|---|---|
| $x_{1,1} \leq nal_{1,1}$ | $x_{3,2}+x_{3,3} \leq nal_{3,2}$ | $x_{3,4}+x_{3,5} \leq nal_{3,2}$ | $x_{3,6}+x_{3,7}+x_{3,8} \leq nal_{3,4}$ |
| $x_{2,1} \leq nal_{2,1}$ | $x_{4,2}+x_{4,3} \leq nal_{4,2}$ | $x_{4,4}+x_{4,5} \leq nal_{4,3}$ | $x_{4,6}+x_{4,7}+x_{4,8} \leq nal_{4,4}$ |
| $x_{4,1} \leq nal_{4,1}$ | $x_{5,2} \leq nal_{5,2}$ | $x_{7,4}+x_{7,5} \leq nal_{7,3}$ | $x_{7,6}+x_{7,7}+x_{7,8} \leq nal_{4,4}$ |
| $x_{5,1} \leq nal_{5,1}$ | $x_{7,2}+x_{7,3} \leq nal_{7,2}$ | $x_{8,4} \leq nal_{8,3}$ | $x_{9,6}+x_{9,7}+x_{9,8} \leq nal_{9,4}$ |
| $x_{7,1} \leq nal_{7,1}$ | $x_{8,2} \leq nal_{8,2}$ | $x_{9,4}+x_{9,5} \leq nal_{9,3}$ | $x_{10,6}+x_{10,7}+x_{10,8} \leq nal_{10,4}$ |
| | $x_{9,2}+x_{9,3} \leq nal_{9,2}$ | $x_{10,4}+x_{10,5} \leq nal_{10,3}$ | $x_{11,6}+x_{11,7}+x_{11,8} \leq nal_{11,4}$ |
| | $x_{10,2}+x_{10,3} \leq nal_{10,2}$ | $x_{11,2} \leq nal_{11,2}$ | $x_{11,4} \leq nal_{11,3}$ |

**Ограничения по потребности в материалах**

| | |
|---|---|
| объекта №1 в Д3 | $x_{1,1}+x_{2,1}+x_{4,1}+x_{5,1}+x_{7,1} = ob_{3,1}$ |
| объекта №1 в Д4 | $x_{3,2}+x_{4,2}+x_{5,2}+x_{7,2}+x_{8,2}+x_{9,2}+x_{10,2}+x_{11,2} = ob_{3,2}$ |
| объекта №1 в Д4 | $x_{3,3}+x_{4,3}+x_{7,3}+x_{9,3}+x_{10,3} = ob_{3,3}$ |
| объекта №1 в Д5 | $x_{3,4}+x_{4,4}+x_{7,4}+x_{8,4}+x_{9,4}+x_{10,4}+x_{11,4} = ob_{3,4}$ |
| объекта №1 в Д5 | $x_{3,5}+x_{4,5}+x_{7,5}+x_{9,5}+x_{10,5} = ob_{3,5}$ |
| объекта №1 в Д6 | $x_{3,6}+x_{4,6}+x_{7,6}+x_{9,6}+x_{10,6}+x_{11,6} = ob_{3,6}$ |
| объекта №1 в Д6 | $x_{3,7}+x_{4,7}+x_{7,7}+x_{9,7}+x_{10,7}+x_{11,7} = ob_{3,7}$ |
| объекта №1 в Д6 | $x_{3,8}+x_{4,8}+x_{7,8}+x_{9,8}+x_{10,8}+x_{11,8} = ob_{3,8}$ |

**Рис. 5.** Ограничения по наличию и потребности в материалах

**Ограничение по потребности автотранспорта подвоза**

в Д3 $\quad r_{1,1} \cdot x_{1,1}+r_{2,1} \cdot x_{2,1}+r_{4,1} \cdot x_{4,1}+r_{5,1} \cdot x_{5,1}+r_{7,1} \cdot x_{7,1} \leq at_{1,1} \cdot at_{1,5}/at_{1,6}$

в Д4 $\quad r_{3,2} \cdot x_{3,2}+r_{4,2} \cdot x_{4,2}+r_{5,2} \cdot x_{5,2}+r_{7,2} \cdot x_{7,2}+r_{8,2} \cdot x_{8,2}+r_{9,2} \cdot x_{9,2} \ldots \leq at_{1,2} \cdot at_{1,5}/at_{1,6}$

$r_{10,2} \cdot x_{10,2}+r_{11,2} \cdot x_{11,2}+r_{3,5} \cdot x_{3,3}+r_{4,5} \cdot x_{4,3}+r_{7,5} \cdot x_{7,3}+r_{9,5} \cdot x_{9,3}+r_{10,5} \cdot x_{10,3}$

в Д5 $\quad r_{3,3} \cdot x_{3,4}+r_{4,3} \cdot x_{4,4}+r_{7,3} \cdot x_{7,4}+r_{8,3} \cdot x_{8,4}+r_{9,3} \cdot x_{9,4}+r_{10,3} \cdot x_{10,4} \ldots \leq at_{1,3} \cdot at_{1,5}/at_{1,6}$

$r_{11,3} \cdot x_{11,4}+r_{3,5} \cdot x_{3,5}+r_{4,5} \cdot x_{4,5}+r_{7,5} \cdot x_{7,5}+r_{9,5} \cdot x_{9,5}+r_{10,5} \cdot x_{10,5}$

в Д6 $\quad r_{3,4} \cdot x_{3,6}+r_{4,4} \cdot x_{4,6}+r_{7,4} \cdot x_{7,6}+r_{9,4} \cdot x_{9,6}+r_{10,4} \cdot x_{10,6}+r_{11,4} \cdot x_{11,6} \ldots \leq at_{1,4} \cdot at_{1,5}/at_{1,6}$

$r_{3,6} \cdot x_{3,7}+r_{4,6} \cdot x_{4,7}+r_{7,6} \cdot x_{7,7}+r_{9,6} \cdot x_{9,7}+r_{10,6} \cdot x_{10,7}+r_{11,6} \cdot x_{11,7} \ldots$

$r_{3,7} \cdot x_{3,8}+r_{4,7} \cdot x_{4,8}+r_{7,7} \cdot x_{7,8}+r_{9,7} \cdot x_{9,8}+r_{10,7} \cdot x_{10,8}+r_{11,7} \cdot x_{11,8}$

**Стандартная встроенная функция решения задачи**

$X := Minimize(f, x)$

X =

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 3.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0.8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.4 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.4 |

**Рис. 6 и**ллюстрирует группу ограничений по потребности в автомобильном транспорте в каждый день работы

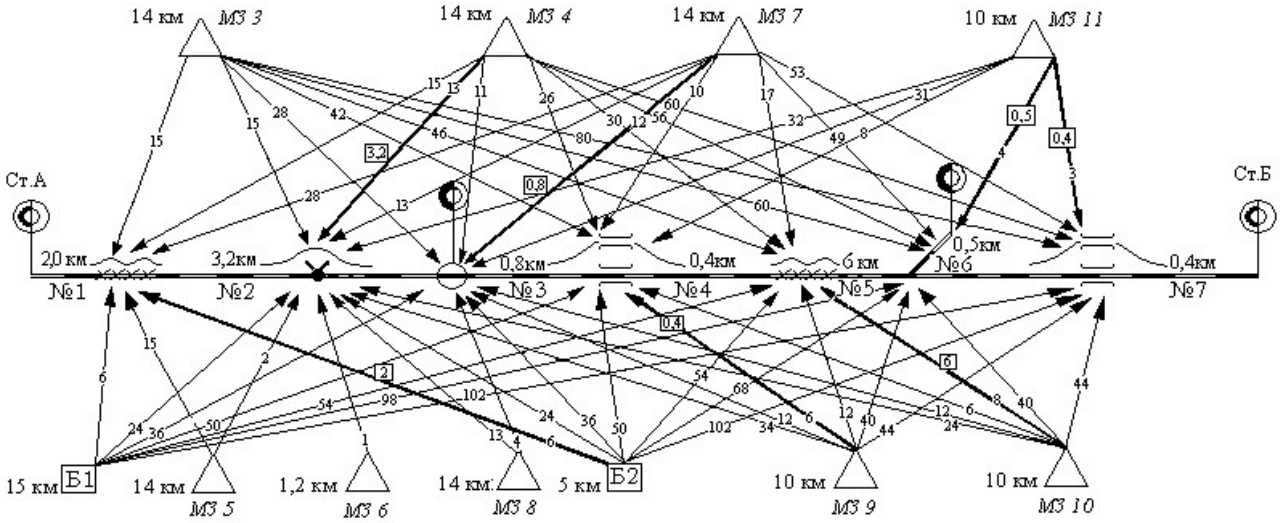



**Рис. 7.** Прикрепление объектов к базам (местам заготовок)

Результатом реализации программы для ЭВМ [8] является массив X, элемент $x_{i,j} \neq 0$ которого свидетельствует о том, что объекту, порядковый номер которого в табл. 5 равен *j*, необходимо подать с *i*-й базы (пункта заготовки) материалы в объеме $x_{i,j}$ км. При этом день, в который должна быть осуществлена подача, определятся по $x_{i,j}$ в табл. 5.

Графическая иллюстрация результатов решения приведена на рис. 7. На этом рисунке прикрепление объектов к базам (пунктам заготовок) выделено жирными линиями.

## Заключение

Решения задач линейного программирования приведены в [9, 10], однако методику выбора мест и способов заготовки материалов верхнего строения пути при восстановлении железных дорог силами Железнодорожных войск и структурных подразделений ОАО «РЖД» с применением программы для ЭВМ [8], представленной в этой статье, можно рекомендовать к использованию, например, в районе проведения специальной военной операции с целью принятия оперативных решений в быстро меняющейся тактической обстановке.

## Список источников

1. Черных А. К. Моделирование системы технического прикрытия железнодорожной сети в операциях: дисс. … д-ра техн. наук / А. К. Черных. — СПб.: ВАТТ, 2010. — 343 с.

2. Сизов Е. Б. Организация технического прикрытия железных дорог: монография / Е. Б. Сизов. — СПб.: ВТУ ЖДВ, 2008. — 238 с.

3. Низов А. С. Организация материально-технического обеспечения железнодорожных войск: учебное пособие / А. С. Низов, Д. И. Попов, Г. А. Ложечников. — СПб.: ВАМТО, 2013. — 359 с.

4. Черных А. К. Решение задачи выбора мест и способов заготовки материалов верхнего строения пути в среде ППП MathCAD / А. К. Черных, А. А. Коричев // Научно-технический сборник. — СПб.: ВТУ ЖДВ РФ, 2004. — Вып. 8. — С. 248–261.

5. Мирошник А. А. Моделирование материально-технического обеспечения восстановления железных дорог / А. А. Мирошник, А. К. Черных // Сборник статтей III Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 2. — Пермь: Изд-во ПВИ войск национальной гвардии, 2017. — С. 58–65.

6. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т. 1 / Г. Вагнер. — М.: Мир, 1972. — 335 с.

7. Бирман И. Я. Оптимальное программирование / И. Я. Бирман. — М.: Экономика, 1968. — 368 с.

8. Свид. 2018615035 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: публ. 23.04.2018. Заявка № 2018612570 от Патентное ведомство: 12.03.2018. Федеральная служба по интеллектуальной собственности («Роспатент»).

9. Дьяконов В. MathCAD 2000: учебный курс / В. Дьяконов. — СПб.: Питер, 2000. — 425 с.

10. Кудрявцев Е. М. MathCAD 2000 Pro / Е. М. Кудрявцев. — М.: ДМК Пресс, 2001. — 398 с.

Дата поступления: 05.04.2025
Решение о публикации: 29.05.2025

**Контактная информация:**
МИРОШНИК Александр Анатольевич — канд. техн. наук, доц.; alexmiroschnik@mail.ru

# Methodology for Selecting Locations and Procuring Materials for the Rehabilitation of Railway Track Superstructures by the Railway Troops and Structural Subdivisions of JSC "Russian Railways"

**A. A. Miroshnik**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Miroshnik A. A. Methodology for Selecting Locations and Procuring Materials for the Rehabilitation of Railway Superstructures by the Railway Troops and Structural Subdivisions of JSC "Russian Railways". *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 476–483. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-476-483

## Summary

**Purpose:** To select the optimal locations and methods for procuring materials for the rehabilitation of railway superstructures by the railway troops and structural divisions of JSC 'Russian Railways'. **Method:** Linear programming. **Results:** A method for selecting locations and procuring materials for the rehabilitation of railway superstructures has been proposed. **Practical significance:** This methodology can be applied by the railway troops and structural divisions of JSC "Russian Railways" to select locations and procure materials for the rehabilitation of railway superstructures within their areas of territorial responsibility, for example in the area of the special military operation.

**Keywords:** Materials for the track superstructure, procurement, rehabilitation of railways, mathematical model, logistics system, target function, model constraints.

## References

1. Chernykh A. K. *Modelirovanie sistemy tekhnicheskogo prikrytiya zheleznodorozhnoy seti v operatsiyakh: diss. … d-ra tekhn. nauk* [Modeling the technical cover system of the railway network in operations: diss. … Doctor of Engineering Sciences]. St. Petersburg: VATT Publ., 2010, 343 p. (In Russian)

2. Sizov E. B. *Organizatsiya tekhnicheskogo prikrytiya zheleznykh dorog: monografiya* [Organization of technical cover of railways: monograph]. St. Petersburg: VTU ZhDV Publ., 2008, 238 p. (In Russian)

3. Nizov A. S., Popov D. I., Lozhechnikov G. A. *Organizatsiya material'no-tekhnicheskogo obespecheniya zheleznodorozhnykh voysk: uchebnoe posobie* [Organization

of material and technical support of railway troops: a tutorial]. VAMTO Publ., 2013, 359 p. (In Russian)

4. Chernykh A. K., Korichev A. A. Reshenie zadachi vybora mest i sposobov zagotovki materialov verkhnego stroeniya puti v srede PPP MathCAD [Solution of the problem of selecting places and methods for procurement of track superstructure materials in the MathCAD environment]. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik* [Scientific and technical collection]. St. Petersburg: VTU ZhDV RF Publ., 2004, Iss. 8, pp. 248–261. (In Russian)

5. Miroshnik A. A., Chernykh A. K. Modelirovanie material'no-tekhnicheskogo obespecheniya vosstanovleniya zheleznykh dorog [Modeling of material and technical support for the restoration of railways]. *Sbornik stattey III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 ch. Ch. 2* [Collection of articles of the III International scientific and practical conference: in 2 parts. Part 2]. Perm': Izd-vo PVI voysk natsional'noy gvardii, 2017, pp. 58–65. (In Russian)

6. Vagner G. *Osnovy issledovaniya operatsiy* [Fundamentals of Operations Research.] Moscow: Mir Publ., 1972, vol. 1, 35 p. (In Russian)

7. Birman I. Ya. *Optimal'noe programmirovanie* [Optimal programming]. Moscow: Ekonomika Publ., 1968, 368 p. (In Russian)

8. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM* [Certificate of state registration of a computer program]. Svidetel'stvo RF, no. 2018615035 Rossiyskaya Federatsiya.

9. D'yakonov V. *MathCAD 2000: uchebnyy kurs* [MathCAD 2000: training course]. St. Petersburg: Piter Publ., 2000, 425 p. (In Russian)

10. Kudryavtsev E. M. *MathCAD 2000 Pro*. Moscow: DMK Press Publ., 2001, 398 p. (In Russian)

Received: April 05, 2025
Accepted: May 29, 2025

**Author's information:**
Alexander A. MIROSHNIK — PhD in Engineering, Associate Professor; alexmiroschnik@mail.ru

УДК 656.259.12

# О возможности применения технологий искусственного интеллекта для определения и прогнозирования технического состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики

**В. А. Надежкин, С. А. Надежкина, А. Р. Мусин**

Приволжский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 443066, Самара, ул. Свободы, 2В

**Для цитирования:** *Надежкин В. А., Надежкина С. А., Мусин А. Р.* О возможности применения технологий искусственного интеллекта для определения и прогнозирования технического состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 484–491. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-484-491

## Аннотация

**Цель:** Рассмотреть влияние систем технического диагностирования и мониторинга (ТДМ) на восстанавливаемость устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Исследовать системные недостатки современных технологий диагностики, приводящие к росту эксплуатационных расходов и рискам для безопасности перевозочного процесса. Обосновать необходимость модернизации систем мониторинга на основе предиктивной аналитики для перехода от планово-предупредительных ремонтов (ППР) к интеллектуальным методам управления техническим состоянием оборудования. **Методы:** Анализ успешного внедрения отечественных систем, как АПК-ДК, включая их функциональные возможности по сбору данных, выявлению предотказных состояний и автоматизированной идентификации неисправностей. Исследование графических данных, отражающих динамику параметров работы рельсовых цепей, для выявления отклонений штатного функционирования, предшествующих отказам. Сравнение традиционных методов ППР с современными подходами, основанными на предиктивной аналитике и машинном обучении. **Результаты:** Выявлены ключевые недостатки существующих систем мониторинга, такие как ложные срабатывания и неспособность справляться с современными нагрузками. Показано, что предиктивная аналитика позволяет обнаруживать малозаметные изменения параметров (например, колебания напряжения, температурные отклонения), которые свидетельствуют о развитии предотказных состояний. На примере графиков рельсовых цепей продемонстрированы характерные периоды: стабильная работа и появление аномалий перед отказом, а также отказное состояние. **Практическая значимость:** Показана целесообразность развития ТДМ за счет применения технологий предиктивной аналитики и цифрового моделирования, что позволит минимизировать аварийные ситуации, оптимизировать техническое обслуживание за счет адресных ремонтов и снизить эксплуатационные затраты. Модернизация систем ЖАТ является необходимым условием для повышения надежности и безопасности железнодорожной инфраструктуры в условиях роста грузооборота и интенсивности эксплуатации. Результаты исследования могут быть использованы для разработки систем раннего предупреждения отказов и обновления нормативной базы в области технической диагностики.

**Ключевые слова:** Техническая диагностика, мониторинг устройств ЖАТ, предиктивная аналитика, восстановимость оборудования, ложные срабатывания, железнодорожная автоматика и телемеханика, интеллектуальные системы мониторинга, отказы рельсовых цепей.

## Введение

В современных условиях на железнодорожном транспорте осуществляется внедрение перспективных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), созданных на основе современной микропроцессорной элементной базы. К числу таких систем относится автоматизированная система диспетчерского контроля АПК-ДК [1].

В функционал комплекса АПК-ДК входит не только реализация стандартных задач систем диспетчерского контроля, таких как предоставление оперативной и достоверной информации о дислокации подвижного состава на контролируемом участке. Внедрение данной системы осуществляется в контексте формирования интегрированной автоматизированной системы управления хозяйством сигнализации, связи и вычислительной техники (АСУ-Ш), где АПК-ДК выполняет роль ключевого технологического компонента. Его назначение заключается в обеспечении всестороннего и объективного мониторинга состояния устройств автоматики и телемеханики в пределах зоны ответственности [2].

Автоматизированная система АПК-ДК осуществляет мониторинг и техническую диагностику устройств СЖАТ как на перегонных, так и на станционных участках. Функциональные возможности системы включают: сбор и систематизацию статистических данных о работе оборудования, выявление признаков предотказных состояний, анализ факторов, приводящих к снижению качества функционирования, автоматизированную идентификацию неисправностей устройств СЦБ.

Реализация указанных функций создает технологическую основу для перехода на прогностическую систему технического обслуживания СЖАТ, основанную на непрерывной диагностике оборудования, прогнозировании его состояния, учете фактического ресурса эксплуатации приборов. После чего получаемая диагностическая информация в автоматизированном режиме передается дежурному электромеханику, диспетчеру СЦБ-дистанции, техническим специалистам, ответственным за анализ статистики отказов, другим уполномоченным пользователям корпоративной сети различных уровней (от дистанционного до дорожного управления) [3, 4].

Современное состояние технического оснащения на значительной части железнодорожных участков Российской Федерации характеризуется высоким уровнем физического износа. Эксплуатационная практика вынуждает осуществлять планово-предупредительные ремонтные работы (ППР) в условиях временного дефицита, что неизбежно приводит к снижению качества выполняемых работ. В существующих условиях эксплуатации обеспечение надежной и безопасной работы технических средств невозможно без реализации современных систем постоянного контроля технического состояния и диагностики оборудования.

## Функциональные задачи систем мониторинга

Основной функциональной задачей систем мониторинга является комплексный анализ текущего состояния технических устройств с последующим оповещением обслуживающего персонала о необходимости проведения профилактических ремонтных мероприятий, что позволяет предотвратить возникновение аварийных ситуаций. Внедрение подобных систем создает предпосылки для перехода на прогрессивную технологию технического обслуживания, обеспечивающую:

– повышение эффективности использования производственных мощностей за счет увеличения межремонтных интервалов;

– выполнение адресных ремонтных воздействий исключительно на оборудовании, требующем вмешательства;

– минимизацию вероятности аварийных ситуаций, обусловленных внезапными отказами технических устройств.

Дополнительным экономическим эффектом от внедрения указанных систем является существенное снижение эксплуатационных затрат на техническое обслуживание железнодорожной инфраструктуры. В условиях постоянного роста грузооборота на железнодорожном транспорте и увеличения интенсивности эксплуатации инфраструктуры вопросы надежности и бесперебойной работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) приобретают особую актуальность [5]. Существующие системы мониторинга, разработанные в рамках устаревших технологических решений, зачастую не справляются с современными нагрузками, что приводит к росту количества отказов оборудования, незапланированным простоям и, как следствие, к значительным экономическим потерям.

Физический износ устройств СЦБ, рост требований к пропускной способности и необходимость минимизации эксплуатационных затрат диктуют потребность в принципиально новых подходах к организации систем диагностики и управления техническим состоянием оборудования. Традиционные методы планово-предупредительных ремонтов (ППР) уже не обеспечивают необходимой эффективности, поскольку не учитывают реальное состояние устройств и их фактическую наработку.

Внедрение современных интеллектуальных систем мониторинга, основанных на технологиях предиктивной аналитики и цифрового моделирования, позволит не только своевременно выявлять предотказные состояния оборудования, но и оптимизировать процессы технического обслуживания. Это, в свою очередь, обеспечит снижение эксплуатационных расходов, повысит безопасность движения и минимизирует простои, связанные с внезапными отказами.

Таким образом, модернизация систем мониторинга состояния устройств ЖАТ является не просто актуальной задачей, а необходимым условием для устойчивого развития железнодорожного транспорта в условиях растущих нагрузок и ожесточающихся требований к надежности и эффективности работы инфраструктуры [6].

## Предиктивная аналитика в диагностике ЖАТ на примере рельсовых цепей

В этой связи особую актуальность приобретает переход от планово-предупредительных ремонтов (ППР) к интеллектуальным системам управления техническим состоянием на основе предиктивной аналитики [7]. В отличие от традиционных методов, предиктивные технологии позволяют не только фиксировать текущее состояние оборудования, но и прогнозировать его поведение в перспективе.

Ключевым преимуществом предиктивной аналитики является способность выявлять малозаметные, но критически важные изменения параметров работы устройств ЖАТ — таких как колебания напряжения, снижение уровня изоляции, отклонения температурных режимов и других характеристик. Даже если эти показатели остаются в рамках допустимых значений, их динамика может свидетельствовать о развитии предотказного состояния. Современные алгоритмы машинного обучения способны анализировать эти изменения и предупреждать о потенциальных отказах за несколько часов или даже дней до их возникновения [8].

Внедрение таких систем позволит не только минимизировать количество аварийных ситуаций, но и оптимизировать процесс технического обслуживания, перейдя от регламентных работ к адресным вмешательствам именно там, где это действительно необходимо [9].

Это, в свою очередь, обеспечит значительное снижение эксплуатационных затрат и повышение

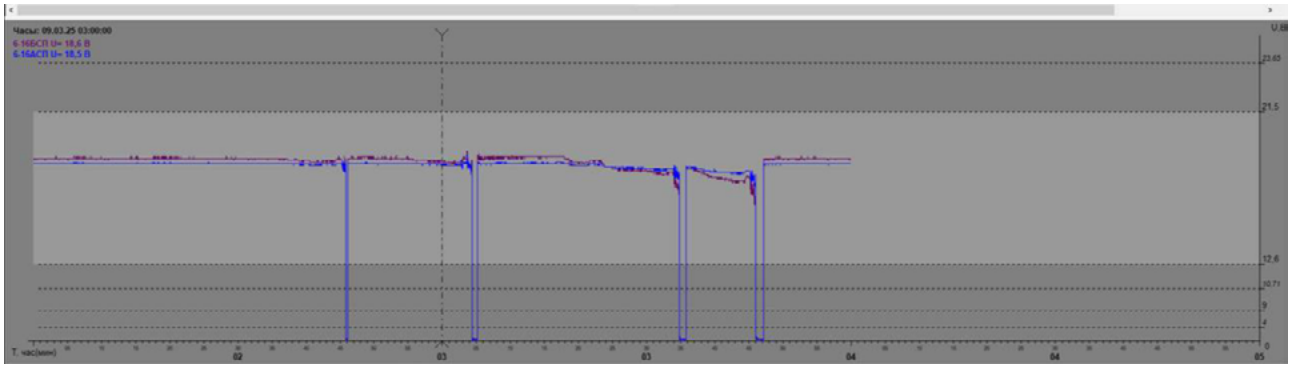


**Рис. 1.** График зависимости величины напряжения на путевом приемнике рельсовой цепи в шунтовом режиме при штатной работе

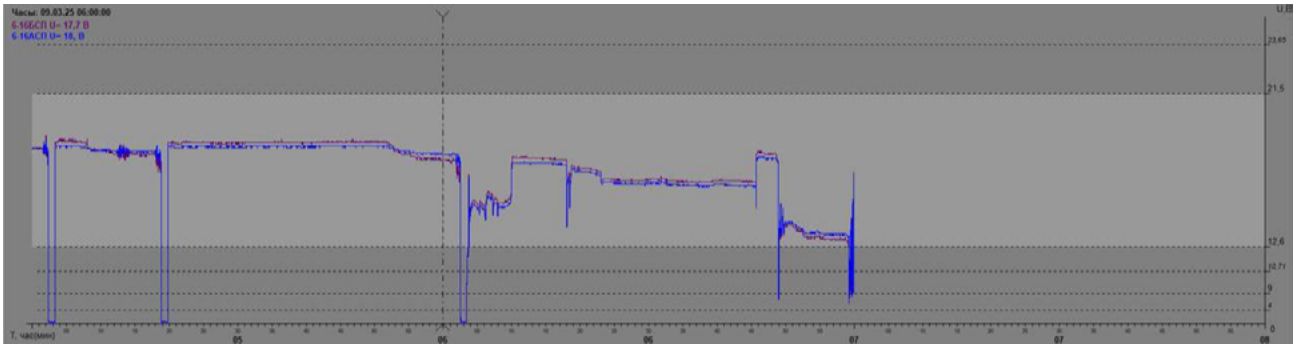


**Рис. 2.** График зависимости величины аномального изменения колебания напряжения (в пределах нормы) на путевом приемнике рельсовой цепи

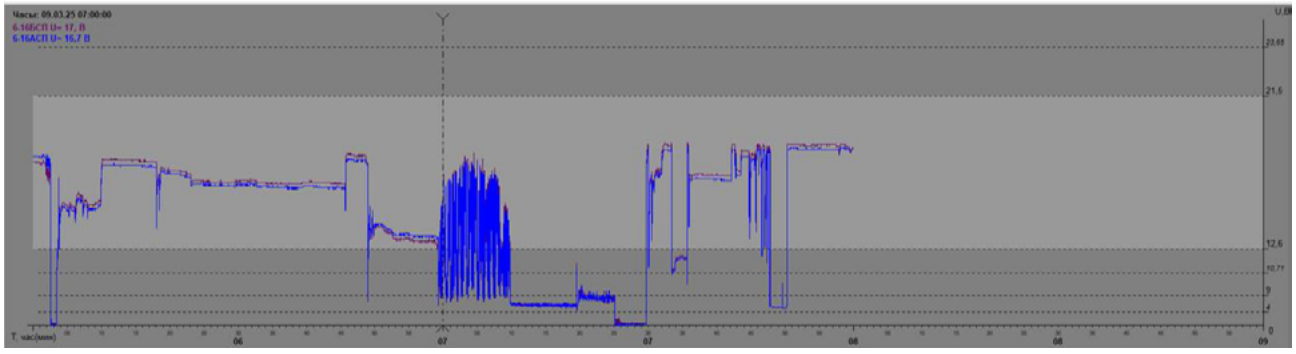


**Рис. 3.** График изменения величины напряжения на путевом приемнике рельсовой цепи во время отказного состояния рельсовой цепи

общей надежности железнодорожной инфраструктуры. На представленных графиках зафиксированы критические изменения параметров работы рельсовой цепи, которые привели к отказу оборудования и простою грузовых поездов. Анализ этих данных позволяет выявить характерные аномалии, появляющиеся за несколько часов до аварии.

Особый интерес представляют:

– необычные колебания напряжения, которые сначала оставались в пределах нормы;

– постепенное нарастание амплитуды скачков напряжения;

– резкое изменение характеристик за 4 часа до полного отказа.

На представленных рисунках (рис. 1–3) изображены графики ключевых параметров работы

рельсовой цепи, включая значения напряжения и его изменения за период времени.

На основании анализа графических данных можно выделить три характерных временных периода, предшествовавших отказу рельсовой цепи:

1. Период стабильной работы (03:00–03:30) (рис. 1).

Графики демонстрируют типичную картину работы рельсовой цепи в шунтовом режиме, параметры напряжения соответствуют нормальным значениям при прохождении подвижного состава, а динамика сигнала отражает стандартный паттерн поведения системы.

2. Период появления аномалий (03:30–06:59) (рис. 2).

С 03:30 фиксируются первые нехарактерные колебания напряжения, где значения остаются в пределах допустимой нормы, но:

– наблюдается отклонение от типичной динамики сигнала;

– постепенно увеличивается амплитуда колебаний;

– на рис. 2 появляются признаки дивергенции, свидетельствующие о нарастающей нестабильности системы.

Критический период (после 07:00) (рис. 3).

Через 3,5 часа после первых отклонений мы можем наблюдать колебания напряжения, выходящие за допустимые пределы. На рис. 3 четко прослеживается выход параметров за критические значения, что, в свою очередь говорит о полном отказе рельсовой цепи, нарушении штатного функционирования участка, вынужденном простое подвижного состава.

Данная динамика наглядно демонстрирует развитие аварийной ситуации — от первых малозаметных отклонений до критического выхода параметров за допустимые границы. Особую важность представляет период 03:30–06:59, когда система, оставаясь формально работоспособной, уже демонстрировала признаки надвигающегося отказа.

Существующая система (АПК-ДК) не способна фиксировать ранние аномалии (как на рис. 2), где напряжение формально в норме, но динамика сигнала указывает на развитие отказа.

Предлагаемый подход дополняет и развивает функционал АПК-ДК, переводя диагностику с реактивного на прогностический уровень. В отличие от АПК-ДК, которая фиксирует отклонения постфактум, предиктивная аналитика:

– анализирует динамику параметров, а не их статические значения;

– использует машинное обучение для выявления скрытых предотказных состояний;

– обеспечивает более раннее и точное предупреждение отказов.

## Заключение

Исследованные графические данные, отражающие динамику параметров работы рельсовых цепей, для выявления отклонений, предшествующих отказам, показывают, что даже незначительные отклонения от штатного функционирования рельсовых цепей могут быть ранними признаками будущей поломки.

Детальное изучение представленных графиков особенно ценно для разработки системы раннего предупреждения подобных отказов, так как позволяет определить точные параметры мониторинга состояния рельсовых цепей, что подтверждает необходимость модернизации систем технической диагностики и мониторинга устройств ЖАТ путем внедрения предиктивной аналитики.

## Список источников

1. Автоматика, связь, информатика: научно-теоретический и производственно-технический журнал. — М.: 2008/09.

2. Кайнов В. М. Доклад начальника департамента автоматики и телемеханики ОАО «РЖД» на четвертой

международной научно-практической конференции «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» / В. М. Кайнов.

3. Тарасов Е. М. К вопросу автоматизации технической диагностики и мониторинга / Е. М. Тарасов, А. Е. Тарасова, В. А. Надежкин // Наука и образование транспорту. — 2022. — № 1. — С. 362–364.

4. Сепетый А. А. Технология диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ на уровне дистанций автоматики и телемеханики / А. А. Сепетый, А. Е. Федорчук // Информатизация и связь. — 2013. — № 2. — С. 71–76.

5. Тарасов Е. М. Диагностирование в жизненном цикле изолирующих стыков рельсовых цепей / Е. М. Тарасов, В. А. Надежкин // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2024. — № 2. — С. 45–50. — DOI: 10.36535/0236-1914-2024-02-6.

6. Ефанов Д. В. Особенности информационного сопряжения систем мониторинга инженерных конструкций и сооружений с системами управления движением поездов / Д. В. Ефанов, Е. М. Михайлюта // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XIII международной научно-практической конференции, посвященной Году качества. В 2-х частях, Гомель, 21–22 ноября 2024 года. — Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2024. — С. 211–213.

7. Маштаков Н. С. Предиктивная аналитика: из исторических данных к стратегическому прогнозированию / Н. С. Маштаков, П. С. Часов // Оригинальные исследования. — 2023. — Т. 13. — № 12. — С. 61–66.

8. Орлов А. Машинное обучение для Больших Данных / А. Орлов // Открытые системы. СУБД. — 2016. — № 1. — С. 26–27.

9. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография / Д. В. Ефанов. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. — 171 с.

Дата поступления: 17.04.2025
Решение о публикации: 29.05.2025

**Контактная информация:**
НАДЕЖКИН Вадим Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»; v.nadezhkin@samgups.ru
НАДЕЖКИНА Снежана Андреевна — аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»; s.nadejkina@samgups.ru
МУСИН Абдулла Рустамович — студент; sun73674@gmail.com

## Artificial Intelligence Technologies for Evaluation and Prediction of the Technical Condition of Railway Automation and Telemechanic Devices

**V. A. Nadezhkin, S. A. Nadezhkina, A. R. Musin**

Volga State University of Railway Transport, 2, Svobody str., Samara, 443066, Russian Federation

**For citation:** Nadezhkin V. A., Nadezhkina S. A., Musin A. R. Artificial Intelligence Technologies for Evaluation and Prediction of the Technical Condition of Railway Automation and Telemechanic Devices. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 484–491. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-484-491

## Summary

**Purpose:** To assess the impact of technical diagnostics and monitoring (TDM) systems on the recoverability of railway automation and telemechanic (RAT) devices. To investigate the shortcomings of modern diagnostic technologies with regard to their impact on increased operational costs and transportation safety risks. To justify the necessity of monitoring system modernization based on predictive analytics for transition from scheduled preventive maintenance (SPM) to intelligent methods of equipment condition management. **Methods:** Analysis of the successful implementation of domestic systems, such as the hardware and software complex of dispatching control (HSC DC), including their functionalities for data collection, pre-failure state detection, and automated fault identification. A study of graphical data reflecting the dynamics of rail circuit parameters for identifying deviations from the standard operation preceding failures. Comparing traditional SPM methods with modern approaches that are based on predictive analytics and machine learning. **Results:** A number of significant deficiencies in current monitoring systems have been identified. These include the occurrence of false alarms and inadequate performance in handling current workloads. The capacity of predictive analytics to detect subtle parameter changes, such as voltage fluctuations and temperature deviations, has been demonstrated to be indicative of developing pre-failure conditions. As demonstrated by the rail circuit graphs, the typical phases can be observed in the form of steady operation and the appearance of pre-failure anomalies, as well as failure states. **Practical significance:** The feasibility of enhancing TDM through the implementation of predictive analytics and digital modelling was demonstrated, with the potential to help minimize emergencies, optimize maintenance via targeted repairs, and reduce operational costs. The modernization of RAT systems is imperative for enhancing the reliability and safety of railway infrastructure, particularly in the context of increasing freight traffic and operational intensity. The findings of the study can be used to develop early failure warning systems and update regulatory frameworks in technical diagnostics.


**Keywords:** Technical diagnostics, monitoring of RAT devices, predictive analytics, equipment recoverability, false alarms, railway automation and telemechanics, intelligent monitoring systems, failures of rail circuits.

## References


1. *Avtomatika, svyaz', informatika: nauchno-teoreticheskiy i proizvodstvenno-tekhnicheskiy zhurnal* [Automation, communication, informatics: scientific-theoretical and industrial-technical journal]. Moscow, 2008/09. (In Russian)

2. Kaynov V. M. *Doklad nachal'nika departamenta avtomatiki i telemekhaniki OAO "RZhD" na chetvertoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Avtomatika i telemekhanika na zheleznodorozhnom transporte"* [Report of the Head of the Department of Automation and Telemechanics of JSC Russian Railways at the Fourth International Scientific and Practical Conference "Automation and Telemechanics in Railway Transport"]. (In Russian)

3. Tarasov E. M., Tarasova A. E., Nadezhkin V. A. K voprosu avtomatizatsii tekhnicheskoy diagnostiki i monitoringa [On the issue of automation of technical diagnostics and monitoring]. *Nauka i obrazovanie transport* [Science and education in transport]. 2022, Iss. 1, pp. 362–364. (In Russian)

4. Sepetyy A. A., Fedorchuk A. E. Tekhnologiya diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv ZhAT na urovne distantsiy avtomatiki i telemekhaniki [Technology of diagnostics and monitoring of railway automation and telemechanics devices at the level of automation and telemechanics distances]. *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication]. 2013, Iss. 2, pp. 71–76. (In Russian)

5. Tarasov E. M., Nadezhkin V. A. Diagnostirovanie v zhiznennom tsikle izoliruyushchikh stykov rel'sovykh tsepey [Diagnostics in the life cycle of insulating joints of track circuits]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2024, Iss. 2, pp. 45–50. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-02-6. (In Russian)

6. Efanov D. V., Mikhaylyuta E. M. Osobennosti informatsionnogo sopryazheniya sistem monitoringa inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy s sistemami upravleniya dvizheniem poezdov [Features of information interfacing of engineering structure and facility monitoring systems with train traffic control systems]. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy KhIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Godu kachestva. V 2-kh chastyakh, Gomel', 21–22 noyabrya 2024 goda* [Transport safety issues: materials of the XIII international scientific and practical conference dedicated to the Year of Quality. In 2 parts, Gomel, November 21–22, 2024]. Gomel': Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2024, pp. 211–213. (In Russian)

7. Mashtakov N. S., Chasov P. S. Prediktivnaya analitika: iz istoricheskikh dannykh k strategicheskomu prognozirovaniyu [Predictive Analytics: From Historical Data to Strategic Forecasting]. *Original'nye issledovaniya* [Original Research]. 2023, vol. 13, Iss. 12, pp. 61–66. (In Russian)

8. Orlov A. Mashinnoe obuchenie dlya Bol'shikh Dannykh [Machine Learning for Big Data]. *Otkrytye sistemy. SUBD* [Open Systems. DBMS]. 2016, Iss. 1, pp. 26–27. (In Russian)

9. Efanov D. V. *Funktsional'nyy kontrol' i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: monografiya* [Functional Control and Monitoring of Railway Automation and Telemechanics Devices: monograph]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2016, 171 p. (In Russian)

Received: April 17, 2025
Accepted: May 29, 2025

**Author's information:**
Vadim A. NADEZHKIN — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport; v.nadezhkin@samgups.ru
Snezhana A. NADEZHKINA — Postgraduate Student, Department of Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport; s.nadejkina@samgups.ru
Abdulla R. MUSIN — Student; sun73674@gmail.com

УДК 656.696

# Оценка эффективности эксплуатации инженерно-сетевой компоненты инфраструктуры железнодорожного транспорта

**О. А. Продоус, А. В. Кабанов**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Продоус О. А., Кабанов А. В.* Оценка эффективности эксплуатации инженерно-сетевой компоненты инфраструктуры железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 492–498. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-492-498

## Аннотация

**Цель:** Показать на конкретном примере практическое использование методики количественной оценки продолжительности периода остаточной эксплуатации изношенных металлических трубопроводов инженерно-сетевой компоненты транспортно-технологических сетей железнодорожного транспорта, сетей метрополитенов, городских сетей и сетей промышленного транспорта. **Методы исследований:** Для оценки технического состояния изношенных труб использованы расчетные зависимости для металлических труб с внутренними отложениями. **Результаты обсуждения:** Для конкретного примера приведена методика оценки и рассчитана продолжительность периода эксплуатации. Введено понятие коэффициента эффективности эксплуатации, являющегося важным аспектом для обеспечения надежности и безопасности трубопроводных систем различного назначения. **Заключение:** Предложено оценивать эффективность эксплуатации изношенных трубопроводов инженерно-сетевой компоненты инфраструктуры железнодорожного транспорта по величине коэффициента эффективности эксплуатации труб, зависящего от толщины слоя их внутренних отложений. **Выводы:** Обоснована необходимость разработки специальных таблиц для гидравлического расчета изношенных металлических сетей железнодорожной инфраструктуры, и предложено включить в действующие нормативы количественные нормативы.

**Ключевые слова:** Инженерно-сетевая компонента инфраструктуры железнодорожного транспорта, металлические сети водоснабжения, теплоснабжения и канализации, оценка эффективности эксплуатации.

## Введение

Металлические трубопроводы инженерно-сетевой компоненты инфраструктуры железнодорожного транспорта в процессе их эксплуатации подвергаются образованию слоя внутренних отложений, изменяющегося во времени, как показано на рис. 1.

Все инженерные сети железнодорожного транспорта страны выполнены из соображений обеспечения безопасности их работы в основном из металлических труб. Отсутствие защитных покрытий на внутренней поверхности стальных и чугунных труб приводит в процессе их эксплуатации к образованию слоя отложений (рис. 1).

Компонентами транспортно-технологических сетей железнодорожного транспорта являются:

– железнодорожные пути и комплекс путевого хозяйства со всей инфраструктурой;

– средства автоматики и телемеханики;

– комплекс сетей энергоснабжения и электрификации железных дорог;

– системы подачи и распределения воды между компонентами транспортно-технологических сетей железнодорожного транспорта;

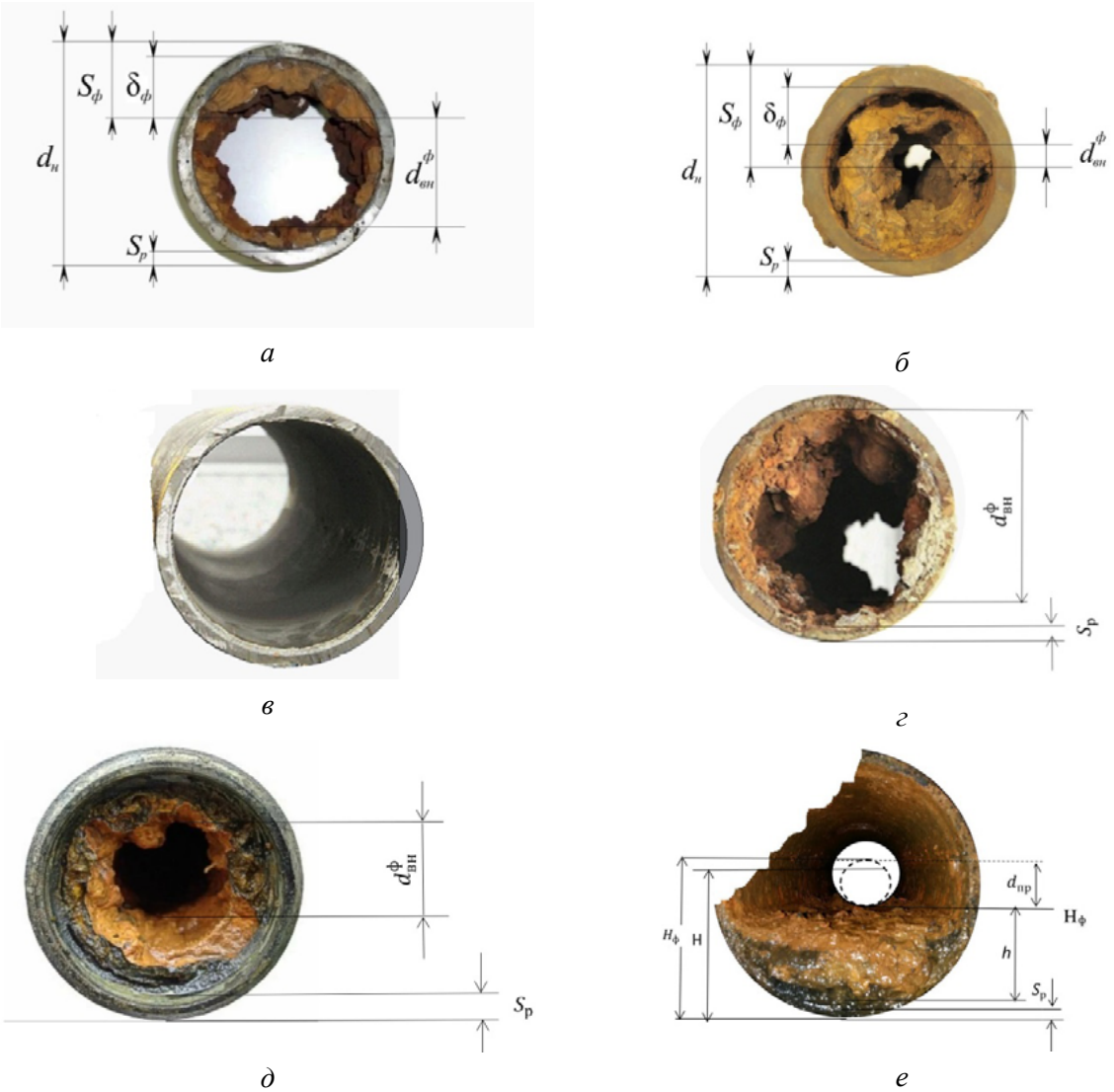



**Рис. 1.** Состояние инженерных сетей инфраструктуры железнодорожного транспорта: *а* — сети, выполненные из стали; *б* — сети, выполненные из серого чугуна; *в* — новые трубы тепловой сети; *г* — изношенные трубы теплоснабжения; *д* — напорные сети канализации; *е* — самотечные сети канализации

− системы водоотведения сточных и дождевых вод от компонентов транспортно-технологических сетей.

## Метод расчета износа инженерных сетей

Все металлические (и из других видов материалов) трубопроводы инженерной инфраструктуры железнодорожного транспорта подвергаются при их проектировании и в процессе эксплуатации **гидравлическим расчетам**, в основе которых заложено установление фактической толщины слоя отложений на внутренней поверхности трубопроводов с помощью портативных толщиномеров и последующее определение фактических гидравлических характеристик.

То есть характеристики всех видов металлических сетей железнодорожной инфраструктуры подвергаются **инженерному прогнозу** фактических значений характеристик гидравлического потенциала трубопроводов (труб) с использо-

ванием искусственного интеллекта. Такой подход распространяется также на все городские коммунальные сети, сети теплоснабжения, сети промышленных объектов железнодорожного транспорта, металлические сети метрополитенов и сети промышленного транспорта [1–4].

**Целью использования искусственного интеллекта** при оценке текущего состояния изношенных транспортно-технологических сетей железнодорожного транспорта является количественная оценка текущего состояния инженерных сетей для разработки возможности **продления периода** их безаварийной, длительной и эффективной эксплуатации, с учетом опыта применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте [5–9].

Эффективность эксплуатации изношенных инженерных сетей, выполненных из металлических труб, предлагается оценивать с использованием безразмерного коэффициента эффективности их работы $K_{эф}$, определяемого по формуле [10, 11]:

$$K_{эф} = \frac{N_{дв}^{р}}{N_{дв}^{ф}} = \frac{i_{р}\left(d_{вн}^{р}\right)^{2} V_{р}}{i_{ф}\left(d_{вн}^{ф}\right)^{2} V_{ф}}, \qquad (1)$$

где $N_{дв}^{р(ф)}$ — значение расчетного (р) и фактического (ф) энергопотребления насосного агрегата, установленного в новом (р) и изношенном (ф) трубопроводе, кВт/ч;

$d_{вн}^{р(ф)}$ — определяемая по формуле (2), кВт/ч:

$$N_{дв}^{р(ф)} = 10^{6} \cdot i_{р(ф)}\left(d_{вн}^{р(ф)}\right) V_{р(ф)} \frac{0,00808}{\eta}, \qquad (2)$$

где $i_{р(ф)}$ — расчетный (р), фактический (ф) гидравлический уклон труб;

$d_{вн}^{р(ф)}$ — расчетный (р), фактический (ф) внутренние диаметры новых и изношенных труб соответственно, м;

$V_{р(ф)}$ — расчетная скорость движения потока в новой трубе (р), фактическая скорость движения потока в изношенной трубе, м/с;

η — коэффициент полезного действия насосного оборудования, для выполнения расчетов принимают значение η = 0,7 [12].

$d_{вн}^{р(ф)}$, $V_{р(ф)}$ $i_{р(ф)}$ — численные значения характеристик новых (р) и изношенных (ф) труб, м, м/с, мм/м.

Степень гидравлического износа трубопроводных систем может оцениваться с использованием коэффициента эффективности эксплуатации $K_{эф}$. Чем больше значение $K_{эф}$, тем меньше фактическая толщина слоя внутренних отложений в трубах, и наоборот, $\delta_{ф}$ ($h_{ф}$), рис. 1.

Для наглядной демонстрации этого для стальной водопроводной сети на рис. 2 и 3 для конкретного примера приведен вид зависимостей:

$$i_{р(ф)} = f\left(\delta_{ф}\right) \text{ и } N_{дв}^{р(ф)} = f\left(\delta_{ф}\right).$$

Существуют несколько диапазонов значений изменения коэффициента эффективности эксплуатации стальных и чугунных трубопроводов:

*I диапазон*

$0,95 \geq K_{эф} \leq 1$ — наиболее эффективное функционирование трубопровода при минимальных значениях величин фактического гидравлического уклона $i_{ф}$, что указывает на возможность продолжения дальнейшего использования.

*II диапазон*

$0,90 \geq K_{эф} \leq 0,95$ — энергозатратное функционирование трубопровода с повышенными значениями фактического гидравлического уклона $i_{ф}$, что приводит к увеличению потребления энергии насосным оборудованием $N_{дв}^{ф}$, продолжение дальнейшей эксплуатации становится достаточно затратным и приводит к необходимости принятия технических решений в части разработки проекта реконструкции трубопровода.

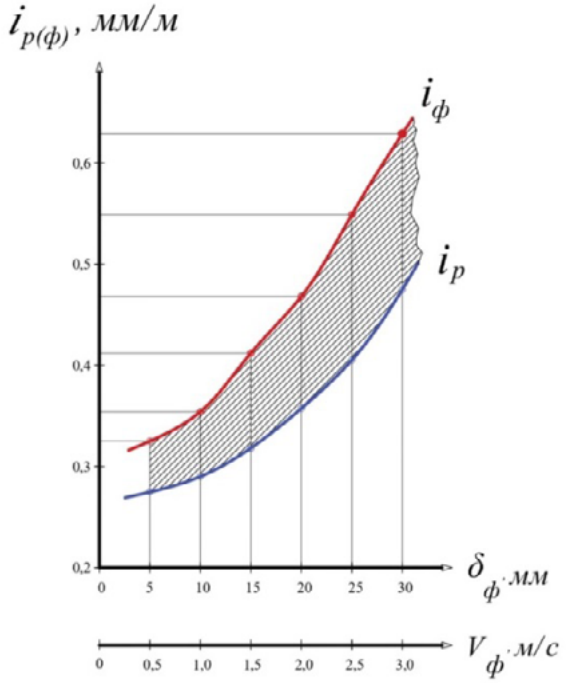



**Рис. 2.** Графики зависимости

$$i_{р(ф)} = f\left(\delta_ф\right)$$

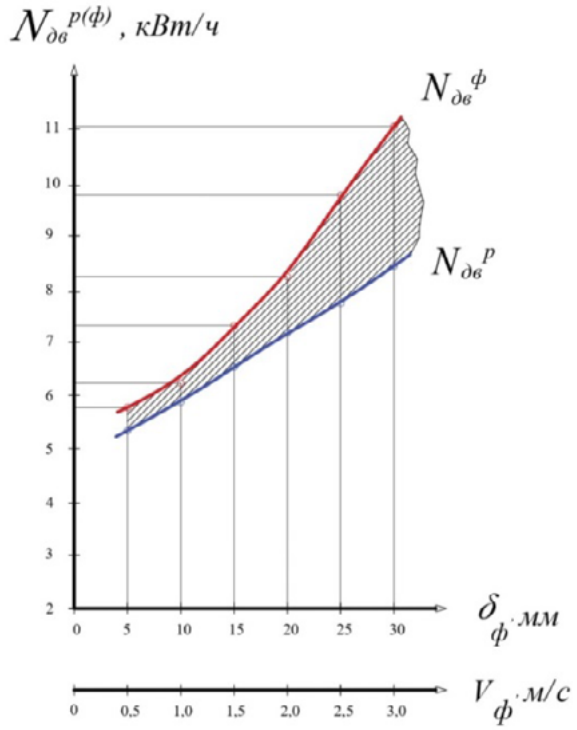



**Рис. 3.** Графики зависимости

$$N_{дв}^{р(ф)} = f\left(\delta_ф\right)$$

*III диапазон*

$K_{эф} \le 0,90$ — наблюдаются повышенные значения фактического гидравлического уклона $i_ф$, поэтому функционирование трубопровода становится нецелесообразным. В такой ситуации требуется проведение реконструкции или полной замены на новый.

*IV диапазон*

$K_{эф} \le 0,80$ — состояние трубопровода, свидетельствующее о недопустимости его дальнейшего использования, необходимо принимать решение о выводе его из эксплуатации.

В табл. 1 представлены сведения, по которым возможно прогнозировать продолжительность остаточного периода эксплуатации трубопроводов систем водоснабжения, выполненных из стали или серого чугуна без внутренних защитных покрытий, в зависимости от установленных диапазонов значений коэффициента эффективности эксплуатации $K_{эф}$.

Таким образом, внутренняя поверхность металлического трубопровода со слоем отложений $\delta_ф$, изменяющимся во времени и зависящем от показателей качества питьевой воды, характеризует работу насосного оборудования и влияет на расходование электрической энергии.

## Результаты

Приведем пример, подтверждающий это заключение.

Расчетная пропускная способность участка водопроводной сети с диаметром условного прохода 325 мм, выполненного из стальных электросварных труб, без защитных покрытий, составляет $q = 120$ л/с, срок эксплуатации составляет 10 лет, и при этом слой отложений на внутренней поверхности равен $\delta_ф = 6,0$мм .

Определить характеристики гидравлического потенциала данного участка водопроводной сети

Таблица 1. Диапазоны изменения значений $K_{эф}$

| Прогнозируемый период остаточной эксплуатации сети, $T$, лет | Диапазоны изменения значений $K_{эф}$ | | |
|---|---|---|---|
| | $0,90 \le K_{эф} \le 1,0$ | $0,80 \le K_{эф} \le 0,90$ | $K_{эф} < 0,80$ |
| | не более пяти лет | один год | недопустимость эксплуатации |

Таблица 2. Характеристики сравниваемых труб

| Значения характеристик гидравлического потенциала стальных электросварных труб | | | | | | Величина $K_{эф}$ по формуле (1) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Новых по ГОСТ 10704—91 | | | Изношенных, $\delta_ф$ = 6,0 мм | | | |
| $d^р_{вн}$, м | $V_р$, м/с | $i_р$, мм/м | $d^ф_{вн}$, м | $V_ф$, м/с | $i_ф$, мм/м | |
| 0,311 | 1,58 | 0,01219 | 0,299 | 1,71 | 0,01504 | 0,81 |

для количественного прогнозирования периода остаточной продолжительности эксплуатации данного трубопровода.

Результаты расчетов значений характеристик гидравлического потенциала новых и изношенных труб, согласно условиям задачи, представлены в табл. 2.

Так как $K_{эф}$ = 0,81, то в дальнейшем, согласно данным табл. 1, можно короткое время (не более одного года) продолжать эксплуатацию трубопровода $d_н$ = 0,325 мм с толщиной слоя отложений $\delta_ф$ = 6,0 мм, учитывая, что ежегодный прирост толщины слоя $\delta_ф$ = 0,3 мм [12].

## Выводы

Приведенные в статье данные по оценке эффективности эксплуатации изношенных металлических трубопроводов инженерной инфраструктуры железнодорожного транспорта позволяют сделать следующие выводы. Существующим структурам Минстроя РФ следует включить в требования действующих сводов правил количественные значения $K_{эф}$ коэффициента эффективности эксплуатации трубопроводов с различным диапазоном диаметров и значениями толщины фактического слоя отложений на внутренней поверхности $\delta_ф$ с целью определения периода остаточной эксплуатации и планирования объемов финансирования разных конкретных проектов.

## Список источников

1. Капман Р. Очерки по математической теории систем / Р. Капман, П. Фалб, М. Арбиб. — М.: Мир, 1971.

2. Кини Р. Л. Принятие решения при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа. — М.: Радио и связь, 1984.

3. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. — 488 с.

4. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. — М.: Мир, 1973. — 344 с.

5. Месарович М. Общая теория систем. Математические основы / М. Месарович, И. Такахара. — М.: Мир, 1978.

6. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. — М.: Мир, 1973. — 344 с.

7. Мильнер Б. З. Системный подход к организации управления / Б. З. Мильнер, Л. И. Евенко, В. С. Раппопорт. — М.: Экономика, 1983. — 224 с.

8. Михалевич В. С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В. С. Михалевич, В. Л. Волкович. — М.: Наука, 1982. — 286 с.

9. Микони С. В. Теория и практика рационального выбора / С. В. Микони. — М.: Маршрут, 2004.

10. Патент на изобретение № 2807163 Российская Федерация. Способ определения остаточного срока службы трубопроводов канализационных и тепловых сетей / О. А. Продоус, Д. И. Шлычков. — 2023.

11. Патент на изобретение № 2822440 Российская Федерация. Способ оценки технического состояния трубопровода / О. А. Продоус, Д. И. Шлычков, А. А. Шестаков. — 2024.

12. Продоус О. А. Особенности гидравлического расчета водопроводов из металлических, полимерных и металлополимерных труб. Терминологический словарь по наружным сетям водоснабжения и канализации. Научное издание / О. А. Продоус, П. П. Якубчик, Д. И. Шлычков. — СПб.; М.: Перо, 2023. — 288 с.

Дата поступления: 22.04.2025
Решение о публикации: 29.05.2025

**Контактная информация:**
ПРОДОУС Олег Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»
КАБАНОВ Александр Васильевич — канд. техн. наук, доцент, декан факультета «Экономика и менеджмент»

# Assessment of the Engineering Network Maintenance Efficiency of Railway Transport Infrastructure

## O. A. Prodous, A. V. Kabanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Prodous O. A., Kabanov A. V. Assessment of the Engineering Network Maintenance Efficiency of Railway Transport Infrastructure. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 492–498. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-492-498

## Summary

**Purpose:** To demonstrate the practical application of a quantitative methodology for estimating the duration of the residual operation period of worn-out metal pipelines as part of a railway transport engineering infrastructure, metro networks, urban networks and industrial transport networks. **Methods:** The technical condition of worn-out pipes was assessed by applying calculation dependencies for metal pipes with internal sediments. **Results:** The estimation methodology has been presented, with the duration of the operation period being calculated. The concept of operation efficiency coefficient is introduced as a major component in ensuring the reliability and safety of pipeline systems for various purposes. **Conclusion:** The estimation of the operation efficiency of worn-out pipelines of railway infrastructure engineering networks is proposed to be conducted applying the coefficient value of the pipe operation efficiency, depending on the thickness of their internal sediment layer. The necessity to develop specialized tables for hydraulic calculation of worn-out metal-pipe networks of railway infrastructure has been substantiated, and it has been proposed to include quantitative standards in the current regulations.

**Keywords:** Engineering networks of the railway infrastructure, metal networks of water supply, heat supply and sewerage, assessment of maintenance efficiency.

## References

1. Kapman R., Falb P., Arbib M. *Ocherki po matematicheskoy teorii sistem* [Essays on the Mathematical Theory of Systems]. Moscow: Mir Publ., 1971. (In Russian)

2. Kini R. L., Rayfa Kh. *Prinyatie resheniya pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya* [Multicriteria Decision Making: Preferences and Substitutions]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1984. (In Russian)

3. Moiseev N. N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical Problems of Systems Analysis]. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1981, 488 p. (In Russian)

4. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. *Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevykh sistem* [Theory of Hierarchical Multilevel Systems]. Moscow: Mir Publ., 1973, 344 p. (In Russian)

5. Mesarovich M., Takakhara I. *Obshchaya teoriya sistem. Matematicheskie osnovy* [General Theory of Systems. Mathematical foundations]. Moscow: Mir Publ., 1978. (In Russian)

6. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. *Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevykh sistem* [Theory of hierarchical multilevel systems]. Moscow: Mir Publ., 1973, 344 p. (In Russian)

7. Mil'ner B. Z., Evenko L. I., Rappoport V. S. *Sistemnyy podkhod k organizatsii upravleniya* [Systems approach to management organization]. Moscow: Ekonomika Publ., 1983, 224 p. (In Russian)

8. Mikhalevich V. S., Volkovich V. L. *Vychislitel'nye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh sistem* [Computational methods for studying and designing complex systems]. Moscow: Nauka Publ., 1982, 286 p. (In Russian)

9. Mikoni C. V. *Teoriya i praktika ratsional'nogo vybora* [Theory and practice of rational choice]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. (In Russian)

10. Prodous O. A., Shlychkov D. I. *Sposob opredeleniya ostatochnogo sroka sluzhby truboprovodov kanalizatsionnykh i teplovykh setey* [Method for determining the residual service life of sewer and heating network pipelines]. Patent RF, no. 2807163, 2023. (In Russian)

11. Prodous O. A., Shlychkov D. I., Shestakov A. A. *Sposob otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya truboprovoda* [Method for assessing the technical condition of a pipeline]. Patent RF, no. 2822440, 2024. (In Russian)

12. Prodous O. A., Yakubchik P. P., Shlychkov D. I. *Osobennosti gidravlicheskogo rascheta vodoprovodov iz metallicheskikh, polimernykh i metallopolimernykh trub. Terminologicheskiy slovar' po naruzhnym setyam vodosnabzheniya i kanalizatsii. Nauchnoe izdanie* [Features of hydraulic calculation of water pipelines made of metal, polymer and metal-polymer pipes. Terminological dictionary of external water supply and sewerage networks. Scientific publication]. St. Petersburg; Moscow: Pero Publ., 2023, 288 p. (In Russian)

Received: April 22, 2025
Accepted: May 29, 2025

**Author's information:**
Oleg A. PRODOUS — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Water Supply, Sewage and Hydraulics
Alexander V. KABANOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Dean of the "Economics and Management" Faculty.

УДК 691.328

# Роль однородности материала в точности определения прочностных характеристик высокопрочных бетонов

**Ю. А. Беленцов, Л. Ф. Казанская, Е. А. Докшина**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Беленцов Ю. А., Казанская Л. Ф., Докшина Е. А.* Роль однородности материала в точности определения прочностных характеристик высокопрочных бетонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 499–508. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-499-508

## Аннотация

**Цель:** Исследование требований к однородности бетона на точность определения его прочностных характеристик, а также выявление ограничений традиционных методов контроля прочности при работе с высокопрочными бетонами, с учетом особенностей европейских и российских нормативных подходов, влияния коэффициента вариации на достоверность классификации материала и способов повышения точности контроля. **Методы:** Использованы методы сравнительного анализа нормативных документов и научных публикаций в различных странах, методы математической статистики, прямые разрушающие методы испытания бетонных образцов на прочность. **Результаты:** Установлено, что увеличение класса бетона сопровождается ростом влияния коэффициента вариации на точность идентификации, что может привести к ошибкам в классификации высокопрочных бетонов. Проведен анализ существующих методов контроля прочности, выявлены их ограничения. Различия в нормативных подходах между европейскими и российскими стандартами требуют адаптации методик контроля к современным требованиям. Показано, что повышение однородности бетонной смеси способствует увеличению точности проектных расчетов и улучшению эксплуатационных характеристик строительных объектов. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования методов контроля прочности бетона, разработки новых нормативных требований и повышения надежности бетонных конструкций.

**Ключевые слова:** Высокопрочный бетон, однородность бетона, прочность на сжатие, контроль качества, коэффициент вариации, методы испытаний.

## Введение

Современное состояние строительной индустрии предъявляет повышенные требования к качеству строительных материалов, которые определяют надежность строительной продукции. Повышение требований качества продукции влияет не только с точки зрения повышения количественных параметров качества, но и с точки зрения стабильности и однородности показателей.

Например, если два образца бетона одной партии показывают значительное различие

при определении прочности, то это ставит под сомнение надежность всей конструкции. Высокопрочные бетоны особенно чувствительны к этому фактору, так как небольшие отклонения могут существенно повлиять на эксплуатационные характеристики зданий и сооружений, что обуславливает необходимость качества измерений и контроля по показателям сходимости и воспроизводимости. Требования европейских стандартов к точности контроля по показателю прочности бетона приведены в табл. 1 [1].

*Примечание 1.* Точные данные были определены в процессе эксперимента, проведенного в Великобритании в 1987 г., по результатам нескольких испытаний, рассмотренных в BS 1881. В эксперименте было задействовано 16 операторов. Бетонные смеси изготавливали с использованием обычного портландцемента, песка долины р. Темзы и крупного заполнителя размерами от 10 до 20 мм долины р. Темзы.

*Примечание 2.* Различие результатов двух испытаний одного образца, проводимых одним оператором, использующим одинаковое оборудование, в течение минимально допустимого промежутка времени превысит значение повторяемости $r$ в среднем не более чем 1 раз в 20 случаях в процессе обычного и точного применения метода.

*Примечание 3.* Результаты испытаний одного образца, полученные в течение минимально допустимого промежутка времени двумя операторами, использующими разное оборудование, будут отличаться значением воспроизводимости $R$ в среднем не более чем 1 раз в 20 случаях в процессе обычного и точного применения метода.

К исследованию высокопрочных бетонов обращаются ученые многих стран [2–8], однако в течение многих десятилетий нет единого подхода к вопросу контроля качества бетонов, включая высокопрочные.

## Сравнительный анализ российских и европейских стандартов в области контроля качества бетона

В европейских стандартах контроль качества бетона основывается на статистических методах, где за стабильность материала отвечает производитель. Каждое измерение рассматривается как часть общей выборки, что позволяет минимизировать влияние отдельных отклонений.

В российских нормах акцент делается на оценку качества отдельных партий [9–11]. Такой подход позволяет учитывать особенности производства, но может привести к расхождению в классификации высокопрочных бетонов.

Возникает вопрос: какой подход лучше? Европейский метод позволяет учитывать колебания в процессе производства, но может привести к принятию низкокачественного бетона. Российский метод жестче контролирует каждую партию, но требует дополнительного тестирования и отбора проб.

Результаты испытаний, представленные в табл. 1, подходят для традиционных бетонов нормальной прочности. При этом показатели сходимости и воспроизводимости в процентах составляют примерно 3 и 5 % соответственно. Это хорошо соответствует оценке погрешности прямых разрушающих методов контроля прочности бетона в 4–5 % [9, 10], что соответствует нормальному диапазону прочности традиционных бетонов.

Таблица 1. Точные данные для измерений прочности на сжатие бетона, выраженные в процентном отношении среднего значения прочностей двух кубов, различия которых сравнимы с помощью повторяемости $r$ или воспроизводимости [1]

| Метод испытаний куба с длиной ребра, мм | Условия повторяемости | | Условия воспроизводимости | |
|---|---|---|---|---|
| | $sr$ | $r$ | $sR$ | $R$ |
| 100 | 3,2 | 9 | 5,4 | 15,1 |
| 150 | 3,2 | 9 | 4,7 | 13,2 |

Таблица 2. Зависимость эффективности использования расчетной прочности по отношению к гарантированной с вероятностью 0,95 и требуемой при испытании серии или партии бетона

| Вид | Расчетные сопротивления бетона $R_b$, МПа, для предельных состояний первой группы при классе бетона по прочности на сжатие. Класс В | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10 | 30 | 60 | 100 |
| Бетон тяжелый, мелкозернистый и напрягающий | | | | |
| Сжатие осевое (призменная прочность) $R_b$ | 6 | 17 | 33 | 47,5 |
| Требуемая прочность серии или партии бетона по результатам испытания $R$ | 12,7 | 38,1 | 76,3 | 127,1 |
| Отношение гарантированной с вероятностью 0,95 прочности к требуемой по результатам испытания к $B/R$, % | 79 | 79 | 79 | 79 |
| Отношение расчетной прочности по 1 гр ПС к требуемой по результатам испытания к $R_b/R$, % | 47 | 45 | 43 | 37 |
| Разница в единицах измерения $R$, МПа | 5,3 | 16,6 | 34 | 62,6 |

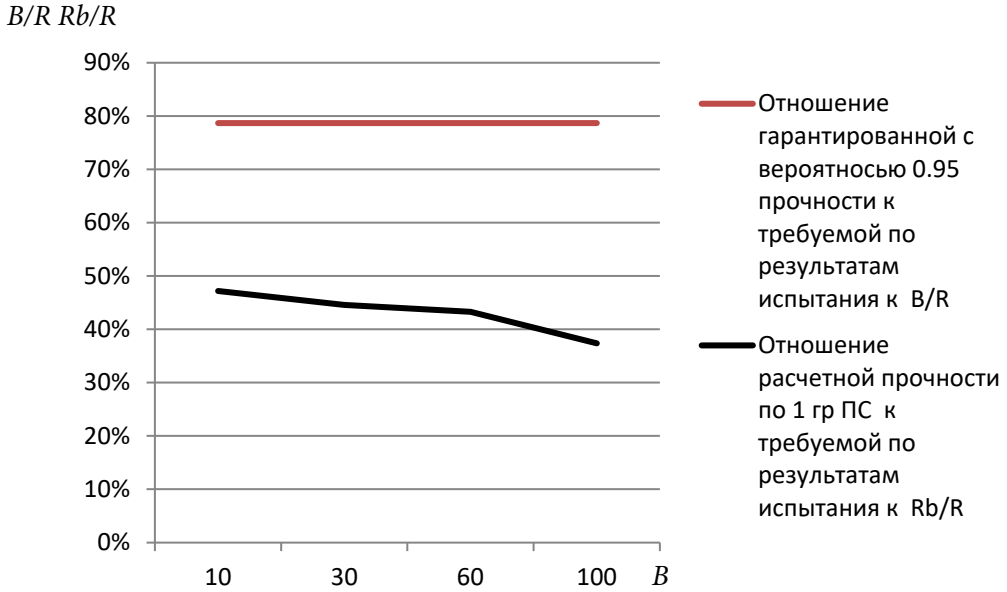



**Рис. 1.** Зависимость эффективности использования расчетной прочности по отношению к гарантированной с вероятностью 0,95 и требуемой при испытании серии или партии бетона

Переход на высокопрочные и особо высокопрочные бетоны, а затем на высококачественные и особо высококачественные, изменяет требования к контролю качества бетонов, поскольку применение традиционных методов контроля и предельных метрологических характеристик существенно снижет эффективность использования таких бетонов на практике расчетов [11].

Результаты сравнения эффективности использования расчетной прочности по отношению к показателям класса по прочности и к требуемой фактической прочности по результатам испытания приведены в табл. 2. Расчеты проводились при использовании предельно допустимого коэффициента вариации $v = 0{,}13$.

Графическое представление зависимости эффективности использования расчетной прочности по отношению к гарантированной с вероятностью 0,95 и требуемой при испытании серии или партии бетона приведены на рис. 1.

При использовании высокопрочных бетонов доля используемой в конструктивных расчетах прочности существенно снижается по сравнению с традиционными. При использовании бетона В100 прочность расчетная снижается по сравнению с фактической на 62,6 МПа. Это повышает надежность конструкций, но снижает эффективность строительной продукции.

**Обоснование необходимости идентификации высокопрочных бетонов**

В процессе проектирования, создания, эксплуатации, ремонта и утилизации конструкций из бетонов высокой прочности должны одновременно повышаться качество и стабильность, однородность материалов. Это заложено в основе концепции теории надежности, которая предполагает количественную оценку уровня надежности проектируемых конструкций, перспективы развития проектирования конструкций с требуемым, численно оцениваемым уровнем надежности, как заложено, например, в европейских нормах. Принципиальное отличие контроля прочности бетона в соответствии с российскими и европейскими нормами заключается в различных подходах к оценке прочности. В европейских нормах используется принадлежность серии бетона как к бесконечному ряду измерений контролируемого параметра. Каждое значение контрольных показателей является лишь одним из множества стабильных результатов, это основывается на подходах Еврокомиссии, которая предполагает, что за качество бетона отвечает поставщик [12]. Особенности такого подхода определяют возможность принять плохой бетон и отбросить качественный [13–15]. Использование в российских нормативах подобного подхода приводит к тому, что в основе используется понятие «партия бетона», то есть набор материала в конструкциях, обладающих схожими свойствами за единицу времени. Использование схемы А и схемы В из ГОСТ 18105 предполагает схожие с европейским подходом принципы. Однако использование ограниченной партии является более рациональным с точки зрения обеспечения требуемого уровня надежности.

Результатом развития строительного материаловедения является повышение не только интенсификационных параметров качества, например высокой прочности, морозостойкости, трещиностойкости, но и экстенсивных. Это обуславливает переход от понятия высокопрочного и особо высокопрочного к понятию особо качественного или высококачественного бетона. На примере такого показателя, как класс бетона по прочности, можно продемонстрировать, что недостаточное знание однородности материала снижает влияние показателя высокого класса. Это существенно затрудняет идентификацию высокопрочного бетона из-за невозможности точно идентифицировать, к какому классу относится тот или иной бетон, так как показатели контролируемой прочности бетона соответствующего класса определяются по средней величине, а разброс значений может быть достаточно значительным — в пределах класса.

Однородность определяется коэффициентом вариации прочностных свойств бетона, что влияет на обеспечение надежности проектируемых из бетона конструкций, а долговечность и эффективность строительной продукции зависит от требований однородности бетона в конструкциях. Тогда имеет смысл проводить оценку влияния однородности на правильность идентификации бетона по показателю «класс прочности», который по определению представляет собой гарантированную прочность бетона с вероятностью 95 %. Результаты испытаний зависят от предельного коэффициента вариации, значение которого для конкретного вида бетона будет определять качество идентификации материалов по показателю «класс прочности». Чем выше класс прочности, тем выше требования к однородности продукции.

Таблица 3. Допустимые результаты контроля прочности бетона при соседних классах бетона при коэффициенте вариации $v$ = 0,13 и 0,05

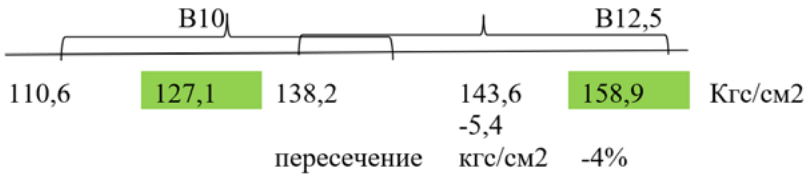
| № | $B$ | $R^{н}_{min}$, мПа | $R_{ср} = B / (1 - tv)$, кгс/см$^2$ | $t$ | $v$ | $S = vR_{ср}$, кгс/см$^2$ | $R_{min}$, кгс/см$^2$ | $R_{max}$, кгс/см$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2,5 | 2,5 | 31,8 | 1,64 | 0,13 | 4,1 | 27,6 | 35,9 |
| 2 | 3,5 | 3,5 | 44,5 | 1,64 | 0,13 | 5,8 | 38,7 | 50,3 |
| 3 | 5 | 5 | 63,5 | 1,64 | 0,13 | 8,3 | 55,3 | 71,8 |
| 4 | 7,5 | 7,5 | 95,3 | 1,64 | 0,13 | 12,4 | 82,9 | 107,7 |
| 5 | 10 | 10 | 127,1 | 1,64 | 0,13 | 16,5 | 110,6 | 143,6 |
| 6 | 12,5 | 12,5 | 158,9 | 1,64 | 0,13 | 20,7 | 138,2 | 179,5 |
| 7 | 15 | 15 | 190,6 | 1,64 | 0,13 | 24,8 | 165,9 | 215,4 |
| 8 | 20 | 20 | 254,2 | 1,64 | 0,13 | 33,0 | 221,1 | 287,2 |
| 9 | 25 | 25 | 317,7 | 1,64 | 0,13 | 41,3 | 276,4 | 359,0 |
| 10 | 30 | 30 | 381,3 | 1,64 | 0,13 | 49,6 | 331,7 | 430,9 |
| 11 | 35 | 35 | 444,8 | 1,64 | 0,13 | 57,8 | 387,0 | 502,7 |
| 12 | 40 | 40 | 508,4 | 1,64 | 0,13 | 66,1 | 442,3 | 574,5 |
| 13 | 45 | 45 | 571,9 | 1,64 | 0,13 | 74,4 | 497,6 | 646,3 |
| 14 | 50 | 50 | 635,5 | 1,64 | 0,13 | 82,6 | 552,9 | 718,1 |
| 15 | 55 | 55 | 699,0 | 1,64 | 0,13 | 90,9 | 608,2 | 789,9 |
| 16 | 60 | 60 | 762,6 | 1,64 | 0,13 | 99,1 | 663,4 | 861,7 |
| 17 | 70 | 70 | 889,7 | 1,64 | 0,13 | 115,7 | 774,0 | 1005,3 |
| 18 | 80 | 80 | 1016,8 | 1,64 | 0,13 | 132,2 | 884,6 | 1149,0 |
| 19 | 90 | 90 | 1143,9 | 1,64 | 0,13 | 148,7 | 995,2 | 1292,6 |
| 20 | 100 | 100 | 1271,0 | 1,64 | 0,13 | 165,2 | 1105,7 | 1436,2 |
| 21 | 25 | 25 | 272,3 | 1,64 | 0,05 | 13,6 | 258,7 | 285,9 |
| 22 | 30 | 30 | 326,8 | 1,64 | 0,05 | 16,3 | 310,5 | 343,1 |
| 23 | 35 | 35 | 381,3 | 1,64 | 0,05 | 19,1 | 362,2 | 400,3 |
| 24 | 40 | 40 | 435,7 | 1,64 | 0,05 | 21,8 | 413,9 | 457,5 |
| 25 | 45 | 45 | 490,2 | 1,64 | 0,05 | 24,5 | 465,7 | 514,7 |
| 26 | 50 | 50 | 544,7 | 1,64 | 0,05 | 27,2 | 517,4 | 571,9 |
| 27 | 55 | 55 | 599,1 | 1,64 | 0,05 | 30,0 | 569,2 | 629,1 |
| 28 | 60 | 60 | 653,6 | 1,64 | 0,05 | 32,7 | 620,9 | 686,3 |
| 29 | 70 | 70 | 762,5 | 1,64 | 0,05 | 38,1 | 724,4 | 800,7 |
| 30 | 80 | 80 | 871,5 | 1,64 | 0,05 | 43,6 | 827,9 | 915,0 |
| 31 | 90 | 90 | 980,4 | 1,64 | 0,05 | 49,0 | 931,4 | 1029,4 |
| 32 | 100 | 100 | 1089,3 | 1,64 | 0,05 | 54,5 | 1034,9 | 1143,8 |

## Влияние коэффициента вариации на точность идентификации класса бетона

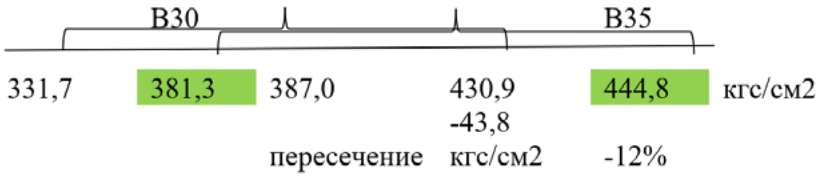
Влияние коэффициента вариации на точность идентификации класса по прочности рассмотрено на примере бетона В90, при предельных коэффициентах вариации $v$ = 13 и 5%. Получается, что строгий контроль однородности необходим не только для соблюдения нормативов, но и для реального обеспечения безопасности конструкций. Можно ли говорить о необходимости введения жестких ограничений на коэффициент вариации для высокопрочных бетонов?

Требования сформулированы на основании наиболее точных прямых разрушающих методов контроля. Результаты расчетов сведены в табл. 3 и показаны на рис. 2 и 3.

— Класс В10 и 12,5




— Класс В30 и 35




— Класс В90 и 100

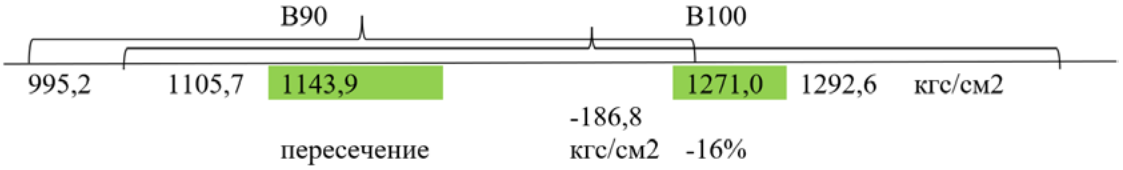
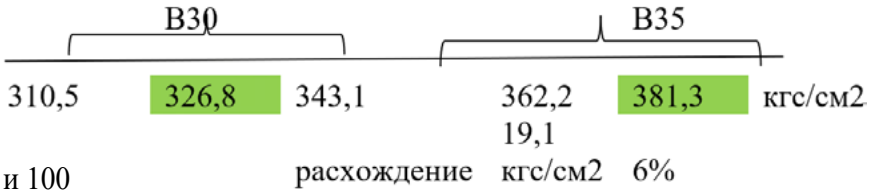



**Рис. 2.** Пересечение допустимых результатов контроля прочности бетона при соседних классах бетона при коэффициенте вариации ν = 0,13

— Класс В30 и 35




— Класс В90 и 100

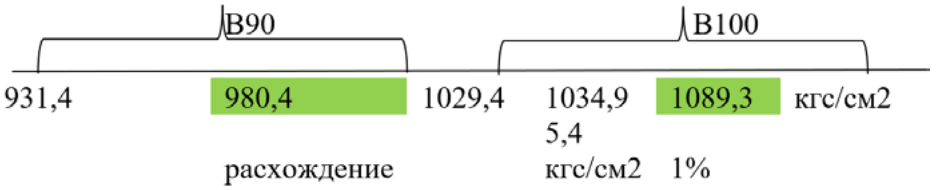



**Рис. 3.** Отклонение допустимых результатов контроля прочности бетона при соседних классах бетона при коэффициенте вариации ν = 0,05

Из представленных результатов видно, что использование идентификации бетона высоких классов при допустимом коэффициенте вариации $v$ = 0,13, пересечение зон допустимых результатов прочности по классу составляет 12–16 %. В абсолютных величинах пересечение показателя прочности для классов В90–В100 составляет 18,6 МПа. Идентификация может осуществляться по средней величине, но это существенно отразится на надежности возводимых конструкций.

При коэффициенте вариации $v$ = 0,05 идентификация осуществляется достаточно эффективно, отклонение составляет 4–5 %, что находится

в пределах погрешности измерения прочности [16]. Значит, существующий подход соответствует требованиям однородности бетона в пределах 5 %. При допустимом коэффициенте вариации бетона $v$ = 0,13 отличие классов бетона не будет позволять точно определить класс бетона.

Использование же косвенных методов значительно исказит точность измерений, поскольку точность построения кодировочных кривых составляет среднее квадратическое отклонение 12 % [17] и затруднит идентификацию высокопрочных бетонов из-за погрешностей градуировки.

Прямые методы контроля, в свою очередь, имеют собственную погрешность: нормативы предполагают, что погрешность прямых разрушающих методов составляет 2 %, а для прямых неразрушающих методов контроля прочности бетона — 4–7 % [17].

## Заключение

Проведенный анализ позволяет заключить, что использование высокопрочных бетонов требует пересмотра принципов оценки качества и более высоких требований однородности показателей бетона. Применение высокопрочных бетонов подразумевает необходимость проектировать и выпускать бетоны с высокой степенью однородности, с минимальным коэффициентом вариации, близким ν = 0,05.

Таким образом, можно сделать выводы:

1) повышение требований к однородности бетона позволяет точнее идентифицировать его класс прочности, что особенно важно для высокопрочных материалов;

2) европейские и российские нормативные подходы имеют принципиальные различия, что требует адаптации методик контроля;

3) контроль коэффициента вариации до уровня 5 % позволяет значительно повысить точность классификации.

Вопросы однородности бетона играют ключевую роль в обеспечении качества и надежности бетонных конструкций. Результаты исследования показывают, что традиционные методы контроля могут быть недостаточно точными для высокопрочных бетонов, и необходимо внедрение более строгих нормативов в части допустимого коэффициента вариации.

Дальнейшие исследования должны быть нацелены на развитие гибридных методов контроля, объединяющих статистические подходы европейских стандартов и детализированный анализ партий, используемый в российских нормативах. Такой подход позволит одновременно учитывать вариативность производства и обеспечивать стабильность характеристик бетона, что повысит надежность и эффективность строительных конструкций.

## Список источников

1. EN 12390-3. Методы испытаний бетона. Часть 3. Определение прочности на сжатие испытываемых образцов. EN 12390-3:2009+AC:2011.

2. Wu L. L. Exploring the compositional effect of eco-friendly ultra-high performance concrete on dynamic strength based on stacking algorithm and explainable artificial intelligence / L. L. Wu, D. L. Zou, Y. F. Hao // Developments in the Built Environment. — 2024. — 20. — 100574. — DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100574.

3. Farooq F. Predictive modeling for sustainable high-performance concrete from industrial wastes: a comparison and optimization of models using ensemble learners / F. Farooq, W. Ahmed, A. Akbar, F. Aslam // J. Clean. Prod. — 2021. — 292. — 126032. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126032.

4. Li Q. Prediction of compressive strength of rice husk ash concrete based on stacking ensemble learning model / Q. Li, Z. Song // J. Clean. Prod. — 2022. — 382. — 135279. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135279.

5. Li P. P. Synergistic effect of steel fibres and coarse aggregates on impact properties of ultra-high performance

fibre reinforced concrete / P. P. Li, Y. Y. Y. Cao, M. J. C. Sluijsmans, H. J. H. Brouwers et al. // Cem. Concr. Compos. — 2021. — 115. — 103866. — DOI: 10.1016/j. cemconcomp.2020.103866.

6. Yu Q. Research progress on the dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete under high strain rates / Q. Yu, W. Zhuang, C. Shi // Cem. Concr. Compos. — 2021. — 124. — 104258. — DOI: 10.1016/j.cemconcomp. 2021.104258.

7. Zhuang W. The effect of supplementary cementitious material systems on dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete paste / W. Zhuang, S. Li, Q. Yu // Construct. Build. Mater. — 2022. — 321. — 126361. — DOI: 10.1016/j. conbuildmat.2022.126361.

8. Беленцов Ю. А. Влияние точности контроля на качество возводимых конструкций / Ю. А. Беленцов, М. С. Абу-Хасан / БСТ: Бюллетень Строительной Техники. — 2021. — № 10. — С. 20–23.

9. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

10. ГОСТ 18105—2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.

11. ГОСТ 31914—2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества.

12. Тур В. В. О применении критериев соответствия прочности бетона согласно СТБ EN 206-1-2000 / В. В. Тур, С. С. Дереченник, А. С. Дереченник // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: М. Ф. Марковский и др. — Минск, 2012. — Вып. 4. — С. 152–176.

13. Beal A. N. Concrete strength testing — are the code writers getting it right? / A. N. Beal // The Structural Engineer. — 19 May 2009. — Vol. 87(10). — P. 73.

14. Beal A. N. Concrete Cube Strength — what use are Statistics? / A. N. Beal // ICE Proc. — December, 1981. — Part 2. — Pp. 1037–1048.

15. Neville A. M. Core Tests: Easy to Perform, not Easy to Interpret / Concrete International. — November 2001. — Pp. 57–68.

16. Беленцов Ю. А. Метрологическое обеспечение контроля качества бетонов для обеспечения расчетного уровня надежности строительной продукции / Ю. А. Беленцов, М. С. Абу-Хасан, В. В. Егоров, Л. Р. Куправа // БСТ: Бюллетень Строительной Техники. — 2021. — № 4. — С. 34–36.

17. ГОСТ Р 53231—2008. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.

Дата поступления: 31.03.2025
Решение о публикации: 16.04.2025

**Контактная информация:**
БЕЛЕНЦОВ Юрий Алексеевич — д-р техн. наук, проф.; belents@mail.ru
КАЗАНСКАЯ Лилия Фаатовна — д-р техн. наук, проф.; yalifa@inbox.ru
ДОКШИНА Елизавета Аркадьевна — студент; dokshinalisa15@gmail.com

## Influence of Material Homogeneity on the Accuracy of Strength Definition for High Performance Concretes

**Yu. A. Belentsov, L. F. Kazanskaya, E. A. Dokshina**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Belentsov Yu. A., Kazanskaya L. F., Dokshina E. A. Influence of Material Homogeneity on the Accuracy of Strength Definition for High Performance Concretes // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 499–508. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-499-508

**Summary**

**Purpose:** To investigate the effect of concrete uniformity requirements on the accuracy of its strength characteristics; to identify the limitations of traditional strength control methods when working with high performance concretes. The particularities of the European and Russian regulatory approaches, the influence of the coefficient of variation on the reliability of the material classification and possible ways to improve the accuracy of control are considered. **Methods:** Methods of comparative analysis of regulatory documents and scientific publications in different countries, methods of mathematical statistics, and direct destructive tests of concrete samples for strength were used. **Results:** It has been found that as the concrete class increases, the influence of the coefficient of variation on the accuracy of classification, which can lead to errors in the classification of high strength concretes. The analysis of existing strength control methods has been carried out and their limitations have been identified. Differences in regulatory approaches between the European and Russian standards require the adaptation of control methods to modern requirements. It has been demonstrated that increasing the uniformity of concrete mixtures helps to increase the accuracy of design calculations and improve the operational characteristics of construction facilities. **Practical significance:** The results obtained can be used to improve concrete strength control methods, develop new regulatory requirements, and improve the reliability of concrete structures.

**Keywords:** High-strength/high performance concrete, concrete homogeneity, compressive strength, quality control, coefficient of variation, test methods.

## Reference

1. *EN 12390-3. Metody ispytaniy betona. Chast' 3. Opredelenie prochnosti na szhatie ispytyvaemykh obraztsov. EN 12390-3:2009+AC:2011* [EN 12390-3. Test methods for concrete. Part 3. Determination of compressive strength of test specimens. EN 12390-3:2009+AC:2011]. (In Russian)

2. Wu L. L., Zou D. L., Hao Y. F. Exploring the compositional effect of eco-friendly ultra-high performance concrete on dynamic strength based on stacking algorithm and explainable artificial intelligence. Developments in the Built Environment, 2024, 20, 100574. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100574.

3. Farooq F., Ahmed W., Akbar A., Aslam F. Predictive modeling for sustainable high-performance concrete from industrial wastes: a comparison and optimization of models using ensemble learners. J. Clean. Prod., 2021, 292, 126032. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126032.

4. Li Q., Song Z. Prediction of compressive strength of rice husk ash concrete based on stacking ensemble learning model. J. Clean. Prod., 2022, 382, 135279. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135279.

5. Li P. P., Cao Y. Y. Y., Sluijsmans M. J. C., Brouwers H. J. H. et al. Synergistic effect of steel fibres and coarse aggregates on impact properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete. Cem. Concr. Compos., 2021, 115, 103866. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103866.

6. Yu Q., Zhuang W., Shi C. Research progress on the dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete under high strain rates. Cem. Concr. Compos, 2021, 124, 104258. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104258.

7. Zhuang W., Li S., Yu Q. The effect of supplementary cementitious material systems on dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete paste. Construct. Build. Mater, 2022, 321, 126361. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126361.

8. Belentsov Yu. A., Abu-Khasan M. S. Vliyanie tochnosti kontrolya na kachestvo vozvodimykh konstruktsiy [Influence of control accuracy on the quality of erected structures]. *BST: Byulleten' Stroitel'noy Tekhniki* [BST: Bulletin of Construction Equipment]. 2021, Iss. 10, pp. 20–23. (In Russian)

9. *SP 63.13330.2018. Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii. Osnovnye polozheniya* [SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions]. (In Russian)

10. *GOST 18105—2018. Betony. Pravila kontrolya i otsenki prochnosti* [GOST 18105—2018. Concretes. Rules for control and strength assessment]. (In Russian)

11. *GOST 31914—2012. Betony vysokoprochnye tyazhelye i melkozernistye dlya monolitnykh konstruktsiy. Pravila kontrolya i otsenki kachestva* [GOST 31914—2012. High-strength heavy and fine-grained concrete for monolithic structures. Rules for control and quality assessment]. (In Russian)

12. Tur V. V., Derechennik S. S., Derechennik A. S. O primenenii kriteriev sootvetstviya prochnosti betona soglasno STB EN 206-1-2000 [On the application of criteria for compliance of concrete strength according to STB EN 206-1-2000]. *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: sb. nauch. tr.* [Problems of modern concrete and reinforced concrete: collection of scientific papers]. Minsk, 2012, Iss. 4, pp. 152–176. (In Russian)

13. Beal A. N. Concrete strength testing — are the code writers getting it right? The Structural Engineer, 19 May 2009, vol. 87(10), p. 73.

14. Beal A. N. Concrete Cube Strength — what use are Statistics? Proc., December, 1981, part 2, pp. 1037–1048.

15. Neville A. M. Core Tests: Easy to Perform, not Easy to Interpret Concrete International, November 2001, pp. 57–68.

16. Belentsov Yu. A., Abu-Khasan M. S., Egorov V. V., Kuprava L. R. Metrologicheskoe obespechenie kontrolya kachestva betonov dlya obespecheniya raschetnogo urovnya nadezhnosti stroitel'noy produktsii [Metrological support of concrete quality control to ensure the estimated level of reliability of construction products]. *BST: Byulleten' Stroitel'noy Tekhniki* [BST: Bulletin of Construction Equipment]. 2021, Iss. 4, pp. 34–36. (In Russian)

17. *GOST R 53231—2008. Betony. Pravila kontrolya i otsenki prochnosti* [GOST R 53231—2008. Concretes. Rules for control and strength assessment]. (In Russian)

Received: March 31, 2025
Accepted: April 16, 2025

**Author's information:**
Yuri A. BELENTSOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; belents@mail.ru
Liliya F. KAZANSKAYA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; yalifa@inbox.ru
ELIZAVETA A. DOKSHINA — Student; dokshinalisa15@gmail.com

УДК 692.6

# К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 1

**М. Д. Вебер[1], А. В. Кузнецов[2]**

[1]ООО «Инфорспроект», Российская Федерация, 115280, Москва, ул. Ленинская слобода, 19
[2]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Вебер М. Д., Кузнецов А. В.* К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 1 // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 509–530. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-509-530

## Аннотация

**Цель:** Осветить имеющийся инструментарий для обследований технического состояния бескосоурных каменных лестниц. **Материалы и методы:** Проведены архивные исследования. Выполнен анализ и сравнение проведенных ранее научных и практических исследований в данной области. **Результаты:** Собраны актуальные данные для проведения поверочных расчетов существующих конструкций. Даны рекомендации по учету опыта проектирования, строительства и эксплуатации объектов исследования. Сформулированы направления дальнейших исследований. **Практическая значимость:** Предоставление практикующим инженерам основания для сбережения ценных исторических конструкций, восстановление которых с сохранением их первоначальной схемы работы в настоящее время усложнено.

**Ключевые слова:** Каменные конструкции, бескосоурные лестницы, висячие лестницы, обследование, реконструкция, реставрация.

## Введение

В практике инженерной работы на исторических зданиях нередко встречаются строительные конструкции, для которых возникает дилемма отсутствия нормативов или общепринятых подходов к обследованию и проектированию.

Данная ситуация сложилась исторически из-за утраты знаний и производственной базы, использовавшихся при первоначальном возведении объектов в прошлом. Дело в том, что массовое строительство как отрасль в каждый момент времени предполагает совокупность методологии (научной и нормативной базы, квалификации изыскателей, проектировщиков, строителей), материальных ресурсов (сырья, строительных материалов) и производственных мощностей (инструментов и механизмов), характерных для данного этапа научно-технического развития. В рамках перехода от одного этапа к другому происходит трансформация всего отраслевого организма.

Этот процесс является существенным фактором работы с историческими конструкциями, так как инженеру приходится постоянно искать разумный способ уложить физический объект, существующий иногда веками, в «прокрустово ложе» современных норм, материалов и мощностей.

Для каждого исторического периода и географической точки в указанную «серую зону» попадают свои типы элементов. В настоящей статье авторы постарались осветить возможные методы оценки технического состояния бескосоурных, так называемых «висячих» каменных лестниц, характерных для застройки второй половины XIX — начала XX века в Санкт-Петербурге.

## История и типология

В соответствии со словарем В. И. Плужникова [1, с. 35] висячая лестница — это «не имеющая столбчатых опор лестница, ступени которой заделываются одним концом в кладку стены, а другой остается незакрепленным».

Образцы такого типа конструкций возводились уже в античности. Отдельные древние экземпляры сохранились до наших дней (рис. 1). Тем не менее в мировой практике исследований считается, что прообразом поздних висячих лестниц XIX–XX вв. [2] является спиральная каменная лестница овальной геометрии в плане, возведенная итальянским архитектором А. Палладио в 1560 г. в Венеции (рис. 2).

К наиболее ранним образцам висячих каменных лестниц в Петербурге можно отнести лестницу павильона «Шапель» в Царском селе (1825–1828 гг.) (рис. 3), а также спиральные лестницы в звонницах Исаакиевского собора (1818–1858 гг.) (рис. 4). В приведенных примерах ступени выполнены из гранита.

В типологии висячих каменных лестниц исторических зданий Петербурга можно выделить две основные функциональные группы: парадные и черные. В обеих группах встречаются двухмаршевые, трехмаршевые, многомаршевые, спиральные решения. Лестничные клетки отличаются богатым разнообразием геометрии в плане.

*Парадные* висячие каменные лестницы (рис. 5, 6) являются уникальными объектами. Для них характерно обилие архитектурных деталей, ажурность, обтеска ступеней с нижней стороны. Кроме известняка в таких лестницах можно встретить мрамор или гранит. Количество этих лестниц в городе невелико, и каждая требует отдельных исследований.

Большинство висячих каменных лестниц в Петербурге, возведенных до революции, — *черные* (рис. 7, 8). Основной причиной этому послужило рекомендуемое ограничение ширины марша до 1,5 м [4, с. 531], принятое с учетом прочности применявшегося в то время природного камня и размеров сечения ступеней.

В случаях, когда требовались более широкие марши, в тот же исторический период применялись каменные лестницы с опиранием на спаренные металлические полосы вдоль края марша. Такие

**Рис. 1.** Сохранившаяся до наших дней древняя прямая висячая каменная лестница в замке Каср-аль-Азрак, Иордания (датирована не позднее 13 в.), (автор: Ж. Хусен, 2010; по материалам сайта Wikipedia.org; лицензия GNU FDL; постоянная ссылка: https://en.wikipedia.org/wiki/File:20100922_qasralazrak33.JPG)

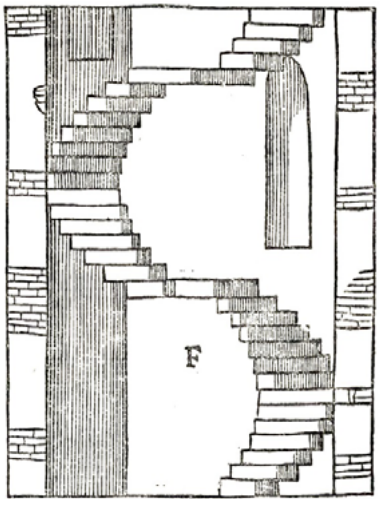



**Рис. 2.** Разрез овальной лестницы из труда А. Палладио «Четыре книги об архитектуре» (Венеция, 1570 г.), где описаны решения бескосоурных каменных лестниц [3]

**Рис. 3.** Лестница павильона «Шапель», возведенная по проекту А. А. Менеласа, Царское село (автор: Михаил М., 2018; по материалам сайта Citywalls.ru; постоянная ссылка: https://www.citywalls.ru/photo360959.html)

**Рис. 4.** Спиральная лестница в одной из звонниц Исаакиевского собора, возведенная по проекту О. Монферрана (автор: К. Олейникова, 2020; фото предоставлено для использования в данной статье)

**Рис. 5.** Парадная лестница особняка П. П. Дервиза, возведенная по проекту арх. А. Ф. Красовского в 1898 г., Английская наб., д. 28. (автор: Shuba, по материалам сайта Citywalls.ru; постоянная ссылка: https://www.citywalls.ru/photo669794.html)

**Рис. 6.** Парадная лестница доходного дома Елисеевых, возведенная по проекту арх. Г. В. Барановского в 1892–1894 гг., Биржевая линия В. О., д. 14 (автор: Shuba, по материалам сайта Citywalls.ru; постоянная ссылка: https://www.citywalls.ru/photo187494.html)

элементы уже именовались косоурами и фактически выполняли их функцию, несмотря на то, что работают они иначе, чем принятые в современном строительстве двутавры и швеллеры.

В отличие от парадных лестниц, где ступени обычно обтесывались снизу, черные лестницы снизу часто оставались необработанными в целях удешевления и с расчетом на лучшее сцепление при последующем оштукатуривании. В некоторых случаях под маршем устраивался деревянный подшив, который далее оштукатуривался по дранке. Иногда для удешевления строительства проступи и подступенки известняковых ступеней дополнительно облицовывались мраморными

**Рис. 7.** Черная лестница в звоннице Морского Никольского Собора в Кронштадте. Частичное обрушение штукатурного слоя снизу марша (фото выполнено авторами, 2009)

**Рис. 8.** Лестница в жилом доме 1916 г. постройки, Приморский пр., д. 6. Частичное обрушение штукатурного слоя снизу марша (автор: Ю. Удалов, 2025; фото предоставлено для использования в данной статье)

плитами, установленными на алебастр [5, с. 405; 6, с. 524].

Заделка ступеней в стену осуществлялась уже после возведения стен [4, с. 532].

Для изготовления ступеней наиболее массово в дореволюционном строительстве Петербурга использовался плотный известняк ближайших месторождений: путиловский (каменоломни близ сел Антоново [7, с. 39], Путилово, Воловищево, Никольщина, Петровщина, Дальняя Борова, Близкая Борова, Крутой ручей [8, с. 43]), волховский (каменоломни Победище и Рокольское [7, с. 40]), тосненский (каменоломни близ села Никольское [7, с. 40]), гатчинский (Новодеревенская каменоломня, а также каменоломни близ деревень Ротковая, Пудость, Парицы, Черницы [7, с. 40–42]).

Данные известняки залегают пластами, неодинаковыми по своим физико-механическим свойствам. Пласты путиловского, волховского и тосненского известняка получили индивидуальные названия. Информация об этих названиях и сфере применения конкретных пластов в литературе разнится [7, с. 39; 8, с. 44; 9, с. 21–22]. Можно перечислить следующие пласты путиловского известняка, которые использовались для изготовления ступеней: буток [8, 9], братеник (слой самого высокого качества) [8, 9], переплет [7–9], мягонький [9], наджелтый [7, 9], желтый [7–9], старицкий [8], новый [9].

В. П. Стаценко [5, с. 405; 6, с. 524] указывает, что для ступеней наиболее подходящим материалом считались путиловская и волховская плиты хороших пластов (зеленовато-серого цвета без прослоек и каверн), а лучшим — ревельский мраморовидный известняк.

Готовые ступени именовались «ступенной плитой» и имели стандартные габариты (табл. 1).

При производстве работ по возведению висячих каменных лестниц особое внимание уделялось так называемой притеске (т. е. геометрии стыка) смежных ступеней, определявшей способность марша работать как единое целое. В. П. Стаценко [6, с. 536] приводит три варианта притески (рис. 9), Урочного положения [10, с. 354] — только один (рис. 10).

Несмотря на ответственность данного стыка, в практике обследований порой встречается полное отсутствие притески ступеней друг к другу вплоть до наличия зазора между каменными эле-

Таблица 1. Ходовые габариты каменных известняковых ступеней в Петербурге [10, с. 19].

| Ширина (т. е. размер проступи), вершки (мм) | Толщина (т. е. размер подступенка), вершки (мм) | Длина (т. е. ширина марша с заделкой), аршины (мм) |
|---|---|---|
| 8 (356), 9 (401) | 2½ (112), 3½ (156) | 1½ (1067), 1¾ (1245), 2 (1423), 2¼ (1601), 2½ (1778), 2¾ (1956) |
| 8 (356) ... 10 (445) | 3¼ (145) ... 3½ (156) | 2(1423), 2¼ (1601), 2½ (1778), 3 (2134), 3¼ (2312), 3½ (2490), 3¾ (2667), 4 (2845) |

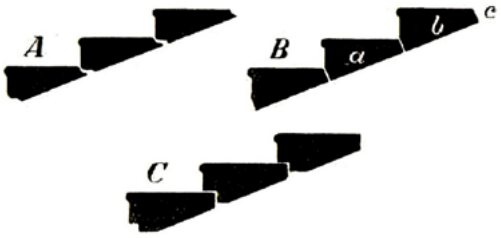



**Рис. 9.** Типы притески ступеней по В. П. Стаценко [6, с. 536]

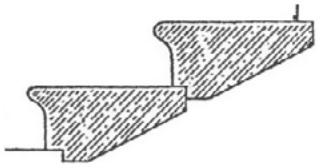


**Рис. 10.** Притеска ступеней по Урочному положению [10, с. 354]

ментами, заполненного впоследствии цементным раствором.

Возведение висячих каменных лестниц, кроме вышеприведенных ограничений по несущей способности, имело ряд других существенных недостатков [5, с. 416; 6, с. 537]:

1. Необходимость заделки всех ступеней в стену на некоторую глубину создавала *препятствие для пропуска вертикальных инженерных коммуникаций* в стене вдоль марша. Рекомендуемые значения варьировались от источника к источнику и составляли:

– 7–8 дюймов (178–204 мм) [10, с. 352];

– 3–6 вершков (134–267 мм) [4, с. 531; 5, с. 415; 11, с. 25];

– 120–130 мм (при маршах шириной не более 1,2 м) и 250 мм (при маршах шириной от 1,2 до 2,0 м) [4, с. 532].

2. Ответственность ступеней в висячих лестницах обуславливала *необходимость тщательного контроля качества* используемого природного камня. К поставляемым на стройку изделиям предъявлялись повышенные требования, что удорожало стоимость строительства. Строгий контроль качества включал в себя:

– заказ лучших сортов камня без каверн, поперечных и продольных трещин, а также глинистых прослоек [5, с. 406; 6, с. 525; 10, с. 352; 11, с. 21];

– дополнительный входной контроль на площадке [5, с. 406; 6, с. 525; 11, с. 21], так как поставщики камня довольно часто халатно относились к контролю качества на каменоломнях, в том числе добывая камень зимой или поздней осенью во время морозов [8, с. 94];

– тщательную подгонку и обтеску элементов [5, с. 415; 6, с. 537; 10, с. 352; 11, с. 21];

– аккуратную заделку элементов в стену [10, с. 352] на «жирном» цементном растворе [5, с. 415; 6, с. 537; 11, с. 21] с тщательной расщебенкой всех пустот [11, с. 21].

3. Для плотного известняка характерно *хрупкое разрушение*. В случае выхода из строя одной или двух ступеней (особенно при отсутствии надежной притески), при резком ударе или пожаре случалось лавинообразное обрушение всего марша [5, с. 416; 6, с. 537; 10, с. 352].

Развернутое описание бескосоурных висячих каменных лестниц в отечественных источниках встречается вплоть до начала 1930-х гг. [6, с. 536].

К середине 1930-х гг. применение природного камня для изготовления ступеней перестало считаться целесообразным [12, с. 635; 13, с. 378]. В этот период конструктивное решение бескосоурных лестниц воспринималось выгодным в первую очередь с точки зрения экономии стали, однако в качестве материала для ступеней рекомендовалось использовать уже сборный железобетон [12, с. 626–627]. Отметим, что использование сборного железобетона для этих нужд упоминалось еще в начале XX в. у В. Г. Залесского [4, с. 532].

Задачи отрасли в удешевлении и унификации строительства, вкупе с расширением использования различных бетонов, обусловили с 1930-х гг. концентрацию научного внимания в области каменных и армокаменных конструкций на кладке стен. В этой связи невозможно не упомянуть вклад созданной в 1930 г. в Москве лаборатории каменных конструкций ЦНИПС (ныне ЦНИИСК), где под руководством Л. И. Онищика была разработана основа действующих до сегодняшнего дня норм [14; 15, с. 11–12; 16]. Природный камень как материал для кладки стен продолжал активно применяться в южных республиках СССР: Азербайджане, Армении, Молдавии, Украине, Узбекистане [17].

Исследования же работы иных типов конструкций, в том числе висячих каменных лестниц к этому моменту перестали быть актуальными. Возобновление интереса к ним созрело только к началу XXI в., когда из-за физического износа регулярно стала возникать необходимость их ремонта.

## Методы расчета

Известно, что оценка несущей способности существующей строительной конструкции может быть выполнена двумя способами: расчетным и эмпирическим.

Для строительных конструкций, материал которых характеризуется хрупким разрушением, *натурные испытания* могут привести к необратимым изменениям и, следовательно, к утрате подлинных исторических элементов. Для висячих каменных лестниц такие испытания несут в себе повышенные риски с реставрационной точки зрения. Восстановление разрушенного элемента может оказаться невыполнимой задачей как для проектирования и согласования, так и для непосредственного производства работ по возведению аналогичной конструкции.

*Расчетное обоснование* несущей способности и применение неразрушающих методов определения физико-механических свойств материалов в соответствии с ГОСТ Р 55567—2013 [18, п. 4.4] для подобных исторических конструкций всегда является предпочтительным.

В довольно ранних отечественных источниках середины XIX в. уже отражены соображения по расчету висячих каменных лестниц [19, с. 403]. Несмотря на то, что опирание ступеней друг на друга создавало кручение, определяющим фактором считался изгиб. Это допущение приводится в литературе на всем протяжении периода возведения подобных конструкций в массовом строительстве [4, с. 533; 19, с. 403; 20, с. 317; 21, с. 433].

В те годы расчет велся по допускаемым напряжениям и наиболее подробно описан в пособии В. Г. Залесского [4, с. 533]. Вертикальная нагрузка на ступень раскладывалась на две силы, направленные продольно и поперечно по направлению к наклонной линии марша (рис. 11). Несмотря на то, что наклонная притеска ступеней считалась наименее надежным способом стыковки [5, с. 415; 6, с. 537], в расчете она частично учитывалась: предполагалось, что изгиб происходит исключительно в поперечном направлении, в то время как продольное усилие передается на нижележащую ступень [4, с. 533]. Дальнейших расчетных проверок (кроме проверки отдельной ступени), учитывающих совместную работу всего марша, не проводилось.

В. Г. Залесский открыто констатировал несовершенство данной методики [4, с. 533]. Вместе с тем профессионалы понимали существование эффекта совместной работы ступеней в марше. В. Г. Залесский приводит рекомендацию по устройству стрелы подъема при укладке ступеней (фактически превращая марш в ползучий свод). Урочное положение обращает внимание на критическую важность надежного опирания нижней фризовой ступени, без которого впоследствии может произойти лавинообразный отказ всего марша [10, с. 352].

Необходимо отметить, что распространенная в современной инженерной практике парадигма о том, что природный и искусственный камень на растяжение практически не работают, является существенным упрощением. *В каменных висячих лестницах ступени в общем случае работают на изгиб с кручением.* Такие типы напряженно-деформированного состояния природных камней в настоящее время изучает геомеханика [22, 23].

Расчеты каменных конструкций по допускаемым напряжением были общепринятыми в России и СССР до 1943 г. [15, с. 15]. Допускаемые напряжения назначались на основании испытаний при одноосном напряженном состоянии (например, при осевом сжатии). Установленные при этом допускаемые напряжения применялись также для расчета конструкций, работающих в более сложных условиях, например при внецентренном сжатии. Зависимость между напряжениями и деформациями принималась прямолинейной, по закону Гука, и в соответствии с этим для расчета применялись формулы сопротивления материалов, выведенные для идеально упругого тела.

Для природного камня допускаемые напряжения (т. е. его расчетное сопротивление) определялись умножением временного сопротивления материала на понижающие коэффициенты, которые довольно сильно варьировались от автора к автору:

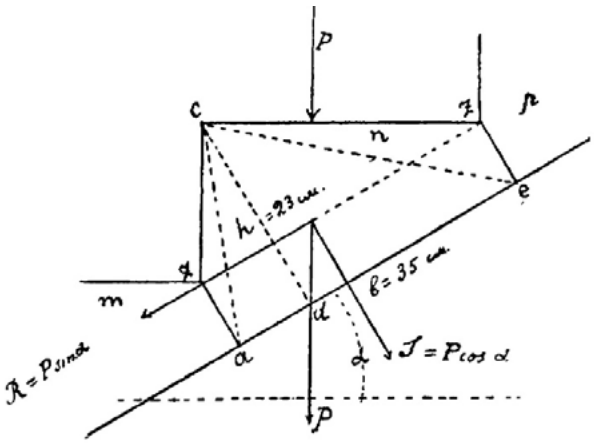



**Рис. 11.** Схема разложения вертикальной нагрузки по В. Г. Залесскому [4, с. 533]

– В. Г. Залесский рекомендовал использовать на изгиб — 1/6 (для висячих каменных лестниц), 1/10 (в остальных случаях) [4, с. 534];

– Н. К. Лахтин — на сжатие — от 1/20 до 1/30 (для сводов) [24, с. 24];

– Н. А. Белелюбский — на сжатие — 1/30 [25, с. 182];

– И. Г. Малюга — на сжатие — от 1/20 до 1/40 (для частей сооружений, подвергающихся «сотрясению») и, только в особо благоприятных случаях, — 1/10 [25, с. 182].

Более последовательно описывает данные коэффициенты М. П. Субботин с отсылкой к исследованиям И. Баушингера (табл. 2) [26, с. 112].

С 1943 г. для каменных конструкций стал применяться метод расчета по разрушающим нагрузкам, отраженный в «Указаниях по проектированию каменных конструкций в условиях военного времени» [15, с. 15]. В данном методе разрушающие нагрузки определялись по экспериментально-теоретическим формулам, а допускаемые нагрузки — делением разрушающих нагрузок на коэффициент запаса.

С 1955 г. основным методом расчета стал расчет по предельным состояниям, реализованный впервые в нормах НиТУ-120-55 [15, с. 15]. Особенностью данного метода является: учет трех возможных расчетных предельных состояний (по

Таблица 2. Коэффициенты перехода от предела прочности к допускаемым напряжениям по М. П. Субботину [26, с. 112]

| Прочностная характеристика / Условия работы элемента | Сопротивление сжатию | | Сопротивление разрыву | | Сопротивление скалыванию | | Сопротивление изгибу | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Временное | Расчетное | Временное | Расчетное | Временное | Расчетное | Временное | Расчетное |
| В большинстве случаев | 1* | 1/20 | 1/30 | 1/300 | 1/14 | 1/140 | 1/6 | 1/60 |
| Самые благоприятные условия | 1* | 1/10 | | | | | | |
| Высокие колонны, подвергающиеся сотрясению | 1* | 1/40 | | | | | | |

* За единицу принято временное сопротивление сжатию природного камня.

Таблица 3. Классификация известняка по прочности, применявшаяся до середины XX в.

| Наименование камня | Классификация | Временное сопротивление сжатию |
|---|---|---|
| Известняки (мраморы, доломиты, плотные известняки, раковистые известняки и т. п.) | I качества | 1000 кг/см$^2$ (98,1 МПа) |
| | II качества | 800 кг/см$^2$ (78,4 МПа) |
| | III качества | 500 кг/см$^2$ (49,0 МПа) |

несущей способности, по величине предельных деформаций и по величине предельного раскрытия трещин) и применение вместо коэффициента запаса различных расчетных коэффициентов.

Фактически эволюция отечественной нормативной базы была обусловлена стремлением к оптимизации новых конструкций, так как использование коэффициентов, по типу приведенных в табл. 2, часто вело к тому, что запас оказывался непомерно большим, а элементы — громоздкими и неэкономичными [15, с. 17]. При использовании коэффициентов из табл. 2 ступени каменных висячих лестниц часто оказывались перегруженными. В. Г. Залесский в своем примере сравнивал полученные напряжения не с расчетным значением, а с временным. Коэффициент запаса (т. е. величина, обратная коэффициентам из табл. 2), в его примере составляет не 10, а чуть более 4 [4, с. 534].

До 1930-х гг. в Советском Союзе активно опирались на немецкие нормы (табл. 3) и научные данные. В 1930-е гг. советскими учеными были проведены значительные исследования по оптимизации консервативных коэффициентов запаса в каменных конструкциях. А. М. Розенблюмас приводит сравнение действовавших на тот момент немецких норм с полученными результатами [15, с. 12]. В немецких нормах для кирпича прочностью 15,0 МПа допускаемые напряжения составляли 1,4 МПа, что эквивалентно коэффициенту запаса около 11, в то время как значение по результатам советских исследований составило, в зависимости от качества раствора, от 3 до 1,5. Предпосылки полученного коэффициента запаса $k = 3$ на прочность при сжатии, растяжении и изгибе описаны Л. И. Онищиком [14, с. 24–27].

В современных исследованиях Ф. Литтла [27], о которых будет сказано далее, также применяется метод расчета по допускаемым напряжениям и указано, что в большинстве случаев, если поверочный расчет показывает коэффициент запаса 3 и более, то натурные испытания марша не требуются (т. е. марш способен воспринимать действующие нагрузки). При этом ступени должны обладать однородностью (в них не должно быть существенных дефектов).

Учитывая то, что в общем случае, по сравнению с методом расчета по предельным состояниям, метод расчета по допускаемым напряжениям является более консервативным, а также опираясь на вышеприведенный опыт отечественных и зарубежных исследований, *в поверочных расчетах, в условиях отсутствия современной норматив-*

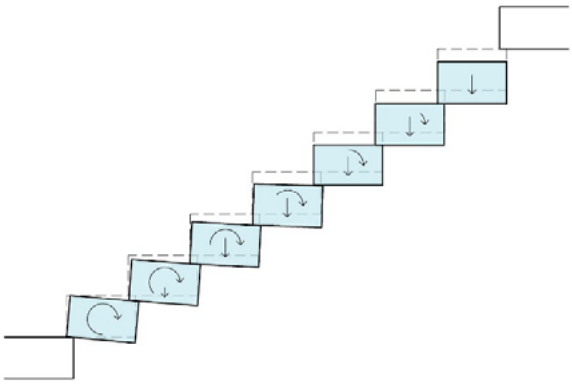


**Рис. 12.** Плоские ступени по С. Прайс и Х. Роджерс [2]. Картина усилий и деформаций

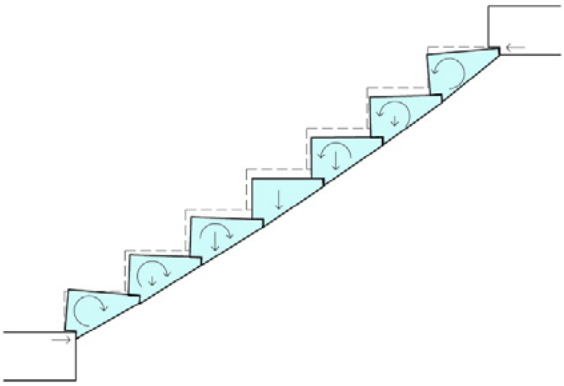


**Рис. 13.** Припазованные ступени по С. Прайс и Х. Роджерс [2]. Картина усилий и деформаций

*ной базы, разумно использовать метод расчета по допускаемым напряжениям и устанавливать минимальный коэффициент запаса k = 3.*

Необходимо отметить, что во второй половине XX в. в рамках геомеханики проводились дальнейшие исследования по уточнению соотношения прочности природного камня на сжатие к прочности на растяжение [22, с. 94]. Полученные значения являются менее консервативными, чем приведенные в табл. 2, поэтому в практической инженерной работе *для расчетного определения прочности на растяжение при известной прочности на сжатие рекомендуется использовать коэффициенты из табл. 2.*

При заданных прочности на сжатие и прочности на растяжение определение предельного касательного напряжения (в ступени оно возникает от перерезывающей силы и крутящего момента), в настоящее время может выполняться расчетно. *Для этого производится построение паспорта прочности в соответствии с приложением 2 ГОСТ 21153.8—88* [28].

К началу XXI в., как указывалось ранее, в мировой практике возникла потребность обновления имеющегося арсенала расчетных методов в отношении висячих каменных лестниц. Исследователи снова стали пытаться ответить на главный вопрос: работают ли ступени отдельно или совместно, и если они работают совместно, то как именно [29, 30]?

Начиная с 1990-х гг. стали публиковаться статьи, в которых делались попытки аналитической оценки перераспределения усилий в маршах висячих лестниц.

Дж. Хейман [31] использовал базовые формулы сопротивления материалов с учетом кручения и нарастания усилий в марше сверху вниз, однако не рассматривал разные варианты стыков ступеней. В его работе отмечено, что изгибающий момент воспринимается каждой ступенью индивидуально, в то время как крутящий момент вдоль марша нарастает. *То есть в работе ступени определяющим является не изгиб, а кручение.*

С. Прайс и Х. Роджерс [2], кроме обзора опыта обследования подобных лестниц, обозначили два принципиальных конструктивных решения ступеней по типу стыка (притески): плоские (plane treads) (рис. 12) и припазованные (rebated treads) (рис. 13). В данном исследовании указывалось, что при наличии надежной припазовки напряжения от кручения резко падают из-за перераспределения усилий вдоль марша как вверх, так и вниз. Формулы для расчета были приведены только для плоских ступеней, но содержали математический аппарат для учета трещин.

Ф. Литтл [27] привел формулы для расчета не только плоских, но и припазованных ступеней. Кроме того, в его исследовании приведены расчеты по деформациям.

Д. О'Дуайер [32] разработал методику вероятностного отказа таких лестниц.

Е. А. У. Маундер [30] проанализировал влияние арочного эффекта на работу конструкции.

И. Сайтос [33] разработал автоматизированную аналитическую модель для припазованных прямых маршей.

М. Ангелилло [34] сконцентрировал свое внимание на аналитических формулах для спиральных лестниц.

Помимо уточнения аналитических методов, в 2010-х гг. получили распространение методы численного моделирования [35, 36]. Наиболее перспективным для научных исследований каменных и армокаменных конструкций в целом и висячих каменных лестниц в частности в настоящее время считается метод дискретных элементов (МДЭ), изначально разработанный для моделирования сыпучих тел. При использовании данного машинного метода габариты конечных элементов модели задаются в соответствии с фактическими габаритами отдельных камней кладки. Взаимодействие между конечными элементами имитирует реальное физическое взаимодействие камней кладки с учетом физико-механических свойств раствора или с учетом его отсутствия. Имеется отечественный опыт подобных исследований иных каменных конструкций [37].

Для висячих каменных лестниц Б. Риго [35] выполнил сравнение вышеприведенных упрощенных аналитических методов с результатами расчетов при помощи МДЭ. Полученные результаты показали, что аналитические методы дают консервативные результаты на прямых маршах, а на спиральных занижают крутящие моменты.

Тем не менее ввиду сложности применения МДЭ в инженерной практике *на реальных объектах наиболее разумно применять аналитические методы: для прямых маршей — формул Ф. Литтла* [27]*, для спиральных — формул М. Ангелилло* [34].

В настоящее время приходится констатировать, что эффект от совместной работы ступеней в решающей степени зависит от типа и качества стыка между ступенями (мест притески). С. Прайс и Х. Роджерс приводят перечень факторов, которые необходимо учитывать при выполнении поверочного расчета существующих висячих каменных лестниц [2]:

– прочность камня лестницы;

– состояние материалов поддерживающей стены;

– состояние раствора между ступенями;

– метод возведения лестницы: ступень за ступенью или весь марш по кружалам;

– наличие вертикального и горизонтального опирания внизу и вверху марша;

– тип стыковки к площадкам;

– прочность и жесткость ограждения.

**Физико-механические свойства камня**

Базовым условием для осуществления корректного поверочного расчета, кроме наличия математического аппарата, является задание адекватных физико-механических свойств камня.

Отечественные научные исследования в области свойств природных камней ведутся непрерывно с XIX в.

До революции вопросами ресурсов и свойств строительного камня вообще и облицовочного в особенности занимались лаборатории Н. А. Белелюбского в Петербургском институте инженеров путей сообщения, Н. М. Абрамова — в Новочеркасске, К. К. Симинского — в Киеве.

В начале Первой мировой войны Российская академия наук создала Комиссию по изучению естественных производительных сил России (КЕПС), в задачу которой входило и изучение каменных материалов. Комиссия работала под руководством

академиков А. Е. Ферсмана, Ф. Ю. Левинсона-Лессинга, Д. С. Белянкина. После революции комиссия продолжила работу и опубликовала ряд выпусков трудов КЕПС [38, 39] по каменным материалам. Комиссия освещала ресурсы каменных строительных материалов, устанавливала методы оценки их качества и изучала поведение камня в постройках. Значительное внимание обращалось на разработку методов полевого и лабораторного изучения камня как в каменоломнях, так и в сооружениях и памятниках.

В 1930 г. Отдел каменных материалов КЕПС перешел в состав Петрографического института АН СССР, которая, в свою очередь, была переведена в Москву в 1934–1935 гг. Здесь была развернута большая современная лаборатория строительных материалов, оборудование которой позволяло проводить весь необходимый цикл испытаний камня как облицовочного материала. Экспедиционные работы заметно расширились. Районами исследований стали Южная Осетия, Абхазия, Армения, Кузнецкий бассейн, Алтай, Карелия, Камчатка и др. Продолжались работы по испытанию камней в лабораториях в Москве, Ленинграде, Киеве, Новочеркасске, Иркутске, Ташкенте, Тбилиси.

После Великой Отечественной войны необходимость удешевления строительства в целом негативно сказалась на объемах применения штучного естественного камня и состоянии добывающей его промышленности. Новые карьеры за это время не открывались, а многие старые оказались исчерпанными. Кроме того, часть карьеров, дававших ранее штучный камень, была переведена на добычу щебня и бута с широким применением взрывчатых веществ, из-за чего получить крупноблочный штучный камень там стало невозможно. К 1970-м гг. оказались утерянными старые кадры камнеобработчиков, а оборудование на фабриках и заводах устарело как морально, так и физически [40, с. 8].

Исследованиями свойств известняка в Ленинграде с конца 1980-х гг. занимались профессор кафедры минералогии СПбГУ А. Г. Буллах, сотрудники АО «Институт по реставрации памятников истории и культуры “Спецпроектреставрация”» Л. С. Харьюзов, А. И. Савченок [9].

*Для вновь возводимых конструкций* параметры ступеней из природного камня в настоящее время регламентируются следующими документами:

– физико-механические характеристики — ГОСТ 9479—2011 [41];

– геометрические характеристики — ГОСТ 23342—2012 [42];

– дополнительные требования при реставрации — ГОСТ Р 59437—2021 [43].

По ГОСТ 9479—2011 минимальная прочность плотного известняка при сжатии (временное сопротивление сжатию в сухом виде) для изготовления ступеней составляет 25 МПа.

*Для существующих конструкций* имеются методы как *лабораторного (разрушающего)*, так и *полевого (неразрушающего)* определения физико-механических свойств.

К первой группе относятся методы определения предела прочности при сжатии по ГОСТ 21153.2—84 [44], ГОСТ 30629—2011 [45], растяжении по ГОСТ 21153.3—85 [46], изгибе по ГОСТ 21153.6—75 [47], ГОСТ 30629—2011 [45]. Данные методы — наиболее точные, но, как упоминалось ранее, является разрушающими, поэтому должны применяться ограниченно.

В качестве полевых возможно применение сейсмоакустических и ультразвуковых методов [48, с. 61; 49; 50; 51].

Для предварительных поверочных расчетов, в случае, если удается достоверно атрибутировать тип использованного природного камня, *допустимо использование результатов испытаний, проведенных для данного типа камня ранее* (табл. 4).

В дореволюционной практике плотный известняк для строительных конструкций делился на

Таблица 4. Показатели прочности известняка на сжатие по результатам испытаний

| Наименование камня | Временное сопротивление сжатию | Источник |
|---|---|---|
| Источники до середины XX в. | | |
| Гатчинский известняк | 118 пуд./кв. дюйм (29,4 МПа) | [10, с. 19] |
| Гатчинский известняк (Черницкая каменоломня) | 398 пуд./кв. дюйм (99,1 МПа) | [7, с. 41] |
| Путиловский известняк | 937 кгс/см$^2$ (91,9 МПа) | [8, с. 45, 66]* [26, с. 89]* |
| Волховский известняк | 1068 кгс/см$^2$ (104,7 МПа) | |
| Тосненский известняк | 900 кгс/см$^2$ (88,2 МПа) | |
| Современные источники | | |
| Путиловская плита (карьер Путилово) | 30–200 МПа | [9, с. 29] |
| Тосненская плита (гертовские ломки, пласты «белый», «серый», «желтый») | 220 МПа | |
| Волховская плита (обуховские ломки) | 30–160 МПа | |
| Путиловский известняк | до 129 МПа | [52] |
| Волховский известняк (Сельцо Бабино) | 30–100 МПа | |
| Гатчинские доломиты (Елизаветинское, Врудское, Парицкое, Каменные Борницы (Борисовское) | 90–170 МПа | |

Примечания:

* По результатам испытаний механической лаборатории Петербургского института инженеров путей сообщения для постройки Троицкого моста в Санкт-Петербурге.

1. Для перехода от временного сопротивления сжатию из табл. 4 к другим характеристикам см. табл. 2 настоящей статьи и приложение 2 ГОСТ 21153.8—88 [28].

2. При назначении прочностных характеристик камня ступеней необходимо учитывать, что источники приводят спектр прочностных характеристик в большом диапазоне, в то время как камень для ступеней бескосоурных висячих лестниц при постройке отбирался наилучшего качества.

3 сорта с применением градации немецкой комиссии Баушингера, Функа и Хартига (табл. 3) [4, с. 534; 8, с. 64; 23, с. 184].

Основной испытательной лабораторией поставляемого камня для строительства, как упоминалось ранее, являлась лаборатория Института инженеров путей сообщения. К сожалению, результаты испытаний известняка в этой лаборатории опубликованы не были [39], но часть из них попала в пособия Н. Н. Лямина [8, с. 45, 66] и М. П. Субботина [26, с. 89].

Результаты более поздних испытаний физико-механических свойств природных камней для ступеней приведены в источниках последних десятилетий [9, с. 29; 52].

Данные по прочности плотных известняков, указанные у Л. И. Онищика [14, с. 18], для расчетов петербургских лестниц малоприменимы, так как отсылают к зарубежным испытаниям и не содержат информации о месторождении камня.

## Характерные дефекты

Опыт обследования висячих каменных лестниц в Санкт-Петербурге показывает, что большинство из них успешно эксплуатируется на длительном временном промежутке (на текущий момент подавляющее большинство сохранившихся образцов имеет возраст более 100 лет).

К типовым дефектам, не относящимся к механической безопасности, можно отнести потерю адгезии штукатурки к камню ступеней снизу с последующим ее обрушением (рис. 7, 8). Проведенные исследования деформаций показывает очень небольшие теоретические значения вертикальных перемещений ступеней под эксплуатационной нагрузкой [27, 35], поэтому данный тип дефекта с большей


**Рис. 14.** Излом двух нижних ступеней марша от локальной перегрузки в Здании театрального декорационного зала и экипажного заведения, Б. Подъяческая, д. 20:
*а* — трещины в растянутой зоне, истирание и сколы ступеней;
*б* — расстыковка ступеней, ступени плоские, без припазовки
(автор: А. Гончаровский, 2021; фото предоставлено для использования в данной статье)

**Рис. 15.** Лестница в звоннице Морского Никольского собора в Кронштадте до реставрации. Обрушение маршей (фото выполнено авторами, 2009)

**Рис. 16.** Обрушение известняковых ступеней при пожаре. Лестница по косоурам постройки 1850-х гг. в Санкт-Петербурге (фото выполнено авторами, 2022)

вероятностью обусловлен дефектами штукатурки (нарушением технологии нанесения, температурно-влажностного режима, неправильно выбранным раствором или слишком большим слоем намета), нежели чем подвижностью ступеней.

К типовым дефектам, свидетельствующим о повышении рисков в отношении механической безопасности, относятся поперечные трещины в месте заделки ступеней в стены и их расстыковка (рис. 14). В таких случаях ступени могут фактически повиснуть на ограждении. Основной причиной данных дефектов являются резкие локальные перегрузки при эксплуатации (падение тяжелых предметов). При обнаружении подобных дефектов даже в одной ступени весь марш надлежит признать аварийным из-за опасности лавинообразного обрушения. Далее необходимо провести комплекс противоаварийных работ с последующим восстановлением марша. Случаи обрушения марша целиком фиксируются как при нарушении режима эксплуатации, так и при пожарах (рис. 15, 16).

К сожалению, авторам неизвестны случаи восстановления висячих каменных лестниц после обрушения маршей без введения новых косоуров. При этом изменяется оригинальная схема работы конструкций лестницы, теряется первоначальный архитектурный облик. *При принятии проектных решений по восстановлению марша необходимо учитывать более чем вековой опыт успешной эксплуатации большинства подобных лестниц без применения каких-либо косоуров.* Действующий ГОСТ Р 59437—2021 требует, чтобы внедрение новых стальных элементов было обоснованно [43, п. 5.8].

При восстановлении ступеней необходимо применять природный камень, добытый по возможности из того же месторождения. В случае отсутствия такой возможности требуется подобрать камень, наиболее близкий к воссоздаваемому по внешнему виду и физико-механическим свойствам [43, п. 4.11].

*При проектировании приспособления или реконструкции здания необходимо стремиться к сохранению функции существующей лестницы*, что, при отсутствии вышеупомянутых опасных механических дефектов ступеней, будет являться основанием для ее сохранения.

## Заключение

Бескосоурные висячие каменные лестницы являются уникальными объектами строительного искусства прошлого и требуют от инженера бережного и вдумчивого отношения.

Визуальные обследования технического состояния рассматриваемого типа лестниц необходимо вести с фокусом на вышеприведенные характерные дефекты. Для точного атрибутирования вида камня целесообразно привлечение специалистов в области петрографии.

Инструментальное обследование необходимо вести преимущественно неразрушающими методами. Подобные работы эффективно осуществлять совместно со специалистами в области геофизики. Использование неразрушающих средств измерения, широко распространенных в строительстве (ультразвуковые дефектоскопы и склерометры) для определения прочности материала ступеней требуют отдельного изучения.

Приведенные выше методы расчета могут быть использованы как при обследовании технического состояния, так и при проектировании.

По нашей оценке, применение бескосоурных конструктивных решений лестниц при восстановлении дефектных маршей и отдельных ступеней является возможным. При этом в процессе проектирования необходимо тщательно подойти к разработке всего цикла повторного возведения марша, включая технологию производства работ.

## Список источников

1. Плужников А. В. Термины российского архитектурного наследия / А. В. Плужников. — М.: Искусство, 1995. — 160 с.

2. Price S. Stone cantilevered staircases / S. Price, H. Rogers // IStructE — The Structural Engineer. — January 2005. — Iss. 83(2). — Pp. 29–36.

3. Палладио А. Четыре книги об архитектуре. В коих, после краткого трактата о пяти ордерах и наставлений наиболее необходимых для строительства, трактуется о частных домах, дорогах, мостах, площадях, ксистах и храмах / А. Палладио; пер. И. В. Жолтовского // Первая книга об архитектуре Андреа Палладио, 2-е стереотипное изд. — М.: Изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1938. — С. 74.

4. Залесский В. Г. Архитектура. Краткий курс построения частей зданий, читанный в Императорском московском техническом училище адъюнкт-профессором В. Г. Залесским, с дополнением популярного изложения способов поверочного расчета и определения размеров конструкций / В. Г. Залесский. — М.: Типо-литография Т-ва И. Н. Кушнерев и Ко, 1904. — 582 с.

5. Стаценко В. П. Части зданий. (Гражданская архитектура). — Изд. 4-е, испр. и доп. — СПб.: Типография Штаба Отд. Корп. погр. стражи, 1912. — 516 с.

6. Стаценко В. П. Части зданий. Гражданская архитектура. — Изд. 7-е (2-е посм.), доп. и испр. / В. П. Стаценко. — М.-Л.: Государственное издательство, 1930. — 656 с.

7. Радивановский В. И. Строительные материалы / В. И. Радивановский. — Вып. 1. Естественные камни. — СПб.: Типография А. С. Суворина, 1890. — 64 с.

8. Лямин Н. Н. Естественные каменные строительные материалы / Н. Н. Лямин. — Вып. I. — СПб.: Типография П. П. Сойкина, 1911. — 74 с.

9. Харьюзов Л. С. Путиловский камень (плитчатый известняк) как объект реставрации в памятниках архитектуры: учеб. пособие / Л. С. Харьюзов, А. Г. Булах, А. И. Савченок; науч. ред. А. Г. Булах. — СПб.: Изд. С.-Петерб. ун-та, 2012. — 52 с.

10. Иллюстрированное Урочное положение. Полный текст по исправленному экземпляру с пояснительными рисунками, справочными сведениями, расчетами, практическими указаниями и банковскими расценками на строительные работы. Пособие при составлении смет, проектировании и исполнении работ. Около 800 рис. в тексте / Сост. Н. И. де-Рошефор. — Изд. 6-е, испр. — Петроград: Склад издания у К. Л. Риккера, 1916. — 694 с.

11. Федоров П. А. Лестницы каменные, металлические и деревянные. Практическое руководство по постройке различных лестниц для строителей, техников, домовладельцев, десятников и т. п. С 49 рис. — Изд. 2-е, значительно доп. — СПб.: Книгоиздательство А. Ф. Сухова, 1912. — 38 с.

12. Строительная индустрия. Справочное руководство по гражданскому и промышленному строительству. В 16 томах / Gод общ. ред.: В. И. Вельман (гл. ред.) [и др.]. — Т. VII. Части зданий. Ч. 2 / Под ред. инж. Н. С. Дюрнбаум, при участии инж. Л. И. Онищика. — М.-Л. : Госстройиздат, 1933. — 663 с.

13. Серк Л. А. Курс архитектуры. Гражданские и промышленные здания. Т. 1. Конструктивные схемы и элементы гражданского строительства / Л. А. Серк. — М.-Л.: Госстройиздат, 1938. — 440 с.

14. Онищик Л. И. Каменные конструкции промышленных и гражданских зданий / Л. И. Онищик. — М.-Л.: Стройиздат, 1939. — 308 с.

15. Розенблюмас А. М. Каменные конструкции / А. М. Розенблюмас. — М.: Высшая школа, 1964. — 302 с.

16. СП 15.13330.2020 «СНиП II-22-81* Каменные и армокаменные конструкции». — М.: Минстрой России, 2020.

17. Поляков С. В. Каменная кладка из пильных известняков / С. В. Поляков, Ю. В. Измайлов, В. И. Коноводченко, Ф. М. Оруджев и др. — Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1973. — 344 с.

18. ГОСТ Р 55567—2013. Порядок организации и ведения инженерно-технических исследований на объектах культурного наследия. Памятники истории и культуры. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2014.

19. Красовский А. К. Гражданская архитектура. Части зданий / А. К. Красовский // Соч. Аполлинария Красовского. — СПб.: Типография Военно-Учебных Заведений, 1851. — 597 с.

20. Красовский А. К. Гражданская архитектура. Части зданий / А. К. Красовский // Соч. Аполлинария Красовского. — Изд. 2-е. — М.: Типография А. А. Левенсон, 1886. — 443 с.

21. Романович М. Е. Гражданская архитектура. Части зданий. В 4 томах. Т. 2 / Сост. М. Е. Романович. — Изд. 4-е. — СПб.: Типография Евгения Тиле, 1903. — 520 с.

22. Карташов Ю. М. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов, Б. В. Матвеев, Г. В. Михеев, А. Б. Фадеев. — М.: Недра, 1979. — 269 с.

23. Каркашадзе Г. Г. Механическое разрушение горных пород.: учеб. пособие для вузов. — М.: Изд-во МГГУ, 2004. — 222 с.

24. Лахтин Н. К. Расчет арок и сводов. Руководство к аналитическому и графическому расчету арочных и сводчатых перекрытий. С 290 черт. в тексте и 8 таблицами / Н. К. Лахтин. — М.: Типо-литография Т-ва И. Н. Кушнерев и Ко, 1911. — 468 с.

25. Мушкетов И. В. Краткий курс петрографии для студентов Института инженеров путей сообщения Императора Александра I / И. В. Мушкетов // Сборник Института инженеров путей сообщения Императора Александра I. Вып. XXX. Труды преподавателей и материалы для институтских курсов. С 112-ю политипажами в тексте. — СПб.: Типография Ю. Н. Эрлих, 1895. — 202 с.

26. Субботин М. П. Строительное камневедение: (технология естественных строительных камней): с приложением Геологии строительного камня геолога Л. Е. Наливайко / М. П. Субботин. — Харьков; Киев: Государственное научно-техническое издательство Украины, 1935. — 272 с.

27. Little Ph. Stone cantilever stairs — inspection and analysis of cantilever stairs / Ph. Little, M. Hough, E. Mullarkey // IStructE — The Structural Engineer. — April 2009. — Iss. 87(8). — Pp. 26–33.

28. ГОСТ 21153.8—88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. — М.: Издательство стандартов, 1986.

29. Hume I. Cantilever or hanging stone stairs / I. Hume // IHBC. — Context. — September 1997. — Iss. 55. — Pp. 24–26.

30. Maunder E. A. W. Staircases as cantilevers or arches? — a question for limit analysis / E. A. W. Maunder // SAHC — London: Taylor & Francis Group, 2015. — Pp. 569–575.

31. Heyman J. The mechanics of masonry stairs / J. Heyman // Structural studies of historical buildings. Vol. 2. Dynamics, Repairs and Restoration. — Southampton: Computational Mechanics Publ., 1995. — Pp. 259–265.

32. O'Dwyer D. Assessing the probability of material failure in cantilevered stone stairs / D. O'Dwyer, A. O'Connor, O. Bashorun // Proceedings of the 7th International Probabilistic Workshop. — Delft, 2009. — Pp. 239–249.

33. Sajtos I. Cantilevered staircase: Influence of building technology on the behavior / I. Sajtos // SAHC — Anamnesis, diagnosis, therapy, controls — London: Taylor & Francis Group, 2016. — Pp. 1254–1261.

34. Angelillo M. The Equilibrium of Helical Stairs Made of Monolithic Steps / M. Angelillo // International Journal of Architectural Heritage. November 2015. — Iss. 10(6). — Pp. 675–687. — DOI: 10.1080/15583058.2014.988773.

35. Rigo B. Discrete element analysis of stone cantilever stairs / B. Rigo, K. Bagi // Meccanica. — May 2018. — Iss. 53. — Pp. 1571–1589. — DOI: 10.1007/s11012-017-0739-5.

36. D'Altri M. Structural behavior of stone cantilever stairs: Strain monitoring under controlled loading and numerical modeling / M. D'Altri, Y. Jin, J. Chen, T. Agyarko et al. // Journal of Building Engineering. — 2024. — Iss. 95. — DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110238.

37. Кабанцев О. В. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния / О. В. Кабанцев // Вестник ТГАСУ. — 2015. — № 4. — С. 113–134.

38. Дрейер А. И. Разрушение каменных строительных материалов в городских постройках в г. Петрограде / А. И. Дрейер // Материалы для изучения естественных производительных сил России, издаваемые Комиссией при Российской академии наук. Каменные строительные материалы. Сборник 1-й. — Петроград: Гос. учебно-практ. школа-тип. им. тов. Алексеева, 1923. — С. 91–105.

39. Белянкин Д. С. Материалы по микроскопическому исследованию гранитов и др. изверженных пород, испытанных в Механической лаборатории Инст. инж. пут. сообщ. в период времени с 1896 по 1912 г. / Д. С. Белянкин // Материалы для изучения естественных производительных сил России, издаваемые Комиссией при Российской академии наук. Каменные строительные материалы. Сборник 1-й. — Петроград: Гос. учебно-практ. школа-тип. им. тов. Алексеева, 1923. — С. 106–145.

40. Беликов Б. П. Природные каменные облицовочные материалы (методы их оценки, изучения и ресурсы) / Б. П. Беликов, М. Б. Григорович, В. П. Петров, С. П. Шоблов // Серия «Неметаллические полезные ископаемые». Т. 4. — М.: ВИНИТИ, 1975. — 123 с.

41. ГОСТ 9479—2011. Блоки из горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строитель-

ных, мемориальных и других изделий. Технические условия (EN 1467:2003, NEQ). — М.: Стандартинформ, 2012.

42. ГОСТ 23342—2012. Изделия архитектурно-строительные из природного камня. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2014.

43. ГОСТ Р 59437—2021. Сохранение памятников каменного зодчества. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2021.

44. ГОСТ 21153.2—84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. — М.: Издательство стандартов, 1984.

45. ГОСТ 30629—2011. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2012.

46. ГОСТ 21153.3—85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. — М.: Издательство стандартов, 1986.

47. ГОСТ 21153.6—75. Породы горные. Метод определения предела прочности при изгибе. — М., 1981.

48. Грязнов Т. А. Оценка показателей свойств пород полевыми методами / Т. А. Грязнов. — М.: Недра, 1984. — 197 с.

49. Шибаев И. А. Определение упругих свойств осадочных горных пород на примере образцов известняка с помощью лазерной ультразвуковой диагностики / И. А. Шибаев, В. А. Винников, Г. Д. Степанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 11. — С. 68–75. — DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134.

50. Галунин А. А. Оценка зависимости динамических модулей упругости от пористости образцов известняка методом импульсной диагностики / А. А. Галунин, А. А. Гапеев, В. Поспичал // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 4-1. — С. 98–107. — DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_98.

51. Осипов Ю. В. Современные способы определения деформационных свойств горных пород / Ю. В. Осипов, А. Е. Кошелев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 7. — С. 125–134. — DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75.

52. Приложение к приказу Минстроя РФ №1056/пр от 31.07.2017. Сборник № 4. Реставрация и воссоздание конструкций и декора из естественного камня. Приложение 3.

Дата поступления: 05.04.2025
Решение о публикации: 15.05.2025

**Контактная информация:**
ВЕБЕР Михаил Давидович — ведущий инженер-конструктор; mischaweber@mail.ru
КУЗНЕЦОВ Анатолий Всеволодович — канд. техн. наук, декан факультета «Промышленное и гражданского строительства»; akuznetsov@pgups.ru

## On Restoring Cantilever Stone Staircases in the Architecture of St. Petersburg. Part 1

**M. D. Veber[1], A. V. Kuznetsov[2]**

[1]Inforsproekt LLC, 19, Leninskaya Sloboda str., Moscow, 115280, Russian Federation
[2]Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Veber M. D., Kuznetsov A. V. On Restoring Cantilever Stone Staircases in the Architecture of St. Petersburg. Part 1. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 509–530. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-509-530

## Summary

**Purpose:** To provide a comprehensive overview of the available tools for structural inspection of cantilever stone staircases. **Materials and methods:** Extensive archival research has been conducted. A thorough analysis and comparison of previously conducted scientific and practical research in this field has been carried out. **Results:** All the necessary information has been collected for the purpose of performing a structural analysis of existing structures. The recommendations have been given considering the experience in design, construction and maintenance of the objects of research. Further research aspects have been formulated. **Practical significance:** The research will provide civil engineers with a tool to facilitate the preservation of valuable historical structures. This is particularly relevant in cases where the restoration and maintenance of the original design is currently complicated.

**Keywords:** Stone structures, cantilever staircases, hanging staircases, inspection, reconstruction, restoration.

## References

1. Pluzhnikov A. V. *Terminy rossiyskogo arkhitekturnogo naslediya* [Terms of Russian architectural heritage]. Mocow: Iskusstvo Publ., 1995, 160 p. (In Russian)

2. Price S., Rogers H. Stone cantilevered staircases. IStructE — The Structural Engineer. January 2005, Iss. 83(2), pp. 29–36.

3. Palladio A. Chetyre knigi ob arkhitekture. V koikh, posle kratkogo traktata o pyati orderakh i nastavleniy naibolee neobkhodimykh dlya stroitel'stva, traktuetsya o chastnykh domakh, dorogakh, mostakh, ploshchadyakh, ksistakh i khramakh; per. I. V. Zholtovskogo [Four books on architecture. In which, after a short treatise on the five orders and instructions most necessary for construction, are treated of private houses, roads, bridges, squares, xysts and temples]. *Pervaya kniga ob arkhitekture Andrea Palladio, 2-e stereotipnoe izd.* [The first book on the architecture of Andrea Palladio, 2nd stereotyped ed.]. Moscow: Izd-vo Vsesoyuznoy akademii arkhitektury Publ., 1938, p. 74. (In Russian)

4. Zalesskiy V. G. *Arkhitektura. Kratkiy kurs postroeniya chastey zdaniy, chitannyy v Imperatorskom moskovskom tekhnicheskom uchilishche ad"yunkt-professorom V. G. Zalesskim, s dopolneniem populyarnogo izlozheniya sposobov poverochnogo rascheta i opredeleniya razmerov konstruktsiy* [Architecture. A short course in constructing parts of buildings, read at the Imperial Moscow Technical School by associate professor V. G. Zalessky, with the addition of a popular presentation of methods for checking calculations and determining the dimensions of structures]. Moscow: Tipo-litografiya T-va I. N. Kushnerev i Ko Publ., 1904, 582 p. (In Russian)

5. Statsenko V. P. *Chasti zdaniy. (Grazhdanskaya arkhitektura). Izd. 4-e, ispr. i dop.* [Parts of buildings. (Civil architecture). Publ. 4th, corrected. and add]. St. Petersburg: Tipografiya Shtaba Otd. Korp. pogr. strazhi Publ., 1912, 516 p. (In Russian)

6. Statsenko V. P. *Chasti zdaniy. Grazhdanskaya arkhitektura. Izd. 7-e (2-e posm.), dop. i ispr.* [Parts of buildings. Civil architecture. Publ. 7th (2nd see), add. and corrected]. M.-L.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo Publ., 1930, 656 p. (In Russian)

7. Radivanovskiy V. I. *Stroitel'nye materialy. Vyp. 1. Estestvennye kamni* [Construction Materials. Issue 1. Natural Stones]. St. Petersburg: Tipografiya A. S. Suvorina Publ., 1890, 64 p. (In Russian)

8. Lyamin N. N. *Estestvennye kamennye stroitel'nye materialy. Vyp. I* [Natural Stone Construction Materials. Issue I]. St. Petersburg: Tipografiya P. P. Soykina Publ., 1911, 74 p. (In Russian)

9. Khar'yuzov L. S., Bulakh A. G., Savchenok A. I.; nauch. red. A. G. *BulakhPutilovskiy kamen' (plitchatyy izvestnyak) kak ob"ekt restavratsii v pamyatnikakh arkhitektury: ucheb. posobie* [Putilovsky Stone (Slabby Limestone) as an Object of Restoration in Architectural Monuments: textbook]. St. Petersburg: Izd. gos. S.-Peterb. un-ta Publ., 2012, 52 p. (In Russian)

10. *Illyustrirovannoe Urochnoe polozhenie. Polnyy tekst po ispravlennomu ekzemplyaru s poyasnitel'nymi risunkami,*

*spravochnymi svedeniyami, raschetami, prakticheskimi ukazaniyami i bankovskimi rastsenkami na stroitel'nye raboty. Posobie pri sostavlenii smet, proektirovanii i ispolnenii rabot. Okolo 800 ris. v tekste. Cost. N. I. de-Roshefor. Izd. 6-e, ispr.* [Illustrated Lesson Regulations. Full text according to the corrected copy with explanatory drawings, reference information, calculations, practical instructions and bank rates for construction work. Manual for drawing up estimates, designing and executing work. About 800 figs. in the text. Comp. N. I. de Rochefort. 6th ed., corrected]. Petrograd: Sklad izdaniya u K. L. Rikkera Publ., 1916, 694 p. (In Russian)

11. Fedorov P. A. *Lestnitsy kamennye, metallicheskie i derevyannye. Prakticheskoe rukovodstvo po postroyke razlichnykh lestnits dlya stroiteley, tekhnikov, domovladel'tsev, desyatnikov i t. p. S 49 ris. Izd. 2-e, znachitel'no dop.* [Stone, metal and wooden stairs. A practical guide to the construction of various ladders for builders, technicians, homeowners, foremen, etc. With 49 figs. 2nd edition, significantly expanded]. St. Petersburg: Knigoizdatel'stvo A. F. Sukhova Publ., 1912, 38 p. (In Russian)

12. *Stroitel'naya industriya. Spravochnoe rukovodstvo po grazhdanskomu i promyshlennomu stroitel'stvu. V 16 tomakh. God obshch. red.: V. I. Vel'man (gl. red.) [i dr.]. T. VII. Chasti zdaniy. Ch. 2. Pod red. inzh. N. S. Dyurnbaum, pri uchastii inzh. L. I. Onishchika* [The construction industry. A reference guide to civil and industrial construction. In 16 volumes. Year of general editorship: V. I. Velman (editor-in-chief) [and others]. — Vol. VII. Parts of buildings. Part 2. Ed. by engineer N. S. Durnbaum, with the participation of engineer L. I. Onishchik]. M.-L.: Gosstroyizdat Publ., 1933, 663 p. (In Russian)

13. Serk L. A. *Kurs arkhitektury. Grazhdanskie i promyshlennye zdaniya. T. 1. Konstruktivnye skhemy i elementy grazhdanskogo stroitel'stva* [Course in architecture. Civil and industrial buildings. T. 1. Structural schemes and elements of civil engineering]. M.-L.: Gosstroyizdat Publ., 1938, 440 p. (In Russian)

14. Onishchik L. I. *Kamennye konstruktsii promyshlennykh i grazhdanskikh zdaniy* [Stone structures of industrial and civil buildings]. M.-L.: Stroyizdat Publ., 1939, 308 p. (In Russian)

15. Rozenblyumas A. M. *Kamennye konstruktsii* [Stone structures]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1964, 302 p. (In Russian)

16. *SP 15.13330.2020 "SNiP II-22-81* Kamennye i armokamennye konstruktsii"* [SP 15.13330.2020 "SNiP II-22-81* Stone and reinforced stone structures"]. Moscow: Minstroy Rossii Publ., 2020. (In Russian)

17. Polyakov S. V., Izmaylov Yu. V., Konovodchenko V. I., Orudzhev F. M. et al. *Kamennaya kladka iz pil'nykh izvestnyakov* [Masonry from sawn limestones]. Kishinev: Kartya Moldovenyaske Publ., 1973, 344 p. (In Russian)

18. *GOST R 55567—2013. Poryadok organizatsii i vedeniya inzhenerno-tekhnicheskikh issledovaniy na ob'ektakh kul'turnogo naslediya. Pamyatniki istorii i kul'tury. Obshchie trebovaniya* [GOST R 55567—2013. Procedure for organizing and conducting engineering and technical research at cultural heritage sites. Historical and cultural monuments. General requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian)

19. Krasovskiy A. K. Grazhdanskaya arkhitektura. Chasti zdaniy [Civil architecture. Parts of buildings]. *Soch. Apollinariya Krasovskogo* [Works of Apollinaris Krasovsky]. St. Petersburg: Tipografiya Voenno-Uchebnykh Zavedeniy Publ., 1851, 597 p. (In Russian)

20. Krasovskiy A. K. Grazhdanskaya arkhitektura. Chasti zdaniy [Civil architecture. Parts of buildings]. *Soch. Apollinariya Krasovskogo, Izd. 2-e* [Op. Apollinary Krasovsky. Ed. 2nd]. Moscow: Tipografiya A. A. Levenson Publ., 1886, 443 p. (In Russian)

21. Romanovich M. E. *Grazhdanskaya arkhitektura. Chasti zdaniy. V 4 tomakh. T. 2. Sost. M. E. Romanovich. Izd. 4-e* [Civil architecture. Parts of buildings. In 4 volumes. Vol. 2. Comp. M. E. Romanovich. Ed. 4th]. St. Petersburg: Tipografiya Evgeniya Tile Publ., 1903, 520 p. (In Russian)

22. Kartashov Yu. M., Matveev B. V., Mikheev G. V., Fadeev A. B. *Prochnost' i deformiruemost' gornykh porod* [Strength and deformability of rocks]. Moscow: Nedra Publ., 1979, 269 p. (In Russian)

23. Karkashadze G. G. *Mekhanicheskoe razrushenie gornykh porod.: ucheb. posobie dlya vuzov* [Mechanical

destruction of rocks: a textbook for universities]. Moscow: MGGU Publ., 2004, 222 p. (In Russian)

24. Lakhtin N. K. *Raschet arok i svodov. Rukovodstvo k analiticheskomu i graficheskomu raschetu arochnykh i svodchatykh perekrytiy. S 290 chert. v tekste i 8 tablitsami* [Calculation of arches and vaults. Guide to the analytical and graphical calculation of arched and vaulted ceilings. With 290 drawings in the text and 8 tables]. Moscow: Tipolitografiya T-va I. N. Kushnerev i Ko Publ., 1911, 468 p. (In Russian)

25. Mushketov I. V. Kratkiy kurs petrografii dlya studentov Instituta inzhenerov putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I [Brief course in petrography for students of the Institute of Railway Engineers of Emperor Alexander I]. *Sbornik Instituta inzhenerov putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I. Vyp. XXX. Trudy prepodavateley i materialy dlya institutskikh kursov. S 112-yu politipazhami v tekste* [Collection of the Institute of Railway Engineers of Emperor Alexander I. Issue XXX. Works of teachers and materials for institute courses. With 112 polytypes in the text]. St. Petersburg: Tipografiya Yu. N. Erlikh Publ., 1895, 202 p. (In Russian)

26. Subbotin M. P. *Stroitel'noe kamnevedenie: (tekhnologiya estestvennykh stroitel'nykh kamney): s prilozheniem Geologii stroitel'nogo kamnya geologa L. E. Nalivayko* [Construction stone science: (technology of natural building stones): with the appendix Geology of building stone by geologist L. E. Nalyvaiko]. Khar'kov; Kiev: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo Ukrainy Publ., 1935, 272 p. (In Russian)

27. Little Ph., Hough M., Mullarkey E. Stone cantilever stairs — inspection and analysis of cantilever stairs. IStructE — The Structural Engineer, April 2009, Iss. 87(8), pp. 26–33.

28. *GOST 21153.8—88. Porody gornye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri ob"emnom szhatii* [GOST 21153.8—88. Rocks. Method for determining the ultimate strength under volume compression]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1986. (In Russian)

29. Hume I. Cantilever or hanging stone stairs. IHBC. Context. September 1997, Iss. 55, pp. 24–26.

30. Maunder E. A. W. Staircases as cantilevers or arches? — a question for limit analysis. SAHC — London: Taylor & Francis Group, 2015, pp. 569–575.

31. Heyman J. The mechanics of masonry stairs. Structural studies of historical buildings, vol. 2. Dynamics, Repairs and Restoration. Southampton: Computational Mechanics Publ., 1995, pp. 259–265.

32. O'Dwyer D., O'Connor A., Bashorun O. Assessing the probability of material failure in cantilevered stone stairs. Proceedings of the 7th International Probabilistic Workshop. Delft, 2009, pp. 239–249.

33. Sajtos I. Cantilevered staircase: Influence of building technology on the behavior. SAHC — Anamnesis, diagnosis, therapy, controls — London: Taylor & Francis Group, 2016, pp. 1254–1261.

34. Angelillo M. The Equilibrium of Helical Stairs Made of Monolithic Steps. International Journal of Architectural Heritage. November 2015, Iss. 10(6), pp. 675–687. DOI: 10.1080/15583058.2014.988773.

35. Rigo B., Bagi K. Discrete element analysis of stone cantilever stairs. Meccanica, May 2018, Iss. 53, pp. 1571–1589. DOI: 10.1007/s11012-017-0739-5.

36. D'Altri M., Jin Y., Chen J., Agyarko T. et al. Structural behavior of stone cantilever stairs: Strain monitoring under controlled loading and numerical modeling. Journal of Building Engineering, 2024, Iss. 95. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110238.

37. Kabantsev O. V. Diskretnaya model' kamennoy kladki v usloviyakh dvukhosnogo napryazhennogo sostoyaniya [Discrete model of stone masonry under biaxial stress conditions]. *Vestnik TGASU* [Bulletin of TSUACE]. 2015, Iss. 4, pp. 113–134. (In Russian)

38. Dreyer A. I. Razrushenie kamennykh stroitel'nykh materialov v gorodskikh postroykakh v g. Petrograde [Destruction of stone building materials in urban buildings in Petrograd]. *Materialy dlya izucheniya estestvennykh proizvoditel'nykh sil Rossii, izdavaemye Komissiey pri Rossiyskoy akademii nauk. Kamennye stroitel'nye materialy. Sbornik 1-y* [Materials for the study of natural productive forces of Russia, published by the Commission under the Russian Academy of Sciences. Stone building materials.

Collection 1]. Petrograd: Gos. uchebno-prakt. shkola-tip. im. tov. Alekseeva Publ., 1923, pp. 91–105. (In Russian)

39. Belyankin D. S. Materialy po mikroskopicheskomu issledovaniyu granitov i dr. izverzhennykh porod, ispytannykh v Mekhanicheskoy laboratorii Inst. inzh. put. soobshch. v period vremeni s 1896 po 1912 g. [Materials on microscopic study of granites and other igneous rocks tested in the Mechanical Laboratory of the Inst. ing. put. communications. in the period from 1896 to 1912]. *Materialy dlya izucheniya estestvennykh proizvoditel'nykh sil Rossii, izdavaemye Komissiey pri Rossiyskoy akademii nauk. Kamennye stroitel'nye materialy. Sbornik 1-y* [Materials for the study of natural productive forces of Russia, published by the Commission under the Russian Academy of Sciences. Stone building materials. Collection 1]. Petrograd: Gos. uchebno-prakt. shkola-tip. im. tov. Alekseeva Publ., 1923, pp. 106–145. (In Russian)

40. Belikov B. P., Grigorovich M. B., Petrov V. P., Shoblov S. P. Prirodnye kamennye oblitsovochnye materialy (metody ikh otsenki, izucheniya i resursy) [Natural stone facing materials (methods of their assessment, study and resources)]. *Seriya "Nemetallicheskie poleznye iskopaemye"* [Series "Non-metallic useful minerals"]. Moscow: VINITI, 1975, vol. 4, 123 p. (In Russian)

41. *GOST 9479—2011. Bloki iz gornykh porod dlya proizvodstva oblitsovochnykh, arkhitekturno-stroitel'nykh, memorial'nykh i drugikh izdeliy. Tekhnicheskie usloviya (EN 1467:2003, NEQ)* [GOST 9479—2011. Blocks of rocks for the production of facing, architectural, construction, memorial and other products. Technical conditions (EN 1467:2003, NEQ)]. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian)

42. *GOST 23342—2012. Izdeliya arkhitekturno-stroitel'nye iz prirodnogo kamnya. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 23342—2012. Architectural and construction products made of natural stone. Technical conditions]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian)

43. *GOST R 59437—2021. Sokhranenie pamyatnikov kamennogo zodchestva. Obshchie trebovaniya* [GOST R 59437—2021. Preservation of stone architecture monuments. General requirements]. Moscow: Standartinform, 2021. (In Russian)

44. *GOST 21153.2—84. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii* [GOST 21153.2—84. Rocks. Methods for determining the ultimate strength under uniaxial compression]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1984. (In Russian)

45. *GOST 30629—2011. Materialy i izdeliya oblitsovochnye iz gornykh porod. Metody ispytaniy* [GOST 30629—2011. Facing materials and products made of rocks. Test methods]. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian)

46. *GOST 21153.3—85. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom rastyazhenii* [GOST 21153.3—85. Rocks. Methods for Determining the Ultimate Strength in Uniaxial Tensile Strength]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1986. (In Russian)

47. *GOST 21153.6—75. Porody gornye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri izgibe* [GOST 21153.6—75. Rocks. Method for Determining the Ultimate Strength in Bending]. Moscow, 1981. (In Russian)

48. Gryaznov T. A. *Otsenka pokazateley svoystv porod polevymi metodami* [Evaluation of Rock Property Indicators by Field Methods]. Moscow: Nedra Publ., 1984, 197 p. (In Russian)

49. Shibaev I. A., Vinnikov V. A., Stepanov G. D. Opredelenie uprugikh svoystv osadochnykh gornykh porod na primere obraztsov izvestnyaka s pomoshch'yu lazernoy ul'trazvukovoy diagnostiki [Determination of Elastic Properties of Sedimentary Rocks Using Limestone Samples Using Laser Ultrasonic Diagnostics]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2017, Iss. 11, pp. 68–75. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134. (In Russian)

50. Galunin A. A., Gapeev A. A., Pospichal V. Otsenka zavisimosti dinamicheskikh moduley uprugosti ot poristosti obraztsov izvestnyaka metodom impul'snoy diagnostiki [Evaluation of the dependence of dynamic elastic moduli on the porosity of limestone samples using the pulse diagnostics method]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2017, Iss. 4-1, pp. 98–107. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_98. (In Russian)

51. Osipov Yu. V., Koshelev A. E. Sovremennye sposoby opredeleniya deformatsionnykh svoystv gornykh porod [Modern methods for determining the deformation properties of rocks]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2020, Iss. 7, pp. 125–134. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75. (In Russian)

52. *Prilozhenie k prikazu Minstroya RF №1056/pr ot 31.07.2017. Sbornik № 4. Restavratsiya i vossozdanie konstruktsiy i dekora iz estestvennogo kamnya. Prilozhenie 3* [Appendix to the order of the Ministry of Construction of the Russian Federation No. 1056/pr dated July 31, 2017. Collection No. 4. Restoration and recreation of structures and decor made of natural stone. Appendix 3]. (In Russian)

Received: April 05, 2025
Accepted: May 15, 2025

**Author's information:**
Mikhail D. VEBER — Senior Structural Engineer; mischaweber@mail.ru
Anatoly V. KUZNETSOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Building Structures, Buildings and Structures; akuznetsov@pgups.ru

УДК 624.21

# Анализ работы главной балки пролетного строения из стальных тонкостенных профилей на пешеходную нагрузку

**С. В. Чижов, Н. А. Соловьев, Ю. В. Авдей**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Чижов С. В.*, *Соловьев Н. А.*, *Авдей Ю. В.* Анализ работы главной балки пролетного строения из стальных тонкостенных профилей на пешеходную нагрузку // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 531–544. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-531-544

## Аннотация

**Цель:** Рассмотреть возможность применения стальных тонкостенных холодногнутых профилей в мостовых конструкциях. Произвести аналитический обзор существующих подходов к расчету тонкостенных конструкций в отечественных и зарубежных нормативных документах. Выполнить анализ прочностных и деформационных характеристик разработанной конструкции. Рассмотреть вопрос о необходимости корректировки общепринятой методики расчета и требований нормативных документов. Обосновать целесообразность применения конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей в мостостроении. **Методы:** Использованы математическое и конечно-элементное моделирование, методы строительной механики, метод конструктивно-технологического проектирования. **Результаты:** Предложена конструкция пролетного строения с главными балками из стальных холодногнутых тонкостенных профилей, выполнен анализ напряженно-деформированного состояния. Расчеты показали достаточную несущую способность и жесткость конструкции на действие пешеходной нагрузки в качестве временной. Выявлены недостатки существующей методики расчета тонкостенных стержней и пробелы в нормативной базе. **Практическая значимость:** Обозначена необходимость в пересмотре требований нормативных документов по проектированию и расчету мостовых конструкций, корректировке общепринятой методики расчета конструкций из холодногнутых стальных тонкостенных профилей и ее адаптация к расчету мостовых конструкций для возможности их использования.

**Ключевые слова:** Холодногнутый стальной тонкостенный профиль, ЛСТК, теория Власова, теория закритической несущей способности, коробление, местная устойчивость, пешеходный путепровод, металлический мост.

## Введение

Стальные тонкостенные холодногнутые профили нашли широкое применение в области строительства зданий жилого, промышленного и сельскохозяйственного назначения. Их применение в несущих конструкциях является одним из главных направлений эффективного строительства, поскольку позволяет получать конструкции наименьшей массы при сохранении необходимой жесткости [1, 2]. Однако до сих пор не разработаны конструктивные решения по их применению в несущих конструкциях мостовых сооружений [3]. Вышедший свод правил (СП) 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов» [4], устанавливающий правила проектирования и методы расчета стальных тонкостенных конструкций из холодногнутых оцинкованных профилей, как и СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции.

Актуализированная редакция СНиП II-23—81*» [5, 6], не распространяет свое действие на мостовые сооружения. При проектировании мостовых конструкций, в том числе пешеходных путепроводов, необходимо руководствоваться СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» [7], в котором стальные тонкостенные холодногнутые профили открытого сечения отсутствуют в списке применяемых материалов, как и указания по их расчету [3]. Целью данной статьи является изучение прочностных и деформационных характеристик пролетного строения пешеходного путепровода из холодногнутых тонкостенных профилей для рассмотрения возможности их применения в составе мостовых конструкций.

**Основная часть**

К отличительным особенностям стальных тонкостенных холодногнутых профилей следует отнести их сложное поведение под внешней нагрузкой, в частности необходимо учитывать проблемы потери местной устойчивости стенок [8].

Существуют две основные теории расчета стальных тонкостенных холодногнутых профилей: теория тонкостенного стержня В. З. Власова [2] и теория закритической несущей способности, однако все заслуживающие внимания нормативные документы по расчету стальных тонкостенных профилей, такие как AISI S100—2007 [9], Eurocode EN 1993-1-3 [10] и отечественный СП 260.1325800.2016 [4], в своей основе содержат теорию закритической несущей способности. Данная теория является полуэмпирической, она основана на масштабных исследованиях и опыте применения тонкостенных конструкций. Если не предполагается проведение экспериментальных испытаний, для получения корректных показателей несущей способности необходимо вводить поправочные коэффициенты и строго соблюдать соотношения геометрических размеров профилей, приведенные в нормативных документах, для которых накоплен достаточный опыт [11].

В отличие от классических металлических конструкций, в конструкциях из холодногнутых профилей допускается потеря устойчивости в составных частях сечения и потеря устойчивости формы всего сечения. Это явление объясняется возможностью работы пластин, составляющих поперечное сечение, в закритической стадии [11, 12]. Впервые данная концепция была предложена Теодором фон Карманом [13]. Отдельные пластины, составляющие профиль, могут работать в закритической стадии с образованием локального выпучивания. Учет потери указанных форм устойчивости при определении несущей способности профилей производится путем исключения «неэффективных» участков.

При расчете рассматриваемого пролетного строения будем применять теорию закритической несущей способности и руководствоваться нормативным документом Eurocode EN 1993-1-3 [10] как первоисточником и СП 260.1325800.2016 [4], являющимся по своей сути переводом европейских норм.

Помимо более низкой ожидаемой металлоемкости, использование холодногнутых тонкостенных профилей в пролетном строении имеет следующие преимущества: быстрособираемость конструкции, отсутствие необходимости в тяжелой строительной технике и высококвалифицированной рабочей силе [14]. Конструкции из холодногнутых тонкостенных профилей являются конструкциями высокой степени заводской готовности. Они могут доставляться на объект в виде готового для сборки комплекта из нарезанных на нужную длину элементов с необходимыми отверстиями для соединений [15].

В качестве несущих элементов приняты холодногнутые С-образные профили открытого сечения с маркой стали С350 и цинковым покры-

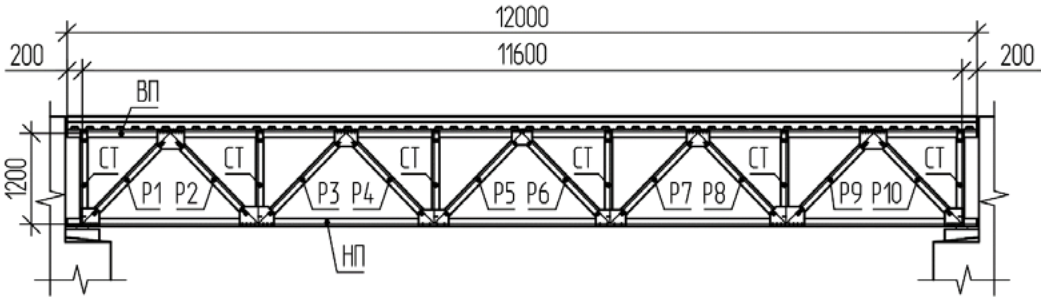



**Рис. 1.** Рассматриваемое пролетное строение

тием 600 г/м$^2$. Максимальную длину профилей из условий перевозки ограничиваем 12 м.

Из профилей составлено решетчатое пролетное строение с высотой 1/10 пролета из 5 панелей, угол наклона раскосов близкий к 45°. Наиболее рациональной работа данных профилей будет при действии внешней нагрузки вдоль оси симметрии, при которой минимизируются явления кручения. В нижнем поясе предусмотрены отверстия диаметром 50 мм во избежание мест скопления воды. Монтажные соединения приняты на нефрикционных болтовых соединениях размером М10 через фасонки.

Предложенное пролетное строение с учетом свесов в 200 мм позволяет перекрыть как двухпутную железную дорогу, так и автомобильную двухполосную (габарит Г-8) или четырехполосную при устройстве промежуточной опоры на разделительной полосе (габарит Г-(9,0+С+9,0)). Пролетное строение по фасаду показано на рис. 1, опоры нанесены схематично.

Плита перекрытия принята из монолитного железобетона с изготовлением на несъемной опалубке из профилированного листа НС35-1000-0,7. Рекомендации по проектированию монолитных железобетонных перекрытий со стальным профилированным настилом [16] и СТО 0047—2005 «Стандарт организации. Перекрытия сталежелезобетонные с монолитной плитой по стальному профилированному настилу. Расчет и проектирование» [17] разрешают использование профилированного настила в качестве внешней арматуры при коэффициенте асимметрии цикла $\rho < 0{,}7$. В нашем случае это условие не выполняется, следовательно, расчет профилированного настила ведем только на стадию укладки бетона, мероприятия по обеспечению сцепления профилированного листа с бетоном не выполняем. Предусматривается раскрепление верхнего сжатого пояса с профилированным настилом в узловых точках для уменьшения свободной длины.

В поперечном сечении пролетное строение состоит из трех главных балок с железобетонной плитой перекрытия на несъемной опалубке (рис. 2).

Расчет главной балки предложенного пролетного строения произведен по следующему алгоритму:

– назначение расчетной схемы;

– сбор нагрузок;

– определение КПУ;

– нахождение внутренних усилий;

– предварительное назначение размеров поперечных сечений отдельных элементов в виде тонкостенных С-образных профилей;

– определение «эффективных» геометрических характеристик поперечных сечений или геометрических характеристик полного сечения для элементов, характер работы которых носит растяжение и исключает образование участков со сжимающими напряжениями;

– учет отверстий и перерасчет геометрических характеристик;

– проверки по I и II группам предельных состояний.

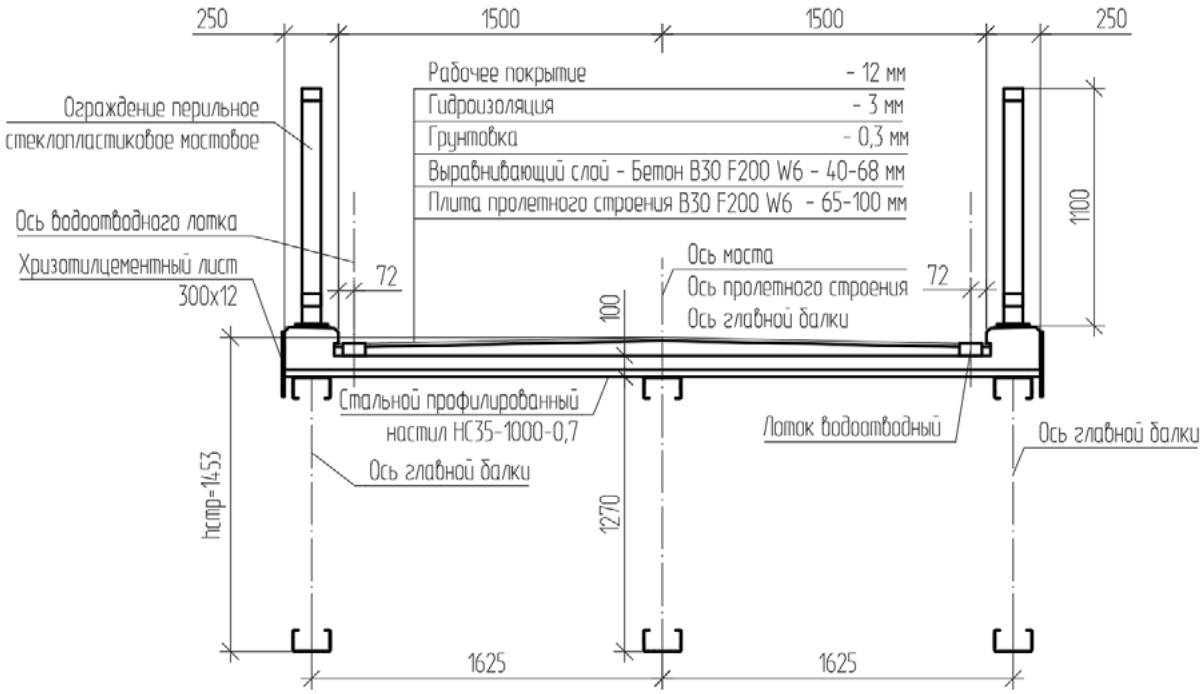



**Рис. 2.** Поперечное сечение пролетного строения

Был выполнен расчет наиболее нагруженной балки. Так как верхний пояс воспринимает усилия от плиты вне узлов, соединения стержней фермы приняты жесткими для учета распределения изгибающих моментов по элементам фермы. Усилия были найдены в программном комплексе Midas Civil 2006 и приведены в табл. 3.

После нахождения внутренних усилий были предварительно назначены размеры поперечных сечений стальных тонкостенных профилей, составляющих решетчатую главную балку, и затем определены их «эффективные» («редуцированные») характеристики. Минимальную толщину профилей ограничили 1,5 мм, максимальную 4 мм. Соотношения размеров профиля к его толщине ($b/t$, $h/t$, $c/t$) назначены в определенном диапазоне, представленном в Eurocode EN 1993-1-3 [10], для которого накоплен достаточный теоретический и экспериментальный опыт [11].

Процедура нахождения «редуцированной» («эффективной») площади поперечного сечения тонкостенного профиля заключается в декомпозиции исходного полного поперечного сечения на совокупность независимых пластин типа «стенки» и типа «полки» в зависимости от их закрепления. Отброшенные части заменяют шарнирными опорами, а также линейными пружинами и пружинами кручения в зависимости от типа закрепления в исходном сечении. Для С-образного профиля стенка будет иметь полное раскрепление, а полки с отгибами жесткости частичное [18].

Кроме типа закрепления отдельных пластинок, величину и положение «эффективных» участков определяют геометрические параметры, прочностные характеристики используемой стали, а также распределение напряжений по ширине рассматриваемой пластины. Также при расчете необходимо учитывать толщину защитного покрытия и исключать его из работы на внешнюю нагрузку [11, 19].

Расчеты производятся по срединной линии. Влияние углов изгиба учитывается путем введения поправочных коэффициентов к полученным

геометрическим характеристикам «редуцированного» сечения, вычисленным для сечения с прямыми углами [11]. Последовательность приведения исходного поперечного сечения С-образного профиля к расчетным моделям приведена на рис. 3.

Потеря устойчивости полки происходит совместно с отгибом, являющимся элементом жесткости. Помимо локального выпучивания каждого из элементов в системе из полки и отгиба, необходимо учитывать потерю устойчивости всей системы, описывающую потерю устойчивости формы исходного сечения. При определении «эффективных» участков полки отброшенная часть стенки заменяется на пружину кручения с жесткостью $C_\tau$. Затем, полагая действующие усилия на пластину равными пределу текучести стали $R_y$, определяются «эффективные» участи полки $b_{eff}$ и отгиба $c_{eff}$. После получения «эффективных» участков первоначальная расчетная схема с пружиной кручения заменяется модифицированной расчетной схемой с линейной пружиной жесткости $K$. Система, состоящая из участка стенки, примыкающей к отгибу, $b_{eff,2}$ и отгибу $c_{\text{eff}}$, рассматривается как стержень на упругом основании. Полученная расчетная схема описывает форму потери устойчивости в исходном сечении профиля [18]. Исходная и модифицированная расчетные схемы системы из полки и отгиба представлены на рис. 4.

Из полученных «эффективных» участков отдельных пластин составляется полное «редуцированное» поперечное сечение для нахождения геометрических характеристик всего сечения и выполнения дальнейших расчетов обычным способом [20, 18]. Полученное поперечное сечение моделирует реальную работу профиля путем удаления из поперечного сечения участков, теряющих местную устойчивость и выключающихся из работы участков полного сечения [14].

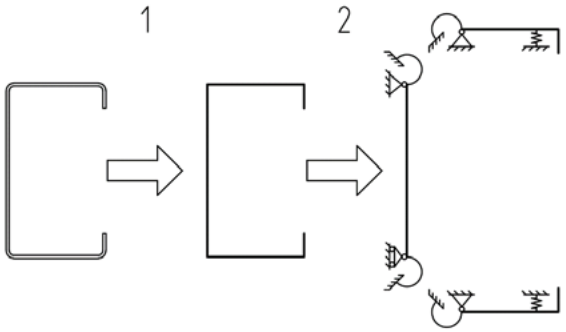



**Рис. 3.** Последовательность приведения исходного поперечного сечения к расчетным моделям С-образного профиля

Использованные поперечные сечения С-образных профилей, их основные геометрические характеристики до процедуры «редуцирования», после и за вычетом отверстий приведены в табл. 1 и 2. Для элементов, в которых не происходит образование участков со сжимающими напряжениями, процедура «редуцирования» не производилась.

Проверки по прочности были произведены в пяти сечениях по длине каждого элемента решетчатой фермы. Также были учтены дополни-

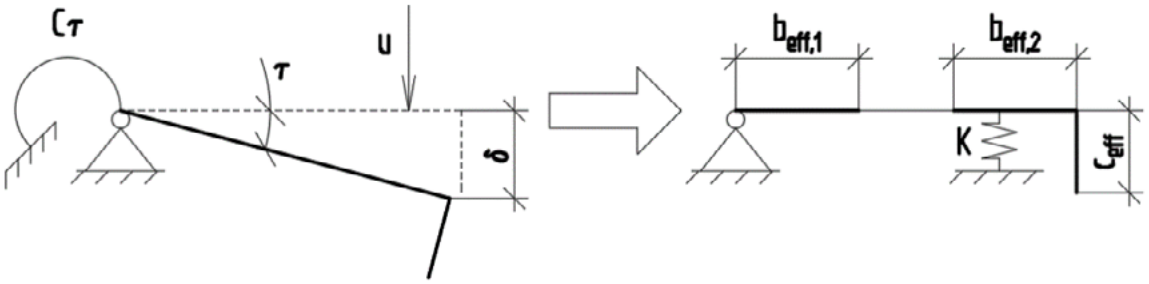



**Рис. 4.** Исходная и модифицированная расчетные схемы системы из полки и отгиба

Таблица 1. Поперечные сечения использованных профилей

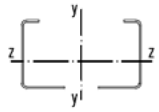
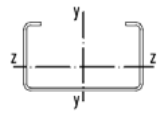
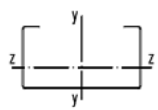
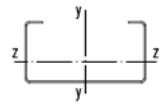
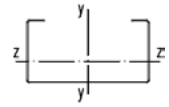
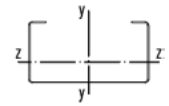
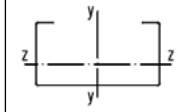
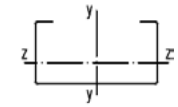
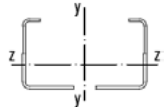
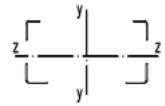
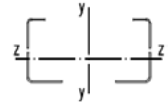
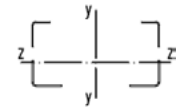
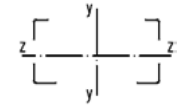
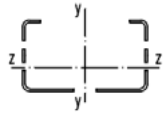
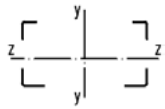
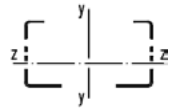
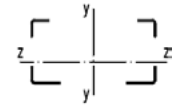
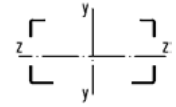
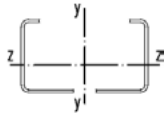
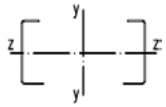
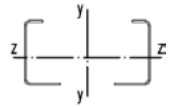
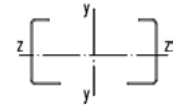
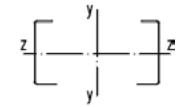
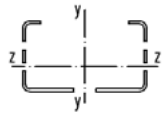
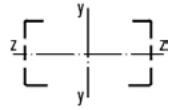
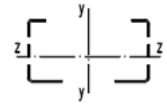
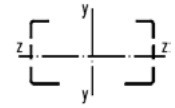
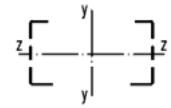
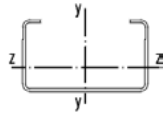
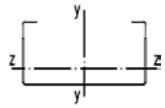
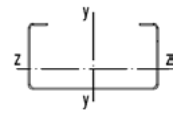
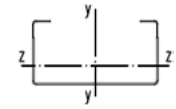
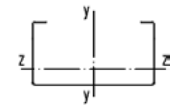
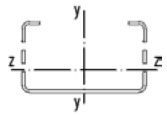
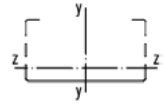
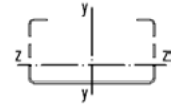
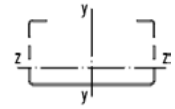
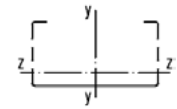
| | Нижний пояс (175×100×25×3) | Верхний пояс (175×100×25×4) | Стойки (175×90×25×1,5) | Раскосы Р1, Р10 (175×90×25×2,5) | Раскосы Р2, Р9 (175×90×25×1,5) | Раскосы Р3, Р8 (175×90×25×2) | Раскосы Р4, Р7 (175×90×25×1,5) | Раскосы Р5, Р6 (175×90×25×1,5) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Исходное поперечное сечение |  |  |  |  |  |  |  |  |
| «Эффективное» поперечное сечение при сжатии | — |  |  |  | — |  | — |  |
| «Эффективное» поперечное сечение при сжатии с учетом отверстий под болты | — |  |  |  | — |  | — |  |
| «Эффективное» поперечное сечение при изгибе (сжатая стенка) | |  |  |  | — |  | — |  |
| «Эффективное» поперечное сечение при изгибе (сжатая стенка) с учетом отверстий под болты | — |  |  |  | — |  | — |  |
| «Эффективное» поперечное сечение при изгибе (сжатые отгибы) | — |  |  |  | — |  | — |  |
| «Эффективное» поперечное сечение при изгибе (сжатые отгибы) с учетом отверстий под болты | — |  |  |  | — |  | — |  |

Таблица 2. Основные геометрические характеристики использованных профилей

| Характер работы | Геометрические характеристики | Нижний пояс | Верхний пояс | Стойки | Раскосы Р1, Р10 | Раскосы Р2, Р9 | Раскосы Р3, Р8 | Раскосы Р4, Р7 | Раскосы Р5, Р6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Геометрические характеристики исходного поперечного сечения | Площадь $A_{br}$, мм$^2$: | 1028 | 1547 | 557 | 933 | 557 | 747 | 557 | 557 |
| | Момент инерции отн-но оси $Z$ $I_z$, мм$^4$: | 1 420 514 | 2 050 481 | 654 184 | 1 059 178 | 654 184 | 862 480 | 654 184 | 654 184 |
| | Момент инерции отн-но оси $Y$ $I_y$, мм$^4$: | 5 924 493 | 7 719 650 | 2 830 941 | 4 660 744 | 2 830 941 | 3 763 301 | 2 830 941 | 2 830 941 |
| | Радиус инерции отн-но оси $Z$ $i_z$, мм: | 37,17 | 36,40 | 34,26 | 33,69 | 34,26 | 33,98 | 34,26 | 34,26 |
| | Радиус инерции отн-но оси $Y$ $i_y$, мм: | 75,91 | 70,63 | 71,27 | 70,67 | 71,27 | 70,97 | 71,27 | 71,27 |
| | Момент сопр. отн-но оси $Z$ $W_z$, мм$^3$ | 23 569 | 31 479 | 11 088 | 17 919 | 11 088 | 14 605 | 11 088 | 11 088 |
| | Момент сопр. отн-но оси $Y$ $W_y$, мм$^3$ | 67 741 | 88 267 | 32 369 | 53 292 | 32 369 | 43 030 | 32 369 | 32 369 |
| | Момент инерции при свободном сечении $I_t$, мм$^4$ | 3410 | 8181 | 377 | 1855 | 377 | 929 | 377 | 377 |
| | Секториальный момент инерции сечения $I_w$, мм$^6$ | 10 200 197 995 | 12 624 469 222 | 4 353 485 940 | 6 843 558 360 | 4 353 485 940 | 5 656 393 227 | 4 353 485 940 | 4 353 485 940 |
| | Расстояние от центра изгиба до ц. т. $z_0$, мм | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Расстояние от центра изгиба до ц. т. $y_0$, мм | 82,15 | 81,00 | 74,71 | 73,57 | 74,71 | 74,14 | 74,71 | 74,71 |
| | Расстояние от ц. т. до полки $z_{gc}$, мм | 86,00 | 85,50 | 86,75 | 86,25 | 86,75 | 86,50 | 86,75 | 86,75 |
| | Расстояние от ц. т. до стенки $y_{gc}$, мм | 33,82 | 33,33 | 30,39 | 29,91 | 30,39 | 30,15 | 30,39 | 30,39 |
| «Эфф.» геом. хар-ки поп. сеч-я при сжатии | «Эффективная» площадь $A_{eff}$, мм$^2$: | 1028 | 1341 | 278 | 639 | 557 | 422 | 557 | 278 |
| | Расстояние от ц. т. до полки $z_{eff,gc}$, мм | 86,00 | 85,50 | 86,75 | 86,25 | 86,75 | 86,50 | 86,75 | 86,75 |
| | Расстояние от ц. т. до стенки $y_{eff,gc}$, мм | 34,55 | 33,36 | 38,00 | 32,14 | 38,00 | 32,01 | 38,00 | 38,00 |
| «Эфф.» геом. хар-ки поп. сеч-я при сжатии с учетом отверстий под болты | Момент сопр. отн-но оси $Z$ $W_z$, мм$^3$ | 22 136 | 24 588 | 7311 | 11 770 | 10 219 | 8214 | 10 219 | 7311 |
| | Момент сопр. отн-но оси $Y$ $W_Y$, мм$^3$ | 55 908 | 67 288 | 18 742 | 34 943 | 26 525 | 23 412 | 26 525 | 18 742 |

Окончание табл. 2

| Характер работы | Геометрические характеристики | Нижний пояс | Верхний пояс | Стойки | Раскосы Р1, Р10 | Раскосы Р2, Р9 | Раскосы Р3, Р8 | Раскосы Р4, Р7 | Раскосы Р5, Р6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| «Эфф.» геом. хар-ки поп. сеч-я при изгибе (сжатая стенка) | Момент сопр. отн-но оси $Z$ $W_z$, мм$^3$ | 23 569 | 30 596 | 9593 | 16 556 | 11 088 | 13 123 | 11 088 | 9593 |
| | Момент сопр. отн-но оси $Y$ $W_y$, мм$^3$ | 67 741 | 88 151 | 30 417 | 52 273 | 32 369 | 41 516 | 32 369 | 30 417 |
| «Эфф.» геом. хар-ки поп. сеч-я при изгибе (сжатая стенка) с учетом отверстий под болты | Момент сопр. отн-но оси $Z$ $W_z$, мм$^3$ | 22 136 | 28 494 | 9168 | 15 524 | 10 219 | 12 413 | 10 219 | 9168 |
| | Момент сопр. отн-но оси $Y$ $W_y$, мм$^3$ | 55 908 | 72 441 | 24 572 | 42 412 | 26 525 | 33 651 | 26 525 | 24 572 |
| «Эфф.» геом. хар-ки поп. сеч-я при изгибе (сжатые отгибы) | Момент сопр. отн-но оси $Z$ $W_z$, мм$^3$ | 23 569 | 29 099 | 6145 | 15 101 | 11 088 | 11 254 | 11 088 | 6145 |
| | Момент сопр. отн-но оси $Y$ $W_y$, мм$^3$ | 67 741 | 85 581 | 27 033 | 49 965 | 32 369 | 39 170 | 32 369 | 27 033 |
| «Эфф.» геом. хар-ки поп. сеч-я при изгибе (сжатые отгибы) с учетом отверстий под болты | Момент сопр. отн-но оси $Z$ $W_z$, мм$^3$ | 22 136 | 26 598 | 5048 | 13 501 | 10 219 | 9928 | 10 219 | 5048 |
| | Момент сопр. отн-но оси $Y$ $W_y$, мм$^3$ | 55 908 | 69 871 | 21 188 | 40 129 | 26 525 | 31 319 | 26 525 | 21 188 |

Таблица 3. Результаты проверки поперечных сечений по прочности на расчетные усилия

| Элемент | Силовые факторы | | | | | | Дополнительные моменты | | Проверки по прочности | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $N$ min ($kN$) | $N$ max ($kN$) | $Q$ min ($kN$) | $Q$ max ($kN$) | $Mz$ min ($kN \cdot m$) | $Mz$ max ($kN \cdot m$) | $\Delta Mz\ e$ ($N$ min)($kN \cdot m$) | $\Delta Mz\ ec$ ($N$ max)($kN \cdot m$) | σ ($N$ min)($N/mm^2$) | σ ($N$ max)($N/mm^2$) | Σ ≤ [σ]($N$ min) | Σ ≤ [σ]($N$ max) | σ ($Mz$ min) ($N/mm^2$) | σ ($Mz$ max) ($N/mm^2$) | Σ ≤ [σ] ($Mz$ min) | Σ ≤ [ σ] ($Mz$ max) | σ ($N + M$ min) ($N/mm^2$) | σ ($N + M$ max) ($N/mm^2$) | Σ ≤ [σ] ($N + M$ min) | Σ ≤ [σ] ($N + M$ max) |
| Нижний пояс | 111,24 | 238,77 | –0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,09 | 0,34 | 0,73 | 125 | 269 | ДА | ДА | 2 | 4 | ДА | ДА | 142 | 304 | ДА | ДА |
| Верхний пояс | –229,25 | –106,77 | –10,29 | –4,25 | –1,76 | –0,71 | –0,47 | –0,22 | 196 | 91 | ДА | ДА | 71 | 29 | ДА | ДА | 287 | 129 | ДА | ДА |
| Стойки | –12,85 | –5,54 | 0,27 | 1,07 | –0,89 | –0,25 | –0,10 | –0,05 | 51 | 22 | ДА | ДА | 124 | 35 | ДА | ДА | 189 | 63 | ДА | ДА |
| Раскос Р1 | –123,8 | –57,64 | –0,34 | 0,1 | –0,24 | 0,02 | –0,18 | –0,08 | 230 | 107 | ДА | ДА | 20 | 2 | ДА | ДА | 266 | 116 | ДА | ДА |
| Раскос Р2 | 42,96 | 96,69 | –0,2 | 0,22 | –0,22 | 0,25 | 0,04 | 0,10 | 88 | 198 | ДА | ДА | 21 | 24 | ДА | ДА | 113 | 230 | ДА | ДА |
| Раскос Р3 | –71,91 | –28,27 | –0,2 | 0,23 | –0,21 | 0,25 | –0,07 | –0,03 | 207 | 81 | ДА | ДА | 26 | 30 | ДА | ДА | 241 | 115 | ДА | ДА |
| Раскос Р4 | 11,32 | 48,65 | –0,22 | 0,2 | –0,18 | 0,29 | 0,01 | 0,05 | 23 | 99 | ДА | ДА | 17 | 28 | ДА | ДА | 41 | 132 | ДА | ДА |
| Раскос Р5 | –27,05 | 6,96 | –0,22 | 0,21 | –0,18 | 0,28 | –0,22 | 0,06 | 106 | 12 | ДА | ДА | 25 | 25 | ДА | ДА | 162 | 42 | ДА | ДА |

Таблица 4. Результаты проверки поперечных сечений по потери устойчивости

| Элемент | Силовые факторы | Потеря устойчивости в форме продольного изгиба относительно оси наибольшей жесткости (оси $y$) | | Потеря устойчивости в форме продольного изгиба относительно оси наименьшей жесткости (оси $z$) | | Крутильная форма потери устойчивости | | Изгибно-крутильная форма потери устойчивости | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $N$ ($kN$) | $N_{cr,y,b,Rd}$, $kN$ | $\lvert N\rvert \le N_{cr,y,b,Rd}$ | $N_{cr,z,b,Rd}$, $kN$ | $\lvert N\rvert \le N_{cr,z,b,Rd}$ | $N_{cr,T,b,Rd}$, $kN$ | $\lvert N\rvert \le N_{cr,T,b,Rd}$ | $N_{cr,TF,b,Rd}$, $kN$ | $\lvert N\rvert \le N_{cr,TF,b,Rd}$ |
| Верхний пояс | –229,25 | 426,35 | ДА | 375,90 | ДА | 319,49 | ДА | 312,40 | ДА |
| Стойки | –12,85 | 88,74 | ДА | 77,02 | ДА | 76,24 | ДА | 75,04 | ДА |
| Раскос Р1 | –123,8 | 200,30 | ДА | 146,23 | ДА | 127,46 | ДА | 124,15 | ДА |
| Раскос Р3 | –71,91 | 132,33 | ДА | 96,61 | ДА | 90,96 | ДА | 88,81 | ДА |
| Раскос Р5 | –27,05 | 87,34 | ДА | 63,76 | ДА | 62,94 | ДА | 61,54 | ДА |

тельные изгибающие моменты, возникающие от смещения нейтральных осей поперечного сечения из-за искусственного удаления «неэффективных» участков [18, 19]. Результаты расчетов при проверке по прочности показали достаточность принятых сечений и приведены в табл. 3.

Далее была определена несущая способность по потери устойчивости для элементов, в которых возможно сжатие. Расчетная длина верхнего пояса принята равной расстоянию между узлами благодаря раскреплению в узловых точках, расчетные длины раскосов и стоек также приняты равными расстоянию между узловыми точками. Проверки производились по форме потери устойчивости относительно осей наибольшей и наименьшей жесткости, по крутильной и по изгибно-крутильной формам. Для нахождения коэффициента снижения несущей способности $\chi$ при расчетах были использованы кривые потери устойчивости в зависимости от условной гибкости $\lambda$ конкретного элемента [19] по соответствующей кривой потери устойчивости согласно нормативному документу Eurocode EN 1993-1-1 [21]. Результаты указанных проверок показали достаточность принятых сечений и приведены в табл. 4.

Расчет толщины фасонок был произведен по методике, предложенной в СП 35.13330.2011 [7] и показал необходимую толщину, равную 1,8 мм. Минимальная толщина фасонок для мостовых конструкций по СП 35.13330.2011 [7] ограничена 10 мм и является избыточной для рассматриваемой конструкции. Таким образом, толщину фасонки назначаем конструктивно величиной 4 мм, соответствующей максимальной толщине листа с цинковым покрытием.

Расчеты болтовых соединений выполнялись на срез и смятие. Размещение болтов в соединении было выполнено в соответствии с требованиями СП 260.1325800.2016 [4]. Результаты показали необходимость установки болтов класса прочности 5,8 в два ряда от 2 до 8 на каждую фасонку. Применение нефрикционных соединений объясняется невозможностью подготовки контактных поверхностей для установки высокопрочных болтов без повреждения защитного покрытия.

Прогиб главной балки от временной нагрузки составил 20 мм, что является меньше допускаемого прогиба величиной 26 мм и равного 1/400 пролета.

Масса рассмотренной конструкции с учетом соединений составила 417,5 кг. Для сравнения металлоемкости предложенной конструкции главной балки с традиционными решениями был выбран горячекатаный двутавр с параллельными гранями полок по ГОСТ Р 57837—2017 из стали той же прочности. Согласно произведенным расчетам для восприятия действующей нагрузки необходим двутавр профиля 40Б1. Общая масса двутавровой балки равна 679,2 кг. Снижение расхода стали составило 38,5 %.

**Выводы**

Можно судить о достаточной несущей способности и жесткости рассмотренной конструкции. Расчеты по I и II группе предельных состояний показали достаточность использованных сечений.

Снижение металлоемкости на 38,5 % в сравнении со сплошностенчатой главной балкой в виде горячекатаного двутавра, а также быстрособираемость конструкции, отсутствие необходимости в тяжелой строительной технике и высококвалифицированной рабочей силе, снижение затрат на фундаменты за счет уменьшения постоянной нагрузки говорят об экономической эффективности главной балки предложенной конструкции.

Был выявлен существенный недостаток общепринятой методики расчета тонкостенных холодногнутых профилей, а именно: при сложном напряженном состоянии для каждого силового фактора необходимо находить свое «редуцированное» сечение, что не может отражать реальную работу. Существует необходимость в проведении

численных экспериментов методом конечно-элементного проектирования путем задания профилей оболочечными элементами с различным шагом разбивки для корректировки методики по расчету холодногнутых тонкостенных профилей, изложенной в нормативных документах.

Требования к минимальным толщинам для стальных конструкций мостовых сооружений являются существенно завышенными для подобных конструкций. Для внедрения тонкостенных холодногнутых профилей в конструкциях пешеходных путепроводов необходим пересмотр требований нормативных документов и разработка методики расчета применительно к мостовым конструкциям. Учитывая сложность работы конструкций из стальных тонкостенных холодногнутых профилей на внешнюю нагрузку, целесообразна разработка ряда технико-конструктивных решений для перекрытия наиболее распространенных габаритов, что существенно снизит затраты на проектирование и поспособствует широкому использованию подобных конструкций в мостовом строительстве [15].

## Список источников

1. Тухарели В. Д., Строительство зданий с использованием легких металлический конструкций: учеб. пособие / В. Д. Тухарели, А. В. Тухарели, Т. Ф. Чередниченко. — Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2018. — 132 с.

2. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни / В. З. Власов. — М.: Физматгиз. — 1959. — 568 с.

3. Ватин Н. И. Большепролетные надземные пешеходные переходы из легкого холодногнутого стального профиля / Н. И. Ватин, А. С. Синельников // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2012. — № 1. — С. 47–52.

4. СП 260.1325800.2017. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов / Минстрой России. — М., 2017. — 124 с.

5. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23—81*. — М., 2017. — 140 с.

6. СНиП II-23—81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. — 96 с.

7. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*. — М., 2011. — 341 с.

8. Брудка Я. Легкие стальные конструкции. Изд. 2-е, доп. пер. с польск. / Я. Брудка, М. Лубиньски; под ред. С. С. Кармилова. — М.: Стройиздат, 1974. — 342 с.

9. AISI S100—2007. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. — 2007.

10. EN 1993-1-3. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1–3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN, 2005. — P. 93.

11. Семко В. А. Расчет несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3 / В. А. Семко. — Киев: Украинский Центр Стального Строительства (УЦСС), 2015. — 143 с.

12. Нехаев Г. А. Легкие металлические конструкции / Г. А. Нехаев — Тула: Издатель ООО «ПрофСтальПрокат», 2012. — 93 с.

13. Karman T. von. The Strength of Thin Plates in Compression / T. von. Karman, E. E. Sechler, L. H. Donnell // Transactions, Applied Mechanics Division. — 1932. — Pp. 53–57.

14. Рыбаков В. А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций / В. А. Рыбаков. — СПб.: СПбГПУ, 2015. — 207 с.

15. Соловьев Н. А. Методическое обоснование расчета холодногнутых стальных тонкостенных профилей в мостовых конструкциях на этапе проекта / Н. А. Соловьев, С. В. Чижов, Ю. В. Авдей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2024. — Т. 21. — Вып. 3. — С. 622–637.

16. Рекомендации по проектированию монолитных железобетонных перекрытий со стальным профилированным настилом / НИИЖБ, ЦНИИпромзданий. — М.: Стройиздат. — 1987. — 40 с.

17. СТО 0047—2005. Перекрытия сталежелезобетонные с монолитной плитой по стальному профилированному настилу. Расчет и проектирование. — М.: ЗАО ЦНИИПСК им. Мельникова, ЗАО «Хилти Дистрибьюшн Лтд». — 2005. — 64 с.

18. Косых П. А. Развитие методики расчета легких стальных тонкостенных профилей с произвольной формой перфорации на осевое сжатие: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / П. А. Косых. — Пермь.: ПНИПУ, 2018 — 171 с.

19. Уэй Э. Расчет элементов из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3 / Э. Уэй, М. Хэйвуд, Н. А. Беляев, С. И. Билык и др. — Киев: УЦСС, НПП Интерсервис, 2015 — 102 с.

20. Смирнов М. О. Прочность и устойчивость стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей с фактически редуцированным сечением: дисс. ... канд. техн. наук: 2.1.1 / М. О. Смирнов. — СПб.: СПбГАСУ, 2021. — 157 с.

21. EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, 2005. — P. 91.

Дата поступления: 10.04.2025
Решение о публикации: 29.04.2025

**Контактная информация:**
ЧИЖОВ Сергей Владимирович — канд. техн. наук; sergchizh@yandex.ru
СОЛОВЬЕВ Николай Андреевич — аспирант; nikolai_solovev@yahoo.com
АВДЕЙ Юлия Владимировна — канд. пед. наук, доцент; avdej_yuliya@yandex.ru

## The Performance of the Span Main Beam Made of Thin-Walled Steel Sections Subjected to Pedestrian Load

**S. V. Chizhov, N. A. Solovev, Yu. V. Avdey**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Chizhov S. V., Solovev N. A., Avdey Yu. V. The Performance of the Span Main Beam Made of Thin-Walled Steel Sections Subjected to Pedestrian Load // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 531–544. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-531-544

### Summary

**Purpose:** To investigate the potential application of cold-formed thin-walled steel sections in bridge construction. To review the existing calculation methods for thin-walled structures in national and international regulatory documents. To analyse the strength and deformation characteristics of the designed structure. To consider the possibility of adjusting the generally accepted calculation methodology and regulatory requirements. To provide substantiated evidence regarding the feasibility of using cold-formed thin-walled sections in the construction of bridges. **Methods:** Mathematical and finite element modelling, methods of structural mechanics, and the structural engineering design method were used. **Results:** The design of the bridge span structure, with the main beams made of cold-formed thin-walled steel sections, has been proposed, and the stress-strain state analysis has been performed. The calculations have demonstrated that the structure is capable of supporting pedestrian traffic loads without compromising its load-bearing capacity or rigidity. The research has shown that the current calculation method for thin-walled rods and the regulatory framework itself are both flawed.

**Practical significance:** It is necessary to revise the requirements of regulatory documents on the design and calculation of bridge structures. The generally accepted methodology for calculating structures from cold-formed thin-walled steel sections also needs to be adjusted so that it can be used for the calculation of bridge structures.

**Keywords:** Cold-formed thin-walled steel profile, LTSS (Lightweight Thin-Walled Steel Structure), Vlasov theory, theory of supercritical bearing capacity, buckling, local stability, pedestrian overpass, metal bridge.

## References

1. Tukhareli V. D., Tukhareli A. V., Cherednichenko T. F. *Stroitel'stvo zdaniy s ispol'zovaniem legkikh metallicheskiy konstruktsiy: ucheb. posobie* [Construction of buildings using lightweight metal structures]. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet Publ., 2018, 132 p. (In Russian)

2. Vlasov V. Z. *Tonkostennye uprugie sterzhni* [Thin-walled elastic rods]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1959, 568 p. (In Russian)

3. Vatin N. I., Sinelnikov A. S. Bol'sheproletnye nadzemnye peshekhodnye perekhody iz legkogo kholodnognutogo stal'nogo profilya [Long span footway bridges: coldformed steel cross-section]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2012, Iss. 1, pp. 47–52. (In Russian)

4. *SP* 260.1325800.2017. Konstruktsii stal'nye tonkostennye iz kholodnognutykh otsinkovannykh profiley i gofrirovannykh listov [Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized profiles and corrugated sheets]. *Minstroy Rossii* [Ministry of Construction of Russia]. Moscow, 2017, 124 p. (In Russian)

5. *SP 16.13330.2017. Stal'nye konstruktsii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23—81** [*Steel structures. Updated version of SNiP (Construction rules and regulations) II-23—81**]. Moscow, 2017, 140 p. (In Russian)

6. *SNiP II-23—81**. Stal'nye konstruktsii [SNiP II-23—81*(Construction rules and regulations). Steel structures]. *Gosstroy SSSR* [Gosstroy of the USSR]. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR Publ., 1990, 96 p. (In Russian)

7. *SP 35.13330.2011. Mosty i truby. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.03—84** [Bridges and pipes. Updated version of SNiP (Construction rules and regulations) 2.05.03—84*]. Moscow, 2011, 341 p. (In Russian)

8. Brudka J., Lubinski M. *Legkie stal'nye konstrukcii* [*Light steel structures*]. Ed. 2nd, add. transl. from Polish. Under editorship of S. S. Karmilov. Moscow: Stroyizdat Publ., 1974, 342 p. (In Russian)

9. AISI S100—2007. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2007.

10. EN 1993-1-3. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1–3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN, 2005, p. 93.

11. Semko V. A. *Raschet nesushchikh i ograzhdayushchikh konstruktsiy iz stal'nykh kholodnoformovannykh profiley v sootvetstvii s Evrokodom 3* [Calculation of load-bearing and enclosing structures made of cold-formed steel profiles in accordance with Eurocode 3]. Kiev: Ukrainskiy Tsentr Stal'nogo Stroitel'stva (UTsSS) Publ., 2015, 143 p. (In Russian)

12. Nekhaev G. A. *Legkie metallicheskie konstrukcii* [Light metal structures]. Tula: Izdatel' OOO "ProfStal'Prokat" Publ., 2012, 93 p. (In Russian)

13. Karman T. von., Sechler E. E., Donnell L. H. The Strength of Thin Plates in Compression. Transactions, Applied Mechanics Division, 1932, pp. 53–57.

14. Rybakov V. A. *Osnovy stroitel'noy mekhaniki legkikh stal'nykh tonkostennykh konstruktsiy* [Fundamentals of structural mechanics of light steel thin-walled structures]. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2015, 207 p. (In Russian)

15. Solov'ev N. A., Chizhov S. V., Avdey Yu. V. Metodicheskoe obosnovanie rascheta kholodnognutykh stal'nykh tonkostennykh profiley v mostovykh konstruktsiyakh na etape proekta [Methodological substantiation of the calculation of cold-formed thin-walled steel sections in bridge structures at the design stage]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Railway

Engineering]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2024, vol. 21, Iss. 3, pp. 622–637.

16. *Rekomendatsii po proektirovaniyu monolitnykh zhelezobetonnykh perekrytiy so stal'nym profilirovannym nastilom. NIIZhB, TsNIIpromzdaniy* [Recommendations for the design of monolithic reinforced concrete floors with profiled steel decking. NIIZHB, TsNIIpromzdaniy]. 1987, 40 p. (In Russian)

17. *STO 0047—2005. Perekrytiya stalezhelezobetonnye s monolitnoy plitoy po stal'nomu profilirovannomu nastilu. Raschet i proektirovanie* [Reinforced concrete floors with monolithic slab on steel profiled sheeting. Calculation and design]. Moscow: ZAO TsNIIPSK im. Mel'nikova, ZAO "Khilti Distrib'yushn Ltd" Publ., 2005, 64 p. (In Russian)

18. Kosyh P. A. *Razvitie metodiki rascheta legkikh stal'nykh tonkostennykh profiley s proizvol'noy formoy perforatsii na osevoe szhatie: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01* [Development of the calculation methodology for light steel thin-walled sections with arbitrary perforation shape for axial compression: diss. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.23.01]. Perm': PNIPU Publ., 2018, 171 p. (In Russian)

19. Way A., Haywood M., Belyaev N. A., Bilyk S. I. et al. Raschet elementov iz stal'nykh kholodnoformovannykh profiley v sootvetstvii s Evrokodom 3 [Calculation of elements from cold-formed steel sections in accordance with Eurocode 3]. Kiev: USSS, NPP Interservice Publ., 2015, 102 p. (In Russian)

20. Smirnov M. O. *Prochnost' i ustoychivost' sterzhnevykh elementov konstruktsiy iz kholodnognutykh profiley s fakticheski redutsirovannym secheniem: diss. ... kand. tekhn. nauk: 2.1.1* [Strength and stability of rod elements of structures from cold-formed sections with a virtually reduced cross-section: diss. ... PhD in Engineering: 2.1.1]. St. Petersburg: SPbGASU Publ., 2021, 157 p. (In Russian)

21. EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, 2005, p. 91.

Received: April 10, 2025
Accepted: April 29, 2025

**Author's information:**
Sergey V. CHIZHOV — PhD in Engineering; sergchizh@yandex.ru
Nikolai A. SOLOVEV — Postgraduate Student; nikolai_solovev@yahoo.com
Yuliya V. AVDEY — PhD in Pedagogy, Associate Professor; avdej_yuliya@yandex.ru

УДК 654

# Исследование алгоритмов управления инцидентами и конфигурацией с применением имитационного моделирования

**А. О. Казарова, Э. В. Логин, Г. А. Машковцев**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Казарова А. О., Логин Э. В., Машковцев Г. А.* Исследование алгоритмов управления инцидентами и конфигурацией с применением имитационного моделирования // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 545–552. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-545-552

## Аннотация

**Цель:** Разработка имитационной модели управления инцидентами и конфигурацией телекоммуникационной сети (ТКС) с последующим сравнительным анализом различных сценариев функционирования. **Методы:** Разработка имитационной модели проводилась в программе AnyLogic, также использовался вероятностный подход для моделирования различных событий. **Результаты:** Разработано 3 сценария: работа двух алгоритмов вместе, работа алгоритма управления инцидентами, работа алгоритма управления конфигурацией. Выявлено, что комплексное применение алгоритмов обеспечивает наименьшее среднее время реализации цикла управления. Также исследовано влияние изменения вероятности *Pw* на поведение модели и эффективность работы алгоритмов. **Практическая значимость:** Разработанная модель может быть применена в реальных условиях при проектировании систем автоматизированного управления ТКС. Она позволяет прогнозировать эффективность работы различных подходов к управлению, оптимизировать процессы реагирования на инциденты, а также обосновать внедрение алгоритмов на объектах связи.

**Ключевые слова:** Имитационное моделирование, управление, инцидент, конфигурация, алгоритм, телекоммуникационная сеть, среда AnyLogic, модель, сценарий, вероятностный параметр.

## Введение

Телекоммуникационные сети (ТКС) являются неотъемлемой частью критически важных инфраструктур, обеспечивая устойчивую связь, передачу данных и координацию технологических процессов. Повышение уровня автоматизации и цифровизации предъявляет новые требования к управлению сетевыми инцидентами и конфигурацией оборудования. В условиях динамичной сетевой среды и высокой плотности трафика крайне важным становится минимизация времени восстановления системы при возникновении сбоя.

В данной работе рассматривается подход к моделированию процессов управления инцидентами и конфигурацией ТКС в среде AnyLogic. Построена имитационная модель, основанная на разработанных алгоритмах автоматического реагирования, и проведены эксперименты для оценки среднего времени восстановления системы в сценариях. Полученные результаты позволяют оценить эффективность применения отдельных и совместных алгоритмов, а также дают основу для обоснованного выбора оптимальной стратегии реагирования в условии инцидентов.

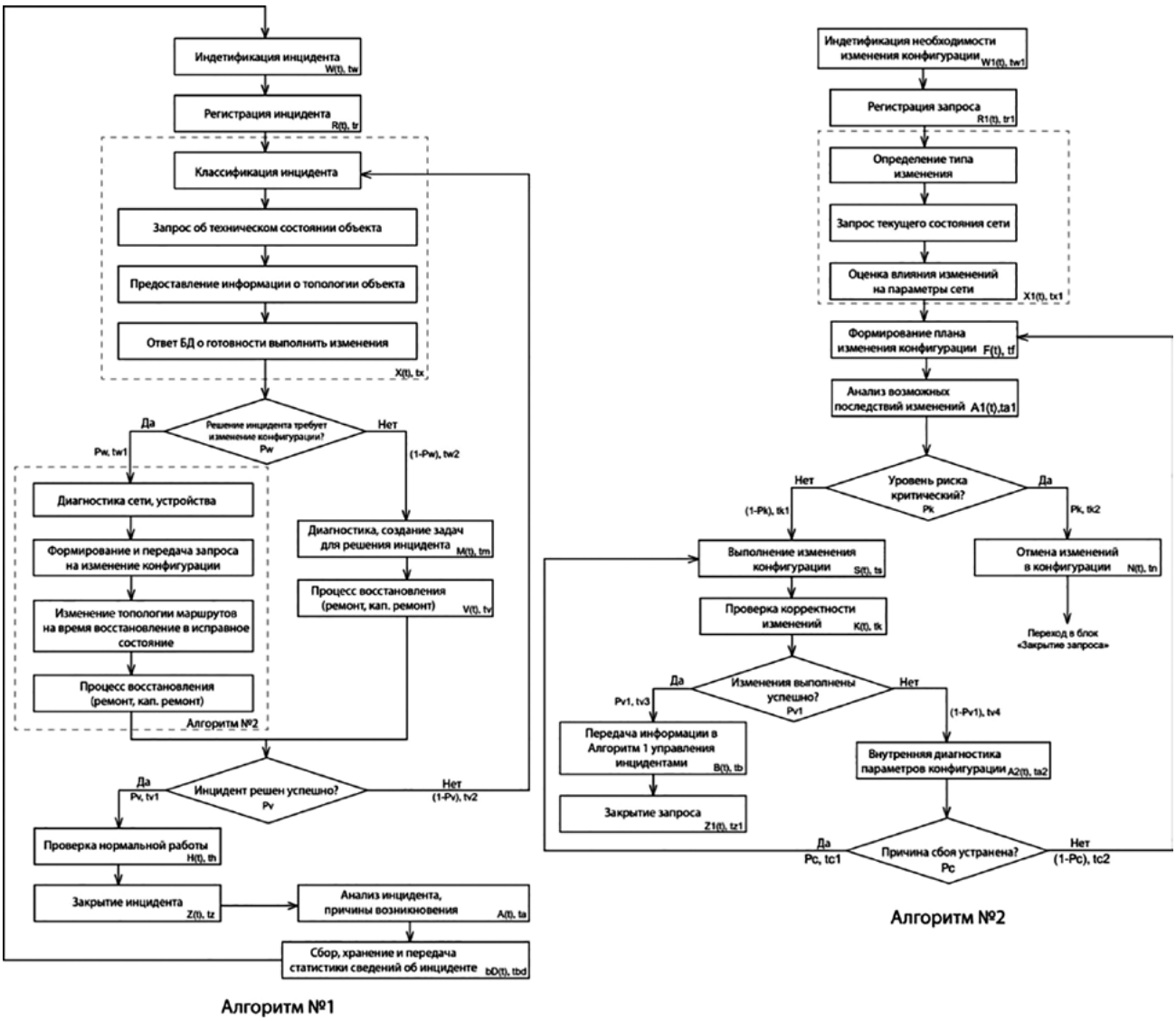



**Рис. 1.** Алгоритмы управления инцидентами (алгоритм 1) и управления конфигурацией (алгоритм 2)

## Основная часть

Процессы управления конфигурацией и инцидентами неразрывно связаны между собой. В большинстве случаев в системе сначала происходит сбой или нарушение — это регистрируется как инцидент. После анализа инцидента становится ясно, связано это с текущей конфигурацией сетевого элемента или нет, и только тогда можно принять решение: необходимо ли вносить изменения в конфигурацию или проблема в чем-то другом. Именно поэтому необходимы два алгоритма, поскольку работа одного вытекает из работы другого [1, 2].

Первый алгоритм — управление инцидентами (см. рис. 1, алгоритм 1). Он включает в себя обнаружение и регистрацию инцидента, анализ и режим восстановления. Второй алгоритм — управление конфигурацией (см. рис. 1, алгоритм 2), который активируется при возникновении сбоя, связанного с некорректной настройкой параметров конфигурации сетевого элемента и другими ошибками [1].

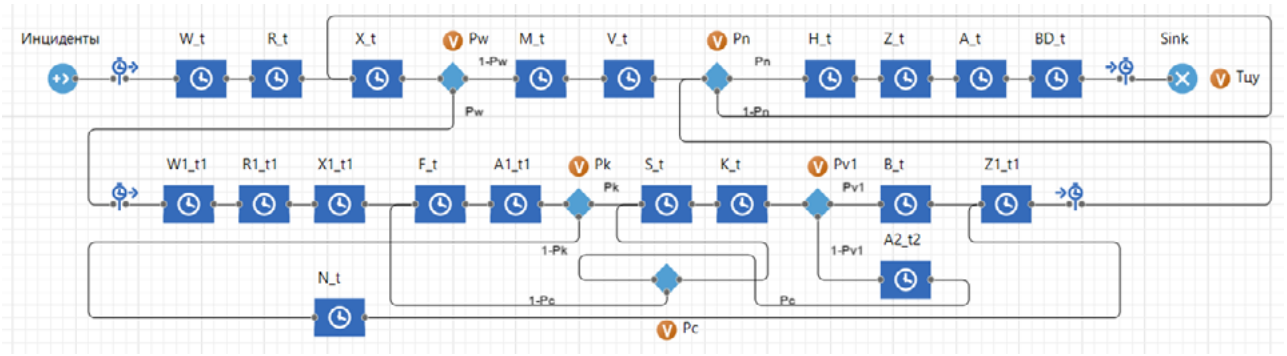



**Рис. 2.** Модель дискретно-событийной последовательности блоков, смоделированная по алгоритмам

Алгоритм управления инцидентами отвечает за то, чтобы быстро выявить и решить проблемы, когда они появляются. Когда в сети возникает сбой, будь то из-за оборудования, программного обеспечения или других множеств факторов, этот алгоритм реагирует, что позволяет минимизировать воздействие на сеть и ее пользователей [3]. Оперативное обнаружение проблемы, классификация ее по важности, нахождение причины и принятие мер по восстановлению — основа каждого решения инцидента для восстановления системы.

Алгоритм управления конфигурацией, в свою очередь, обеспечивает стабильность работы сети, контролируя настройки и параметры сетевых элементов, приборов сети. В отличие от алгоритма управления инцидентами, который фокусируется на решении уже возникших проблем, управление конфигурацией предотвращает их появление [1, 4].

Для моделирования процессов управления инцидентами и конфигурацией в среде AnyLogic будет использоваться метод дискретно-событийного моделирования. Данный метод позволяет отразить поведение системы как последовательность событий, происходящих в «реальном» времени. С его помощью можно смоделировать ключевые процессы, такие как: регистрация инцидентов, обработка изменений конфигурации и реагирование на сбои [5, 6, 7]. Для этого и были разработаны алгоритмы, где каждый блок представляет собой событие, которое происходит в определенный момент времени с заданной вероятностью выполнения.

При разработке модели временные параметры для каждого блока алгоритмов заданы условно. Они основаны на экспертных оценках и обобщенных сценариях работы телекоммуникационной сети [8]. Такой подход позволяет сфокусироваться на сравнительном анализе и логике функционирования системы, не прибегая к представлению детализированных таблиц с исходными данными.

После задания всех временных параметров задержек и установления вероятностных характеристик для каждого блока была реализована имитационная модель, охватывающая полный цикл функционирования двух ключевых алгоритмов: алгоритма управления инцидентами и алгоритма управления конфигурацией. Полная структура модели представлена на рис. 2.

В базовом эксперименте были установлены равные вероятности срабатывания условий для каждого из алгоритмов, что выражается через параметр $Pw = 0{,}5$. Это позволяет оценить поведение системы в сбалансированном режиме, при котором инциденты, требующие изменения конфигурации, и стандартные инциденты, не требующие вмешательства в параметры сети, поступают с одинаковой частотой. Такой подход обеспечивает объективное сравнение эффективности двух процессов реагирования [6].

Для количественной оценки эффективности модели была введена метрика $T_{цу}$ — среднее время реализации полного цикла управления. На рис. 3 представлена гистограмма распределения значений $T_{цу}$ для совместной работы двух алгоритмов. Гистограммы, отражающие распределение времени реализации отдельных алгоритмов, представлены на рис. 4 и 5 — для алгоритма управления инцидентами и алгоритма управления конфигурацией соответственно.

Анализ представленных гистограмм (рис. 3–5) позволяет сделать ряд значимых выводов о поведении и эффективности реализованной модели процессов управления в телекоммуникационной сети.

На рис. 3 показано распределение общего времени реализации процесса управления ($T_{цу}$) при совместной работе двух алгоритмов — управления инцидентами и управления конфигурацией. Среднее время составляет 57,48 минуты, что свидетельствует о высокой скорости восстановления системы в условиях комбинированного подхода. Большинство инцидентов решаются за короткий промежуток времени, что подтверждается плотным сгущением распределения в диапазоне до 50 минут [9].

Рис. 4 иллюстрирует время реализации алгоритма управления инцидентами, где среднее значение составляет 70,12 минуты. В данной ситуации наблюдается более широкое распределение времени, что обусловлено вариативностью сценариев реагирования на инциденты и степенью их сложности. Несмотря на это, совокупное распределение демонстрирует устойчивую тенденцию к завершению процесса в пределах 300 минут, что укладывается в допустимые нормативы реагирования [9].

На рис. 5 представлена гистограмма реализации алгоритма управления конфигурацией. Среднее значение составляет 21,5 минуты, что свидетельствует о высокой эффективности дан-

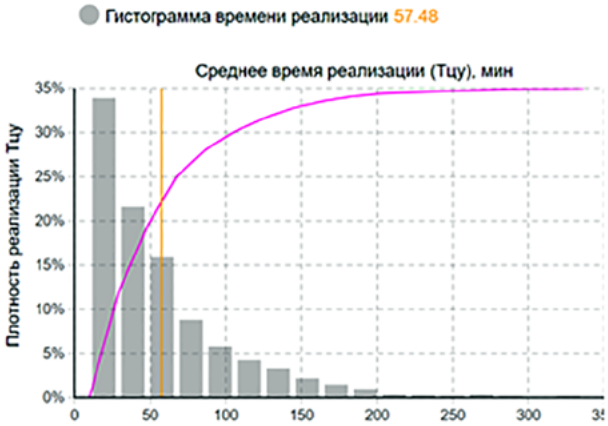



**Рис. 3.** Гистограмма общего времени реализации

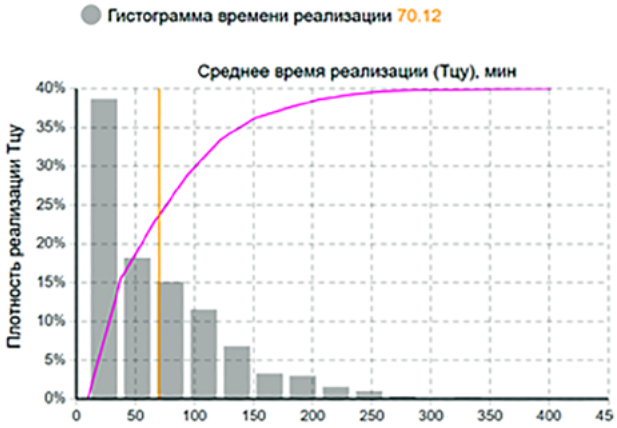



**Рис. 4.** Гистограмма времени реализации алгоритма управления инцидентами

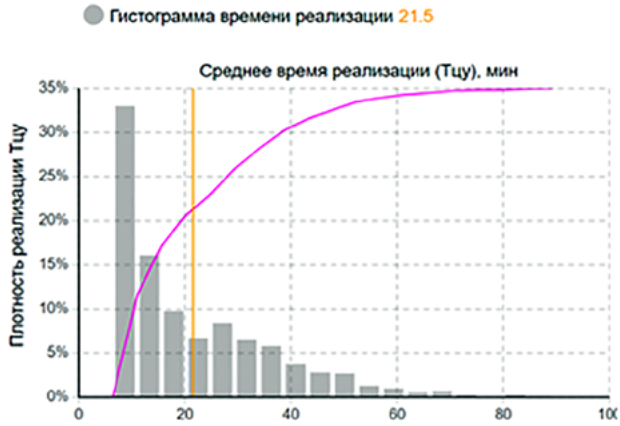



**Рис. 5.** Гистограмма времени реализации алгоритма управления конфигурацией

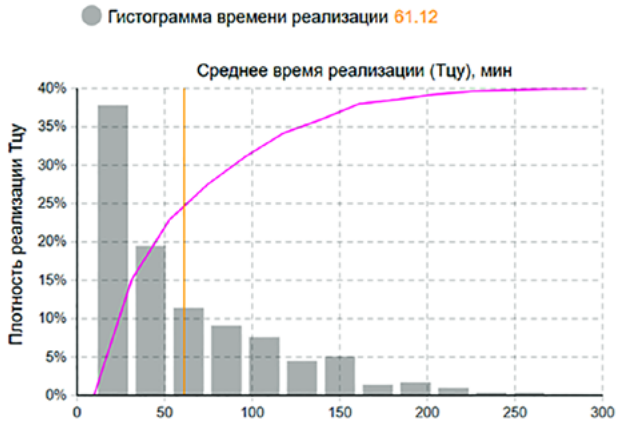



**Рис. 6.** Гистограмма общего времени реализации при $Pw = 0{,}3$

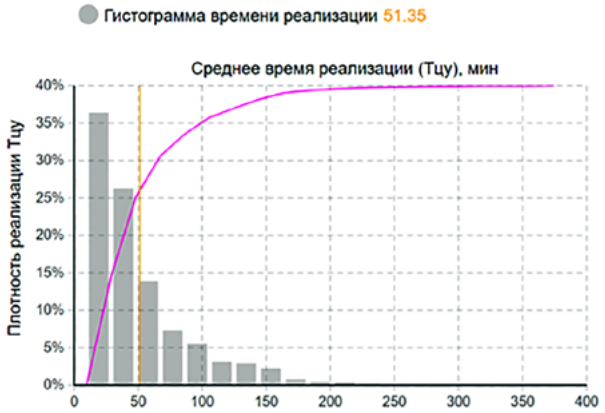



**Рис. 7.** Гистограмма общего времени реализации при $Pw = 0{,}7$

ного процесса. Основная часть реализации укладывается в интервал до 60 минут, при этом более 60 % инцидентов решаются в первые 20 минут, что подтверждает стабильность и управляемость алгоритма [4].

Теперь рассмотрим первый сценарий работы двух алгоритмов при варьировании вероятностного параметра $Pw$, который отражает вероятность того, что инцидент потребует применения алгоритма управления конфигурацией. Изначально в модели использовалось значение $Pw = 0{,}5$, что предполагало равную вероятность срабатывания как алгоритма управления инцидентами, так и алгоритма управления конфигурацией. Однако для более глубокого анализа эффективности каждого из алгоритмов была проведена серия экспериментов, в которых результаты гистограмм будут рассматриваться для двух значений $Pw$: $Pw = 03$ и $Pw = 0{,}7$, так как на рис. 3 представлен результат работы для $Pw = 0{,}5$.

Снижение вероятности активации второго алгоритма до 0,3 привело к увеличению общего среднего времени реализации цикла управления с 57,48 до 61,12 минуты. Это указывает на то, что реже используемый второй алгоритм снижает общую эффективность системы. Несмотря на это, все инциденты продолжают успешно решаться в пределах 300 минут, что говорит о стабильности модели, однако с меньшей скоростью восстановления [10].

Увеличение вероятности до $Pw2 = 0{,}7$ позволило сократить общее среднее время реализации цикла управления до 51,35 минуты, что на 6 минут меньше значения при вероятности $Pw = 0{,}5$. Это свидетельствует о том, что более частое использование второго алгоритма способствует ускорению процесса восстановления. Кроме того, 63 % инцидентов решаются в течение первых 50 минут, а общее время устранения не превышает 250 минут (примерно 4 часа), что демонстрирует высокую оперативность и эффективность взаимодействия алгоритмов при заданных условиях [10].

## Заключение

В результате проведенного моделирования процессов управления инцидентами и конфигурацией телекоммуникационной сети (ТКС) была разработана имитационная модель, позволяющая оценить эффективность применения автоматизированных алгоритмов в различных сценариях функционирования системы.

Сравнительный анализ показал, что использование алгоритмов управления позволяет значительно сократить общее время восстановления сети. Особенно эффективной оказалась совмест-

ная работа алгоритмов управления инцидентами и конфигурацией: среднее время реализации процесса ($T_{цу}$) в таком случае было наименьшим [4].

Дополнительно была проведена серия экспериментов с варьированием вероятностного параметра *Pw*, отражающего частоту применения алгоритма конфигурации. Этот параметр имитирует нагрузку на подсистему управления: чем выше *Pw*, тем выше нагрузка, что влияет на эффективность и оперативность восстановления [10].

## Список источников

1. Чухно А. А. Основы построения и управления телекоммуникационными сетями / А. А. Чухно, Д. С. Белоусов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2019.

2. Канаев А. К. Информационная модель учета и управления данными о конфигурации сети в интересах системы управления сети связи специального назначения / А.К. Канаев, А. Н. Копытин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 2 томах, Т. 2. — 2015. — С. 1280–1285.

3. Логин Э. В. Анализ и классификация существующих систем управления телекоммуникационными сетями / Э. В. Логин // Труды 69-ой Международной научно-технической конференции, посвященной Дню радио. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. — С. 229–230.

4. Гореликов А. В. Имитационное моделирование систем: учебное пособие / А. В. Гореликов. — М.: КНОРУС, 2020. — 240 с.

5. Гребешков А. Ю. Функциональные задачи контроля и управления конфигурацией в современных телекоммуникациях / А. Ю. Гребешков // Технологии информационного общества, 12-2001. — С. 29–31.

6. Гребешков А. Ю. Управление и технический учет ресурсов в телекоммуникациях / А. Ю. Гребешков. — М.: ИРИАС, 2008. — 326 с.

7. Воронков А. А. AnyLogic в примерах и задачах: учебное пособие / А. А. Воронков, С. А. Емельянов. — М.: ДМК Пресс, 2022. — 208 с.

8. Григорьев И. AnyLogic за три дня. Практическое пособие по имитационному моделированию / И. Григорьев. — URL: https://anylogic.help/ru/tutorials/index.html.

9. Попов В. Н. Сети связи и телекоммуникации: учебник для вузов / В. Н. Попов, И. В. Котляров. — М.: Горячая линия — Телеком, 2021

10. Канаев А. К. Разработка имитационных моделей средствами AnyLogic: электронный практикум по дисциплине «Системы управления телекоммуникациями» / А. К. Канаев, М. А. Сахарова, Э. В. Логин, Е. В. Опарин. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024. — 64 с.

Дата поступления: 15.04.2025
Решение о публикации: 15.05.2025

**Контактная информация:**
КАЗАРОВА Анна Олеговна — студент 5-го курса; 15.annna.0@gmail.com
ЛОГИН Элина Валерьевна — канд. техн. наук; elinabeneta@yandex.ru
МАШКОВЦЕВ Глеб Алексеевич — аспирант; Mashgleb00@yandex.ru

# Investigation of Incident and Configuration Management Algorithms Using Simulation Modelling

**A. O. Kazarova, E. V. Login, G. A. Mashkovtsev**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Kazarova A. O., Login E. V., Mashkovtsev G. A. Investigation of Incident and Configuration Management Algorithms Using Simulation Modelling. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 545–552. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-545-552

## Summary

**Purpose:** To develop a simulation model for the management of incidents and configurations of a telecommunication network (TNC), followed by a comparative analysis of different operational scenarios. **Methods:** The simulation model was developed using the AnyLogic software, with a probabilistic approach employed for modelling various events. **Results:** Three scenarios have been developed: the operation of two algorithms together, the operation of the incident management algorithm, and the operation of the configuration management algorithm. The integrated use of the algorithms has been found to provide the shortest average cycle time for management. The impact of varying the Pw probability on the model's behaviour and algorithm performance has also been examined. **Practical significance:** The developed model can be applied in real-world conditions when designing automated TNC management systems. It allows forecasting the effectiveness of different management approaches, optimising incident response processes, and justifying the implementation of algorithms in telecommunications facilities.

**Keywords:** Simulation modelling, management, incident, configuration, algorithm, telecommunications network, AnyLogic environment, model, scenario, probabilistic parameter.

## References

1. Chukhno A. A., Belousov D. S. *Osnovy postroeniya i upravleniya telekommunikatsionnymi setyami* [Fundamentals of Construction and Management of Telecommunication Networks]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2019. (In Russian)

2. Kanaev A. K., Kopytin A. N. Informatsionnaya model' ucheta i upravleniya dannymi o konfiguratsii seti v interesakh sistemy upravleniya seti svyazi spetsial'nogo naznacheniya [Information Model for Accounting and Managing Network Configuration Data in the Interests of a Special-Purpose Communication Network Management System]. *Aktual'nye problemy infotelekommunikatsiy v nauke i obrazovanii: mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya i nauchno-metodicheskaya konferentsiya: sbornik nauchnykh statey v 2 tomakh* [Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education: International Scientific, Technical and Scientific-Methodological Conference: Collection of Scientific Articles in 2 Volumes]. 2015, vol. 2, pp. 1280–1285. (In Russian)

3. Login E. V. Analiz i klassifikatsiya sushchestvuyushchikh sistem upravleniya telekommunikatsionnymi setyami [Analysis and Classification of Existing Telecommunication Network Management Systems]. *Trudy 69-oy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu radio* [Proceedings of the 69th International Scientific and Technical Conference Dedicated to Radio Day]. St. Petersburg: SPbGETU "LETI" Publ., 2014, pp. 229–230. (In Russian)

4. Gorelikov A. V. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem: uchebnoe posobie* [Simulation modeling of systems: a tutorial]. Moscow: KNORUS Publ., 2020, 240 p. (In Russian)

5. Grebeshkov A. Yu. Funktsional'nye zadachi kontrolya i upravleniya konfiguratsiey v sovremennykh tele-

kommunikatsiyakh [Functional tasks of control and configuration management in modern telecommunications]. *Tekhnologii informatsionnogo obshchestva* [Technologies of the information society]. 12-2001, pp. 29–31. (In Russian)

6. Grebeshkov A. Yu. *Upravlenie i tekhnicheskiy uchet resursov v telekommunikatsiyakh* [Management and technical accounting of resources in telecommunications]. Moscow: IRIAS Publ., 2008, 326 p. (In Russian)

7. Voronkov A. A., Emel'yanov S. A. *AnyLogic v primerakh i zadachakh: uchebnoe posobie* [AnyLogic in examples and problems: a tutorial]. Moscow: DMK Press Publ., 2022, 208 p. (In Russian)

8. Grigor'ev I. *AnyLogic za tri dnya. Prakticheskoe posobie po imitatsionnomu modelirovaniyu* [AnyLogic in three days. A practical guide to simulation modeling]. Available at: https://anylogic.help/ru/tutorials/index.html. (In Russian)

9. Popov V. N., Kotlyarov I. V. *Seti svyazi i telekommunikatsii: uchebnik dlya vuzov* [Communication networks and telecommunications: a textbook for universities]. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom Publ., 2021. (In Russian)

10. Kanaev A. K., Sakharova M. A., Login E. V., Oparin E. V. *Razrabotka imitatsionnykh modeley sredstvami AnyLogic: elektronnyy praktikum po distsipline "Sistemy upravleniya telekommunikatsiyami"* [Development of simulation models using AnyLogic: an electronic workshop on the discipline "Telecommunication management systems"]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2024, 64 p. (In Russian)

Received: April 15, 2025
Accepted: May 15, 2025

**Author's information:**
Anna O. KAZAROVA — Student; 15.annna.0@gmail.com
Elina V. LOGIN — PhD in Engineering;
elinabeneta@yandex.ru
Gleb A. MASHKOVTSEV — Postgraduate Student;
Mashgleb00@yandex.ru

УДК 004.4:681.5.08:625.1

# Разработка мобильного приложения для диагностики железнодорожной инфраструктуры

**Е. А. Белых[1], А. И. Сафронов[1], У. А. Старовойтова[2]**

[1]Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Российская Федерация, 127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова 9, стр. 9
[2]АО «Фирма ТВЕМА», Российская Федерация, 119602, Москва, ул. Никулинская, 27

**Для цитирования:** *Белых Е. А., Сафронов А. И., Старовойтова У. А.* Разработка мобильного приложения для диагностики железнодорожной инфраструктуры // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 553–565. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-553–565

## Аннотация

Современные технологии диагностики и мониторинга железнодорожной инфраструктуры играют важную роль в обеспечении безопасности, сопутствуют повышению эффективности грузовых и пассажирских перевозок. **Цель:** Анализ отечественного и зарубежного опыта разработки мобильных рабочих мест для оценки возможности его применения в области диагностики железнодорожной инфраструктуры и проведения реинжиниринга существующих программно-аппаратных решений, не отвечающих современным требованиям по эргономичности, обслуживаемости и масштабируемости. **Методы:** Выполнены формализованное описание информационного обеспечения разработки, реинжиниринг существующего программного обеспечения для диагностики железнодорожной инфраструктуры, отмечены его преимущества и недостатки, составлена диаграмма потоков данных в нотации Гейна — Сарсона для описания технологического процесса работы мобильного рабочего места. **Результаты:** Создан прототип мобильного рабочего места оператора-контролера, диагностирующего состояние железнодорожных путей и стрелочных переводов; выполнено описание функционирования созданного прототипа, запущенного на типовом смартфоне с предустановленной на нем операционной системой *Android*; сделаны выводы по результатам работы прототипа. **Практическая значимость:** Мобильное рабочее место контролера состояния железнодорожных путей и стрелочных переводов реализовано на базе стека современных информационных технологий — кроссплатформенного фреймворка *.NET MAUI*, предоставляющего возможности запуска программного обеспечения под управлением различных операционных систем.

**Ключевые слова**: Диагностика железнодорожной инфраструктуры, мобильное рабочее место, масштабируемость технических систем, применение фреймворка, *.NET MAUI*, контроль состояния путей, контроль состояния стрелочных переводов.

## Введение

В современной транспортной системе Российской Федерации неразрушающие технологии диагностики и мониторинга железнодорожной инфраструктуры (ЖДИ) [1, 2] играют ключевую роль при обеспечении безопасности, надежности и эффективности эксплуатации [3, 4]. Широкий спектр применяемых методов включает традици-

онные подходы (визуальный осмотр) и современные решения, основанные на *SCADA*.

В статье рассматривается процесс разработки мобильного приложения (МП) [5–7] для контроля и диагностики ЖДИ, непрерывно подвергающейся различным видам воздействий [8]. В настоящее время именно МП являются наиболее востребованными инструментами для технического обслуживания и мониторинга состояния ЖДИ.

Объектами исследования являются активы ОАО «РЖД». К ним относятся: рельсы, шпалы, стрелочные переводы, сигнальные устройства, контактная сеть, мосты, тоннели, станционные здания, оборудование, путевые механизмы, электроподвижной состав и др. Для каждого ведется нормативно-справочная (НСИ) и оперативно собираемая информация о характеристиках, местоположении, состоянии и планируемых ремонтных работах.

Мобильные устройства и технологии способствуют повышению качества и оперативности выполнения различных задач техническим персоналом. Ярким примером оснащенности МП для решения задач ОАО «РЖД» является мобильное рабочее место (МРМ) Центральной дирекции по ремонту пути (ЦДРП), куда входят:

– автоматизированная установка и обновление программного обеспечения (ПО) МРМ и дополнительных сервисов;

– авторизация оператора МРМ Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой (ЕК АСУИ) [9, 10];

– загрузка в МРМ ЕК АСУИ данных по зоне обслуживания оператора;

– оперативная синхронизация данных с ЕК АСУИ;

– возможность работы с МРМ в режиме без подключения к сети;

– автоматизированный поиск и фильтрация активов;

– просмотр характеристик станций и перегонов;

– учет выполнения ремонтно-путевых работ;

– отображение безопасного маршрута прохода персонала по территории;

– оповещение персонала в зонах с ограниченной видимостью [11–13];

– формирование схемы ограждения места производства путевых работ;

– отображение модели стрелочного перевода с местами измерений.

Целью настоящей статьи является анализ накопленного опыта разработки МРМ для оценки возможности его применения в области диагностики ЖДИ, а также проведения реинжиниринга существующих программно-аппаратных (ПА) решений, не отвечающих современным требованиям по эргономичности, обслуживаемости и масштабируемости.

Для достижения поставленной цели потребовалось: изучить современные принципы проектирования и реализации МРМ, существующие ПА решения для диагностики ЖДИ, оценить их преимущества и недостатки, определить направления и стратегию реинжиниринга, открывающего возможность разработки МРМ с учетом ранее накопленного, а также опыта, приобретенного при освоении новых информационных технологий (ИТ).

## 1. Современные принципы разработки МРМ

При разработке МП для операционных систем (ОС) *Android* часто допускаются ошибки проектирования, приводящие к снижению уровня обслуживаемости ПО и затрудняющие его последующее масштабирование. В таких ситуациях существенно возрастает общая стоимость разработки. Не допустить типовые ошибки проектирования позволяет следование современным принципам управления техническими проектами [8, 14, 15]:

– рассмотрение жизненного цикла ПО как плана работы команды;

– использование рабочих материалов макетирования в качестве инструмента для обсуждения функционального состава ПО с конечными пользователями [16, 17];

– использование этапа сопровождения ПО в качестве основного источника сведений о пользовательском опыте и возможности улучшения эргономичности графического пользовательского интерфейса (ГПИ) [18].

Анализ публикаций о создании и внедрении МП показал — эффективности работы ПО удается достигать в рамках одной из архитектур [19]:

– *Model-View-Presenter* (*MVP)*,
– *Model-View-ViewModel* (*MVVM*),
– *Model-View-Controller* (*MVC*).

Архитектуры позволяют масштабировать МП и удобно:

– разделять логику функционирования «ядра» МП и его ГПИ [20–22];

– собирать стек связанных ИТ из: базы данных, фреймворка, модулей, готовых сценариев, сервисных функций и т. п. [5, 23];

– настраивать стратегии ручного и автоматизированного, модульного тестирования на всех этапах разработки МП [24].

## 2. Особенности функционирования и информационное обеспечение существующего ПА решения для диагностики ЖДИ

Рассматриваемое МРМ предназначено для удобной работы оператора с путевым диагностическим оборудованием. Это оборудование (аппаратная часть решения) представлено шаблоном электронно-путевым (ШЭП, рис. 1). Инструмент предназначен для диагностики бесстыкового пути.

Программная часть существующего решения составлена на языке высокого уровня *Java*. В результате анализа ПО выявлены проблемы

**Рис. 1.** Шаблон электронно-путевой

запуска на различных ОС, сделан вывод о невозможности дальнейшего масштабирования ПО в связи с отсутствием документации на разработку (не удалось идентифицировать архитектуру существующего решения).

Авторами проведен реинжиниринг программной части существующего решения (язык *Java*), предназначенного для выполнения измерений контролером ЖДИ (оператором) состояния активов, и в результате определен функциональный состав сервисных функций ПО по категориям:

A. Подключение и настройка

**Сценарий:** оператор подключает МРМ к ШЭП по протоколу *Bluetooth*. Настройки обеспечивают безопасное подключение и позволяют указывать точность проводимых измерений.

B. Режимы замера

**Сценарии: «Путь».** Режим «Путь» позволяет оператору выполнять измерения на главных и станционных путях. Данные сохраняются в таблице печатной ведомости «ПУ-28». **«Стрелочный перевод».** В режиме «Стрелочный перевод» оператор указывает схему проведения измерений и создает задачу. После выбора задачи и категории замера данные сохраняются в таблице печатной ведомости «ПУ-29».

C. Взаимодействие с измерительным устройством

**Сценарий:** ШЭП оснащен дисплеем и кнопками, которые позволяют оператору выбирать и переключаться между категориями замеров.

Таблица 1. Информация о стрелочных переводах (*STR.xml*)

| № п/п | Наименование поля | Физический смысл поля | Тип поля |
|---|---|---|---|
| 1 | ID | Идентификатор записи о стрелочном переводе | INTEGER |
| 2 | STRID | Идентификатор стрелочного перевода | INTEGER |
| 3 | ASSETNUM | Идентификатор пути, на котором расположен стрелочный перевод | TEXT |
| 4 | KM | Километр расположения стрелочного перевода на конкретном пути | INTEGER |
| 5 | M | Метр, уточняющий расположение стрелочного перевода | INTEGER |
| 6 | PUT_NOM | Номер пути, к которому относится стрелочный перевод | INTEGER |
| 7 | UP_NOM | Номер станции, с которой связан данный стрелочный перевод | INTEGER |
| 8 | ST_KOD | Код станции, к которой относится стрелочный перевод | INTEGER |
| 9 | NOM | Номер стрелочного перевода | INTEGER |
| 10 | TYPE | Тип стрелочного перевода | TEXT |
| 11 | OTB | Направление отвода, указывающее направление разветвления пути | INTEGER |
| 12 | POSH | «Пошерстность» (ширина или сложность) стрелочного перевода | INTEGER |
| 13 | SITEID | Номер дороги, к которой приписан стрелочный перевод | INTEGER |
| 14 | CREATEDATE | Дата создания записи о стрелочном переводе | TEXT |
| 15 | CHANGEDATE | Дата последнего изменения записи о стрелочном переводе | TEXT |
| 16 | CHANGETYPE | Вид изменения, внесенного в запись о стрелочном переводе | TEXT |
| 17 | HASH | Хеш-код записи о стрелочном переводе | TEXT |
| 18 | ROWSTAMP | Временной штамп завершения форматирования записи | INTEGER |

Таблица 2. Информация о путях (*WAY.xml*)

| № п/п | Наименование поля | Физический смысл поля | Тип поля |
|---|---|---|---|
| 1 | WAYID | Идентификатор записи о пути | INTEGER |
| 2 | ASSETNUM | Собственно, идентификатор пути | TEXT |
| 3 | NOM | Номер пути | TEXT |
| 4 | DESCRIPTION | Текстовое описание пути | TEXT |
| 5 | LOCATION | Географическое расположение пути | TEXT |
| 6 | UP_NOM | Номер станции, к которой относится данный путь | INTEGER |
| 7 | TYPE | Тип пути | TEXT |
| 8 | CREATEDATE | Дата создания записи о пути | TEXT |
| 9 | CHANGEDATE | Дата последнего изменения записи о пути | TEXT |
| 10 | CHANGETYPE | Вид изменения, внесенного в запись о пути | INTEGER |
| 11 | SITEID | Номер дороги, связанной с путем | INTEGER |
| 12 | HASH | Хеш-код записи о пути | TEXT |
| 13 | ROWSTAMP | Временной штамп завершения форматирования записи о пути | INTEGER |

Таблица 3. Информация о ШЭП (идентификатор ШЭП.*csv*)

| № п/п | Наименование поля | Физический смысл поля | Тип поля |
|---|---|---|---|
| 1 | TYP | Тип ШЭПа | TEXT |
| 2 | NOM | Номер ШЭПа | TEXT |
| 3 | DATA | Дата регистрации/изменения | TEXT |
| 4 | ASSETNUM | Уникальный идентификатор ШЭПа в системе | TEXT |
| 5 | RW_CODE | Код дороги, за которой закреплен ШЭП | INTEGER |

D. Просмотр и экспорт данных

**Сценарий:** в ПО имеется вкладка «Просмотр/экспорт данных», где оператор просматривает и выбирает сохраненные данные замеров.

E. Импорт паспорта

**Сценарий:** для корректной работы приложения необходимо загружать в него *ZIP*-архив, содержащий *XML*-файлы.

F. Дополнительные настройки

**Сценарий:** ПО предоставляет возможность выбора файлов формата **.CSV* для добавления НСИ, настройки уведомлений и звука.

Результат анализа информационного обеспечения (ИО) программной части существующего решения выполнен по методике, изложенной в [22]. В зависимости от полигона, на котором работает оператор, ему предоставляется доступ к соответствующему «паспорту» — *ZIP*-архиву. Архив содержит *XML*-файлы, структурированные согласно табл. 1, 2.

Импорт справочников НСИ происходит по схожему принципу. НСИ содержится не в *XML*-, а в *CSV*-файле. В табл. 3 представлен пример структуры *CSV*-файла, содержащего идентификаторы ШЭПов.

## 3. Особенности разработки МРМ на базе фреймворка *.NET MAUI*

Разработка нового МРМ выполняется на базе фреймворка *.NET Multi-platform App UI* (сокращенно *.NET MAUI*) — кроссплатформенного фреймворка для создания нативных мобильных [6] и приложений рабочего стола с использованием языка программирования *Visual C#* и языка разметки *XAML*. С помощью *.NET MAUI* можно разрабатывать приложения под такие ОС, как *Android*, *iOS*, *macOS* и *Windows*, используя при этом один и тот же код (рис. 2).

Первая версия фреймворка *.NET MAUI* выпущена в 2022 году. Позже, в ноябре 2024 года, выпущена актуализация под приложения рабочего стола ОС *Microsoft Windows* (*.NET Core* 9). Фреймворк *.NET MAUI* является развитием *Xamarin Forms* [5], технологии свободно распространяемым исходным кодом. Создаваемые на базе фреймворка *.NET MAUI* приложения готовы к работе сразу на нескольких ОС: *iOS*, *Android*, *Windows*, *macOS*.

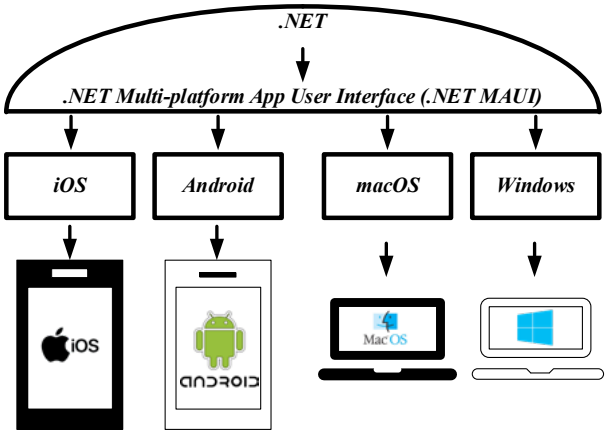



**Рис. 2.** Технология работы ГПИ фреймворка .NET MAUI

При создании классического кроссплатформенного МП разработчики сталкиваются со следующими трудностями [25]:

– различие в подходах к построению ГПИ;

– разные программируемые интерфейсы приложений (*API*);

– разные ОС и языки для разработки.

Широкий диапазон ОС, средств разработки, а также языков программирования не может положительно сказываться на сроках создания МП и в конечном счете на денежных средствах, выделяемых на разработку. Фреймворк *.NET MAUI* поставляет решение вышеотмеченной проблемы и снимает все вышеперечисленные трудности разработки.

Фреймворк *.NET MAUI* объединяет *API* ОС *Android*, *iOS*, *macOS* и *Windows* в общий *API*, позволяющий составлять общий код для всех поддерживаемых ОС и по необходимости добавлять для каждой отдельной ОС специфические

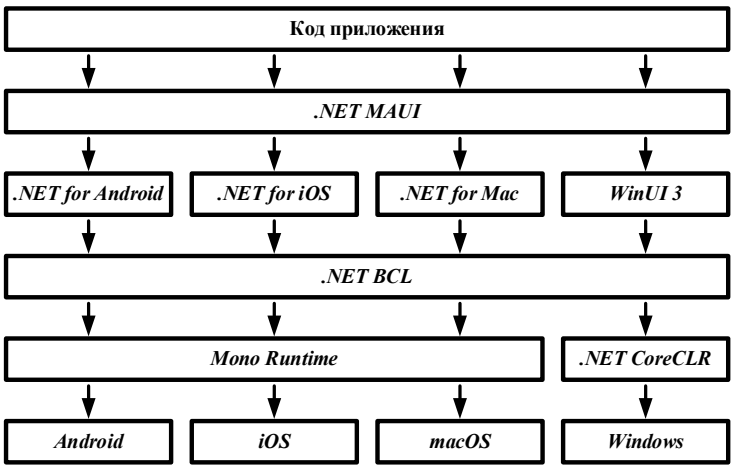



**Рис. 3.** Схема работы .NET MAUI

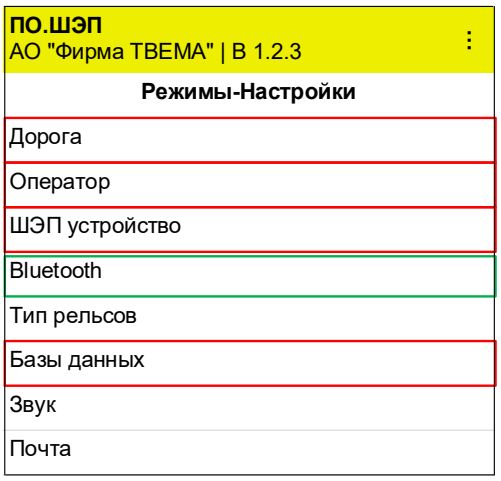



**Рис. 4.** Настройки программного обеспечения МРМ

надстройки. Работа фреймворка *.NET MAUI* представлена на рис. 3.

Фреймворк *.NET MAUI* предоставляет единый набор инструментов для создания ПО. В процессе работы он опирается на инструменты, через которые взаимодействует с отдельной ОС: *.NET for Android*, *.NET for iOS*, *.NET for macOS* и *Windows UI 3* (*WinUI 3*). Так ПО сначала обращается к фреймворку *.NET MAUI*, а он — к инструментам для конкретной ОС.

Чтобы разрабатывать в *Microsoft Visual Studio* ПО на базе фреймворка *.NET MAUI* в установщике компонентов *Microsoft Visual Studio*, необходимо выбрать и установить элемент «Разработка с помощью *.NET Multi-Platform App UI*» из категории «Разработка мобильных приложений на *.NET*».

## 4. Оценка работоспособности прототипа МРМ оператора, контролирующего текущее состояние путей и стрелочных переводов

Под управление фреймворка *.NET MAUI* (язык *Visual C#*) перенесены сервисные функции из ПО существующего решения. После импорта данных оператор настраивает параметры МП (красные рамки на рис. 4):

– выбирает конкретную дорогу, на которой планируется работа;

– выбирает оператора — подключает персональный «паспорт»;

– выбирает ШЭП-устройство (по «идентификатору ШЭП»).

Выбор сведений происходит из выпадающих списков, для заполнения которых необходимо инициировать механизм импорта в МРМ нажатием на кнопку «Базы данных». Упомянутые списки называются справочниками НСИ.

По нажатии оператором на кнопку с надписью *Bluetooth* (зеленая рамка на рис. 4) оператор выбирает из набора *Bluetooth*-устройств *Sheep-XXXX*, предварительно включив ШЭП.

Для описания технологии работы МП авторы выбрали *DFD*-нотацию. На рис. 5 в *DFD*-нотации Гейна — Сарсона представлена схема технологического процесса работы оператора МРМ на верхнем («нулевом», *Level 0*) уровне.

Взаимодействующими сущностями являются: «Оператор», «МРМ», «ШЭП». Используемыми для чтения и записи отношениями являются: «Паспорт», «Справочники НСИ», «Измерения». В числе функций верхнего уровня продемонстрированы: «Смена режима работы», «Выполнение измерения», «Конвертация данных» («Преобразование данных»), «Создание файла формата *PDF*», «Взаимный обмен сигналами сопряжения между устройствами», «Сохранение результа-

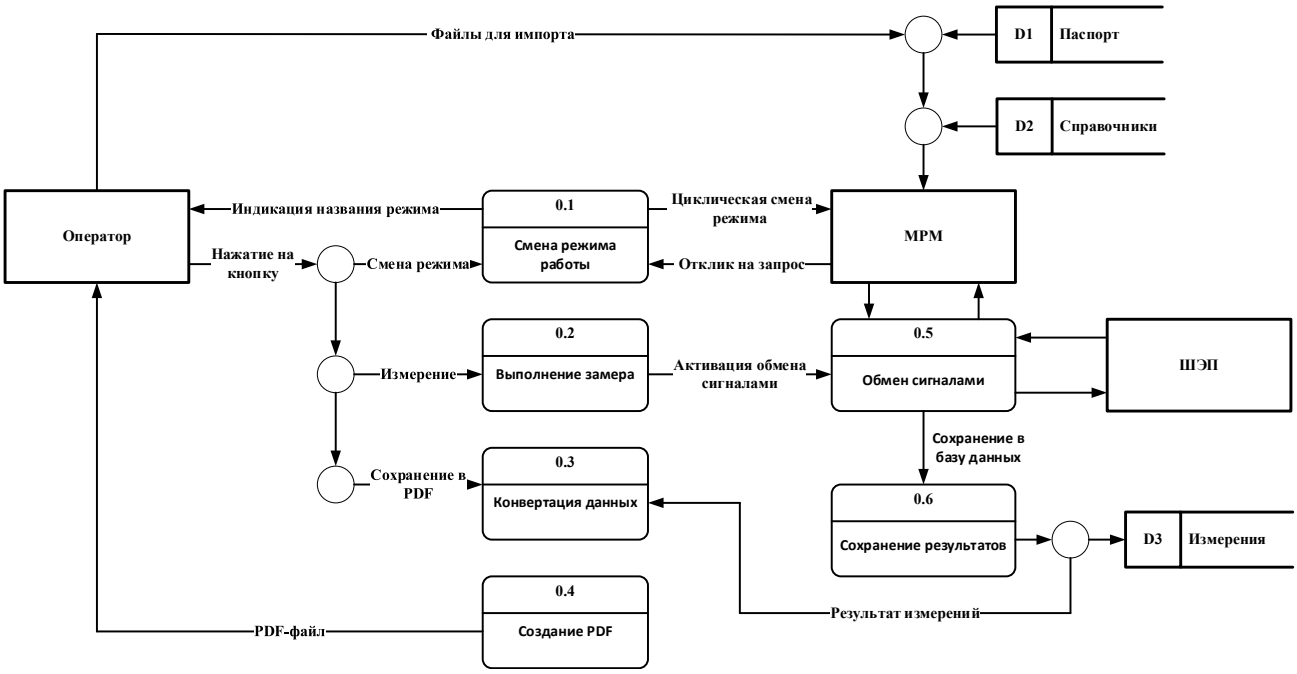
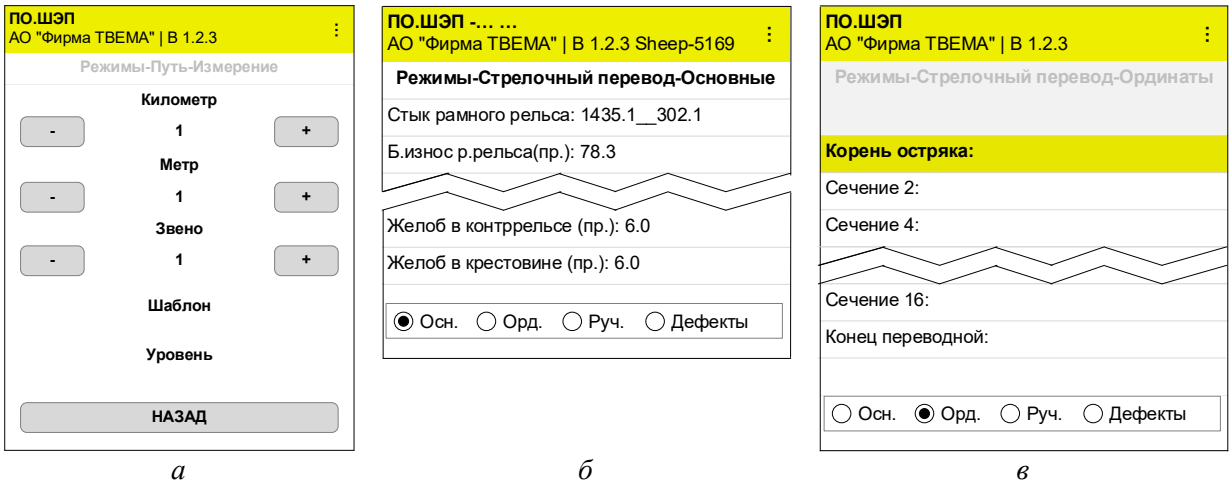



**Рис. 5.** Диаграмма потоков данных МРМ ЦДРП верхнего уровня




*а* *б* *в*

**Рис. 6.** Замеры: а — на пути; б — в разделе «Основные» на стрелочном переводе; в — в разделе «Ордината» на стрелочном переводе

тов измерений». Стрелками на *DFD* отмечены передаваемые сигналы (потоки данных / потоки команд), окружностями — узлы передачи / распределения потоков данных и команд.

Лицевая панель ШЭП содержит по центру жидкокристаллический дисплей. Вокруг дисплея размещены 4 кнопки для: включения, активации *Bluetooth*-взаимодействия, перевода курсора в меню на одну позицию либо вниз, либо вверх. По нажатии на кнопку *Bluetooth*-взаимодействия с ШЭП поступают следующие данные: «шаблон», «уровень».

Оператор МРМ должен удостовериться, что ШЭП включен. Если ШЭП выключен, то его необходимо запустить непродолжительным нажатием на кнопку включения. Оператору необходимо удостовериться в подключении к МРМ ШЭП: после выбора в настройках приложения МРМ типа замера на экране ШЭП должен появиться значок *Bluetooth*.

На рис. 6 приведены примеры замеров, фиксируемых в МРМ.

Переключение категорий замеров производится либо по нажатии кнопки переключения позиции курсора в меню на панели управления ШЭП, либо по нажатии на строку интересующей категории в списке на ГПИ МРМ. В МРМ и ШЭП данный процесс синхронизирован.

Результат проведения замеров в перспективе можно будет выгружать в формате печатной ведомости в *PDF*-файл. В табл. 4 приведен фрагмент набора сконвертированных сведений об измерениях, хранящихся в базе данных, подготовленных для составления печатной ведомости «ПУ-29».

Таблица 4. Фрагмент печатной ведомости «ПУ-29». Сведения о стрелочных переводах

| ПД | Станция | Стрелочный перевод | Дата проверки |
|---|---|---|---|
| 1 | Перово | 113 | 31.05.2024 |
| 4 | Перово | 27 | 01.06.2024 |
| 4 | Перово | 27 | 31.05.2024 |
| 7 | Перово | 11 | 26.01.2024 |
| 7 | Перово | 11 | 29.02.2024 |
| 7 | Перово | 19 | 31.05.2024 |
| 7 | Перово | 51 | 01.06.2024 |
| 7 | Перово | 9 | 31.05.2024 |

В табл. 5 приведен фрагмент набора сконвертированных сведений об измерениях, хранящихся в базе данных, подготовленных для составления второго раздела печатной ведомости «ПУ-29».

## Заключение

Проведенный анализ отечественного и зарубежного опыта разработки МРМ для различных предметных областей позволил определить архитектуру нового проектного решения, а также собрать стек технологий для реализации прототипа МРМ контролера состояния железнодорожных путей и стрелочных переводов, согласно современным принципам проектирования МП.

Новое проектное решение МРМ вобрало в себя как сильные стороны существующего ПО, так и позволило парировать выявленные недостатки — устранить неудовлетворительную эргономичность, отсутствие четкой документации, отсутствие должного уровня по обслуживаемости и осваиваемости, неудовлетворительную управляемость при работе в различных ОС, а также невозможность дальнейшего масштабирования.

Сильными сторонами существующего решения являются: приемлемая, нормализованная структура хранения данных и согласованная

Таблица 5. Фрагмент печатной ведомости «ПУ-29». Раздел 2

| Величина ординат в расстояниях, м от корня остряка | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| В корне остряка | 2 | 4 | 6 | 8 | … | 16 | В конце переводной кривой | Дополнительно |
| 28,0 | 28,0 | 28,0 | 28,0 | 28,0 | … | 28,0 | 28,0 | Комментарий отсутствует |
| 206,0 | 251,0 | 300,0 | 353,0 | 410,0 | … | 681,0 | 1458,0 | Комментарий отсутствует |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | … | 27,4 | 27,4 | Комментарий отсутствует |
| 27,8 | 27,8 | 27,8 | 27,8 | 27,8 | … | 27,8 | 27,8 | Комментарий отсутствует |
| 0,0 | 0,0 | 28,0 | 28,0 | 28,0 | … | 28,0 | 28,0 | Комментарий отсутствует |
| 28,0 | 28,0 | 28,0 | 28,0 | 28,0 | … | 28,0 | 28,0 | Комментарий отсутствует |

с конечными пользователями карта технологического процесса, воспроизведенная в результате реинжиниринга.

Представленное в статье описание функционирования прототипа МРМ одновременно является и краткой инструкцией пользователя, повышающей показатели осваиваемости МРМ, а также намечающей границы между уже реализованным функциональным составом МРМ и перспективами развития прототипа на всех этапах, предшествующих внедрению продукта в опытную эксплуатацию.

## Список источников

1. Костинский Г. И. Системы автоматического бесконтактного выявления перегрева букс подвижного состава Московского метрополитена / Г. И. Костинский, К. Л. Шляховский, В. Г. Новиков, Л. Н. Логинова // Наука и техника транспорта. — 2022. — № 1. — С. 52–56.

2. Dey A. Detection and evaluation of rail defects with non-destructive testing methods / A. Dey, J. Kurz, L. Tenczynski // 19th World Conference on Non-Destructive Testing. — Munich: e-Journal of Nondestructive Testing. — 2016. — Vol. 21(7). — URL: https://www.ndt.net/?id=19511.

3. Баранов Л. А. Опыт и перспективы подготовки специалистов для высокоскоростного движения / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, А. А. Выгнанов, А. Н. Фиронов // Автоматика, связь, информатика. — 2024. — № 4. — С. 26–28.

4. Бородин А. Ф. Алгоритмические решения задач эффективного использования и развития железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. С. Прокофьева, Р. Ф. Сайбаталов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». — 2019. — № 3. — С. 28–39.

5. Демин В. В. Разработка мобильного приложения / В. В. Демин // Наука. Информатизация. Технологии. Образование. — Екатеринбург: РГППУ. — 2019. — С. 49–53.

6. Хасанов М. И. К слову о работе с программным обеспечением для мобильных устройств / М. И. Хасанов // Стратегическое развитие инновационного потенциала отраслей, комплексов и организаций. — Пенза: ПГАУ. — 2023. — С. 427–431.

7. Baktha K. Mobile Application Development: All the Steps and Guidelines for Successful Creation of Mobile App: Case Study / K. Baktha // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. — Vol. 6. — Iss. 9. — September 2017. — Pp. 15–20.

8. Aparicio A. Adaptation of transport to climate change in Europe: Challenges and options across transport modes and stakeholders / A. Aparicio, N. Sobrino, M. Leitner, K. Mäkinen et al. // EEA Report. — European Environment Agency. — 2014. — Iss. 8.

9. Тарабрин В. Ф. ЕК АСУИ СДМИ — цифровая платформа для предиктивного анализа и управления состоянием железнодорожной инфраструктуры / В. Ф. Тарабрин, Е. В. Юрченко, А. В. Лохач // Путь и путевое хозяйство. — 2022. — № 6. — С. 25–28.

10. Гордиенко Е. П. Организации технического обслуживания транспорта на примере ЕК АСУИ / Е. П. Гордиенко // Транспорт: наука, образование, производство («Транспорт-2024»). — Воронеж: РГУПС. — 2024. — С. 44–47.

11. Новиков В. Г. Координатная система контроля и оповещения / В. Г. Новиков, И. И. Алабушев // Вестник ВНИИЖТ. — 2008. — № 1. — С. 45–48.

12. Новиков В. Г. Навигационно-информационные системы на железнодорожном транспорте / В. Г. Новиков // Вестник ВНИИЖТ. — 2012. — № 4. — С. 49–51.

13. Lee S. Developing a railway station safety control automation system / S. Lee, Y. Seo, D. Kim // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. — 2017. — Vol. 11.

14. Locatelli G. Project characteristics and performance in Europe: An empirical analysis for large transport infrastructure projects / G. Locatelli, D. C. Invernizzi, N. J. Brookes // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2017. — Pp. 108–122.

15. Michelberger F. Rare earth elements in railway infrastructure — potentials for an information system as a tool for operators and other stakeholders / F. Michelberger,

H. Grossberger, P. Judmaier // Transport problems. — 2015. — Vol. 10 (Special Edition).

16. Вяткин Р. В. Разработка макета мобильного приложения для Ивановского государственного политехнического университета / Р. В. Вяткин, О. И. Никитина // Молодые ученые — развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). — 2021. — № 1. — С. 639–642.

17. Зуева К. А. Сервисы для создания мобильных приложений / К. А. Зуева, В. Ю. Белаш // Дневник науки. — 2022. — № 4(64).

18. Сафронов А. И. Применение методологии дизайн-мышления к планированию перевозочного процесса на Московском метрополитене в интеллектуальной транспортной системе «АРМ Графиста» / А. И. Сафронов // Интеллектуальные транспортные системы. — М.: РУТ. — 2023. — С. 338–347. — DOI: 10.30932/9785002182794-2023-338-347.

19. Сидоренко В. Г. Применение современных технологий программирования к автоматизации планирования движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов, К. М. Филипченко, М. А. Чжо // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2. — № 3. — С. 331–347.

20. Ликсин С. С. Сравнительный анализ шаблонов проектирования приложений с пользовательским интерфейсом / С. С. Ликсин, П. А. Лукошкин, С. В. Шибанов // Вестник Пензенского государственного университета. — 2021. — № 4(36). — С. 79–85.

21. Сафронов А. И. Способы проектирования эргономичных графических пользовательских интерфейсов для интеллектуальных транспортных систем / А. И. Сафронов // Интеллектуальные транспортные системы. — М.: РУТ. — 2024. — С. 385–394. — DOI: 10.30932/9785002446094-2024-385-394.

22. Сафронов А. И. Антология задач организации графического пользовательского интерфейса в интеллектуальной системе «АРМ Графиста» / А. И. Сафронов, У. А. Старовойтова // Интеллектуальные транспортные системы. — М.: РУТ. — 2022. — С. 326–337.

23. Сидоренко В. Г. Разработка информационного обеспечения для интеллектуального управления городскими рельсовыми транспортными системами / В. Г. Сидоренко, Л. Н. Логинова, А. И. Сафронов // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 2. — С. 178–192. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-178-192.

24. Логинова Л. Н. Направления развития подготовки бакалавров и магистров в области автоматизации, цифровизации и управления / Л. Н. Логинова, В. Г. Новиков, А. И. Сафронов // Информатизация образования и науки. — 2023. — № 4(60). — С. 58–68.

25. Cuervo E. MAUI: Making smartphones last longer with code offload / E. Cuervo, A. Balasubramanian, D. Cho, A. Wolman et al. // Conference: Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys 2010). — 2010. — DOI: 10.1145/1814433.1814441.

Дата поступления: 10.03.2025
Решение о публикации: 12.04.2025

**Контактная информация:**
БЕЛЫХ Егор Александрович — студент;
14bea20@mail.ru
САФРОНОВ Антон Игоревич — канд. техн. наук, доц.;
safronov-ai@mail.ru
СТАРОВОЙТОВА Ульяна Александровна — начальник отдела системного анализа; starovoytova@tvema.ru

# A Mobile Application for Railway Infrastructure Diagnostics

**E. A. Belykh[1], A. I. Safronov[1], U. A. Starovoitova[2]**

[1]Russian University of Transport, 9, bld 9, GSP-4, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation
[2]JSC "Firm TVEMA", 27, Nikulinskaya str., Moscow, 119602, Russian Federation

**For citation:** Belykh E. A., Safronov A. I., Starovoitova U. A. A Mobile Application for Railway Infrastructure Diagnostics // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 553–565. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-553-565

## Summary

Modern diagnostic and monitoring technologies for railway infrastructure play an important role in ensuring safety and contribute to improved efficiency of freight and passenger transportation. **Purpose:** To analyse national and international experience in the development of mobile workstations in order to assess the possibility of their application in the field of railway infrastructure diagnostics and of the reengineering of existing software and hardware solutions that do not meet modern requirements in terms of ergonomics, maintainability and scalability. **Methods:** A formal description of the project's information support was carried out, the existing software for railway infrastructure diagnosis was re-engineered with its advantages and disadvantages demonstrated, and a data flow diagramme in Gein-Sarson notation was created to describe the technological process of a mobile workplace. **Results:** A prototype of an operator's mobile workplace for diagnosing the condition of railway tracks and switches has been created. The created prototype has been launched on a standard smartphone with the Android operating system pre-installed, and its operation has been described. The conclusions have been drawn on the basis of the prototype results. **Practical significance:** The mobile workplace of the operator-controller monitoring the condition of railway tracks and switches is implemented on the basis of a stack of modern information technologies such as a cross-platform framework .NET MAUI, which provides the ability to run software in various operating systems.

**Keywords:** Railway infrastructure diagnostics, mobile workplace, technical system scalability, .NET MAUI framework application, track condition monitoring, switches' condition monitoring.

## References

1. Kostinskij G. I., Shlyakhovskiy K. L., Novikov V. G., Loginova L. N. Sistemy avtomaticheskogo beskontaktnogo viyavleniya peregreva buks podvizhnogo sostava Moskovskogo metropolitena [Moscow Metro rolling stock axle boxes overheating automatic contactless detection Systems]. *Nauka i texnika transporta* [Science and technology of transport]. 2022, Iss. 1, pp. 52–56. (In Russian)

2. Dey A., Kurz J., Tenczynski L. Detection and evaluation of rail defects with non-destructive testing methods. 19th World Conference on Non-Destructive Testing, Munich: e-Journal of Nondestructive Testing, 2016, vol. 21(7). Available at: https://www.ndt.net/?id=19511.

3. Baranov L. A., Bestem'yanov P. F., Vygnanov A. A., Fironov A. N. Opyt i perspektivy podgotovki specialistov dlya vysokoskorostnogo dvizheniya [Training specialists for high-speed traffic experience and prospects]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communications, informatics]. 2024, Iss. 4, pp. 26–28. (In Russian)

4. Borodin A. F., Panin V. V., Prokof'eva E. S., Saybatalov R. F. Algoritmicheskie resheniya zadach effektivnogo ispolzovaniya i razvitiya zheleznodorozhnoj infrastruktury i perevozochnykh resursov [Railway infrastructure and transportation resources efficient use and development problems algorithmic solutions]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZD"* [JSC Russian Railways Bulletin]. 2019, Iss. 3, pp. 28–39. (In Russian)

5. Dyomin V. V. Razrabotka mobilnogo prilozheniya [Mobile application development]. *Nauka. Informatizaciya. Texnologii. Obrazovanie* [Science. Informatization. Technologies. Education]. Ekaterinburg: RGPPU Publ., 2019, pp. 49–53. (In Russian)

6. Khasanov M. I. K slovu o rabote s programmnym obespecheniem dlya mobilnykh ustrojstv [Working with software for mobile devices]. *Strategicheskoe razvitie innovacionnogo potenciala otraslej, kompleksov i organizacij* [Strategic development of the innovative potential of industries, complexes and organizations]. Penza: PGAU Publ., 2023, pp. 427–431. (In Russian)

7. Baktha K. Mobile Application Development: All the Steps and Guidelines for Successful Creation of Mobile App: Case Study. International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol. 6, Iss. 9, pp. 15–20.

8. Aparicio A., Sobrino N., Leitner M., Mäkinen K. et al. Adaptation of transport to climate change in Europe: Challenges and options across transport modes and stakeholders. European Environment Agency Report, 2014, Iss. 8.

9. Tarabrin V. F., Yurchenko E. V., Lokhach A. V. EK ASUI SDMI — tsifrovaya platforma dlya prediktivnogo analiza i upravleniya sostoyaniem zheleznodorozhnoy infrastruktury [EC ASUI SDMI — a digital platform for railway infrastructure state predictive analysis and management]. *Put' i putevoe khozyajstvo* [Path and track facilities]. 2022, Iss. 6, pp. 25–28. (In Russian)

10. Gordienko E. P. Organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya transporta na primere EK ASUI [Organization of technical maintenance of transport by example EC ASUI]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo* [Transport: science, education, production]. Voronezh: RGUPS Publ., 2024, pp. 44–47. (In Russian)

11. Novikov V. G., Alabushev I. I. Koordinatnaya sistema kontrolya i opoveshheniya [Control and notification coordinate system]. *Vestnik VNIIZT* [Bulletin of VNIIZT]. 2008, Iss. 1, pp. 45–48. (In Russian)

12. Novikov V. G. Navigatsionno-informatsionnye sistemy na zheleznodorozhnom transporte [Navigation and information systems in railway transport]. *Vestnik VNIIZT* [Bulletin of VNIIZT]. 2012, Iss. 4, pp. 49–51. (In Russian)

13. Lee S., Seo Y., Kim D. Developing a railway station safety control automation system. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2017, vol. 11.

14. Locatelli G. D., Invernizzi C., Brookes N. J. Project characteristics and performance in Europe: An empirical analysis for large transport infrastructure projects. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, pp. 108–122.

15. Michelberger F., Grossberger H., Judmaier P. Rare earth elements in railway infrastructure — potentials for an information system as a tool for operators and other stakeholders. Transport problems, 2015, vol. 10 (Special Edition).

16. Vyatkin R. V., Nikitina O. I. Razrabotka maketa mobilnogo prilozheniya dlya Ivanovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta [Mobile application layout development for Ivanovo State Polytechnic University]. *Molodye uchenye — razvitiyu Natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy (POISK)* [Young scientists for the development of the National Technology Initiative (SEARCH)]. 2021, Iss. 1, pp. 639–642. (In Russian)

17. Zueva K. A., Belash V. Yu. Servisy dlya sozdaniya mobil'nykh prilozheniy [Services for creating mobile applications]. *Dnevnik nauki* [Diary of science]. 2022, Iss. 4(64). (In Russian)

18. Safronov A. I. Primenenie metodologii dizayn-myshleniya k planirovaniyu perevozochnogo protsessa na Moskovskom metropolitene v intellektual'noy transportnoy sisteme "ARM Grafista" [Transportation process planning design-thinking methodology Application on the Moscow metro in the intelligent transport system "ARM Graphista"]. *Intellektualnie transportnie sistemy* [Intelligent transport systems]. Moscow: RUT Publ., 2023, pp. 338–347. DOI: 10.30932/9785002182794-2023-338-347. (In Russian)

19. Sidorenko V. G., Safronov A. I., Filipchenko K. M., Chzho M. A. Primenenie sovremennykh tekhnologiy programmirovaniya k avtomatizatsii planirovaniya dvizheniya poezdov metropolitena [Modern programming technologies application to metro train planning automation].

*Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2016, vol. 2, Iss. 3, pp. 331–347. (In Russian)

20. Liksin S. S., Lukoshkin P. A., Shibanov S. V. Sravnitel'nyy analiz shablonov proektirovaniya prilozheniy s pol'zovatel'skim interfeysom [Application design patterns with a user interface comparative analysis]. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Penza State University]. 2021, Iss. 4(36), pp. 79–85. (In Russian)

21. Safronov A. I. Sposoby proektirovaniya ergonomichnykh graficheskikh pol'zovatel'skikh interfeysov dlya intellektual'nykh transportnykh sistem [Designing ergonomic graphical user interfaces methods for intelligent transport systems]. *Intellektual'nye transportnye sistemy* [Intelligent transportation systems]. Moscow: RUT Publ., 2024, pp. 385–394. DOI: 10.30932/9785002446094-2024-385-394. (In Russian)

22. Safronov A. I., Starovoytova U. A. Antologiya zadach organizatsii graficheskogo pol'zovatel'skogo interfeysa v intellektual'noy sisteme "ARM Grafista" [Organizing a graphical user interface tasks anthology in the intelligent system "ARM Graphista"]. *Intellektual'nye transportnye sistemy* [Intelligent transportation systems]. Moscow: RUT Publ., 2022, pp. 326–337. (In Russian)

23. Sidorenko V. G., Loginova L. N., Safronov A. I. Razrabotka informatsionnogo obespecheniya dlya intellektual'nogo upravleniya gorodskimi rel'sovymi transportnymi sistemami [Information support development for urban rail transport systems intelligent management]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2023, vol. 9, Iss. 2, pp. 178–192. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-178-192. (In Russian)

24. Loginova L. N., Novikov V. G., Safronov A. I. Napravleniya razvitiya podgotovki bakalavrov i magistrov v oblasti avtomatizatsii, tsifrovizatsii i upravleniya [Bachelor's and master's degree training development directions in the automation, digitalization and management field]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of education and science]. 2023, Iss. 4(60), pp. 58–68. (In Russian)

25. Cuervo E., Balasubramanian A., Cho D., Wolman A. et al. MAUI: Making smartphones last longer with code offload. Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys 2010), 2010. DOI:10.1145/1814433.1814441.

Received: March 10, 2025
Accepted: April 12, 2025

**Author's information:**
Egor A. BELYKH — Student; 14bea20@mail.ru
Anton I. SAFRONOV — PhD in Engineering, Associate Professor; safronov-ai@mail.ru
Ulyana A. STAROVOITOVA — Head of the System Analysis Department; starovoytova@tvema.ru