

ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 2 (69). 2024 16+



УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

Манаков Алексей Леонидович – д-р техн. наук, проф.

Заместитель главного редактора

Абрамов Андрей Дмитриевич – д-р техн. наук, проф.

Заместитель главного редактора

Карасев Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц.

Ответственный секретарь

Галай Марина Сергеевна – канд. техн. наук

Члены редколлегии:

Бессоненко Сергей Анатольевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Воробьев Валерий Степанович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Герасимов Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Герасимов Виталий Владимирович – д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск

Головнич Александр Константинович – д-р техн. наук, доц., БелГУТ, г. Гомель, Белоруссия

Евсеев Дмитрий Геннадьевич – д-р техн. наук, проф., МИИТ, г. Москва

Ильиных Андрей Степанович – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Исаков Александр Леонидович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Караулов Александр Михайлович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Карпущенко Николай Иванович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Комаров Константин Леонидович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Кондратьев Сергей Александрович – д-р техн. наук, ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Королев Константин Валерьевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Корягин Марк Евгеньевич – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Пронозин Яков Александрович – д-р техн. наук, проф., ТИУ, г. Тюмень

Хабаров Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Шахов Сергей Александрович – д-р техн. наук, доц., СГУПС, г. Новосибирск

Шварцфельд Вячеслав Семенович – д-р техн. наук, проф., ПГУПС, г. Санкт-Петербург

Черный Константин Анатольевич – д-р техн. наук, доц., ПНИПУ, г. Пермь

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

Редактор *Е. Е. Рыжкова*

Корректор *А. А. Игумнов* – канд. техн. наук

Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*

Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Сайт журнала:

www.stu.ru (раздел «Научная деятельность»; журнал «Вестник СГУПС»)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-79268 от 02 ноября 2020 г.

FOUNDER

The Siberian Transport University

Editors and Editorial Board

Editor-in-Chief

A. L. Manakov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

A. D. Abramov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

S. V. Karasev, Candidate of Engineering, Associate Professor

Executive Secretary

M. S. Galay, Candidate of Engineering

Editors

S. A. Bessonenko, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. S. Vorobyev, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. I. Gerasimov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. V. Gerasimov, Doctor of Engineering, Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk

A. K. Golovnich, Doctor of Engineering, Associate Professor, Belarusian State University of Transport, Belarus

D. G. Evseev, Doctor of Engineering, Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow

A. S. Ilinykh, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

A. L. Isakov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

A. M. Karaulov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

N. I. Karpuschenko, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

K. L. Komarov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. A. Kondratyev, Doctor of Engineering, IGD SB RAS, Novosibirsk

K. V. Korolev, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

M. E. Koryagin, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

Y. A. Pronozin, Doctor of Engineering, Professor, TIU, Tyumen

V. I. Khabarov, Doctor of Engineering, Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

S. A. Shakhov, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

V. S. Shvartsfeld, Doctor of Engineering, Professor, Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg

K. A. Chernyy, Doctor of Engineering, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm

English Text Reviewer

I. I. Stepachkova, Senior Lecturer

Text Reviewer **E. E. Ryzhkova**

Managing Editor **A. A. Igumnov**, Candidate of Engineering

Layout Designer **Yu. V. Bortsova**

Cover Designer **A. S. Petrenko**

Main contact details

Siberian Transport University

room 307, 191, Dusi Kovalchuk St.

630049, Novosibirsk, Russia

Phone: (383) 328-04-36

Web: <http://www.stu.ru> (Scientific Activity section)

E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

The journal was registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media in 2020.

ISSN: 1815-9265

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям 2.9 «Транспорт» и 2.1 «Строительство и архитектура»

№ 2 (69) · 2024 · АПРЕЛЬ – ИЮНЬ · 16+

Выходит один раз в три месяца. Основан в 1999 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

<i>Гладунов В. А., Бондаренко Е. М.</i> Оценка экономических затрат грузоотправителей на перевозку угля из России в Китай по схеме «железная дорога – река – море» в сравнении с традиционными цепями поставок	5
<i>Мухамедзянова А. И., Величко Д. В., Комардинкин Р. А.</i> Техничко-экономическая эффективность внедрения нагревательных установок в технологию разрядки температурных напряжений в рельсовых плетях	13
<i>Тлявлин Р. М.</i> Волноломы для защиты прижимных участков железных дорог	23
<i>Попова Н. Б., Корягин М. Е., Медведев В. И.</i> Методические аспекты учета и анализа грузовых контейнерных перевозок	33
<i>Ардышев И. К.</i> Продольные деформации рельсовых плетей при рекуперативном торможении поездов в суровых климатических условиях.....	41
<i>Парыгина Д. В., Буровцев В. В.</i> Источники синергии мультимодальных транспортных узлов Дальнего Востока России.....	49
<i>Бунеев В. М., Попова Н. Б., Корягин М. Е.</i> Проблемы организации, функционирования и развития сухих портов в Сибири.....	56
<i>Задорожний В. М., Богачев В. А., Богачев Т. В., Кравец А. С.</i> Геометрическая маршрутизационная модель нахождения рациональных распределений порожних вагонопотоков в припортовой транспортно-технологической системе.....	63
<i>Корнеев М. В., Бурдяк П. С.</i> Анализ существующих и предлагаемых способов размещения и крепления крупнотоннажных контейнеров в универсальных железнодорожных полувагонах	71
<i>Осипов Н. И.</i> Теоретико-игровой подход при выборе оптимальной системы интервального регулирования движения поездов на однопутных железнодорожных линиях	80

Строительство и архитектура

<i>Иванов А. Н., Завьялов Д. М.</i> К вопросу об определении крутильной жесткости элементов несущих конструкций мостовых сооружений.....	89
<i>Разуваев Д. А., Исаков А. Л., Чахлов М. Г.</i> Двухпараметрический температурный критерий начала криогенного влагопереноса для решения задач регулирования влагонакопления промерзающих грунтов	98
<i>Щербаков В. В., Акимов С. С.</i> Совершенствование метода измерения продольной ровности покрытий автомобильных дорог.....	106

Included in the List of peer-reviewed scientific editions, in which the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Sciences, for the degree of Doctor of Sciences should be published, for scientific specialties 2.9 "Transport" and 2.1 "Construction and Architecture"

№ 2 (69) · 2024 · April – June · 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

- V. A. Gladunov, E. M. Bondarenko.* Assessment of the economic costs of shippers for transporting coal from Russia to China using the "railway – river – sea" scheme in comparison with traditional supply chains5
- A. I. Mukhamedzyanova, D. V. Velichko, R. A. Komardinkin.* Technical and economic efficiency of the heating units introduction in the technology of temperature stresses discharge in rail lashes13
- R. M. Tlyavlin.* Breakwaters for the protection of clamping sections of railways.....23
- N. B. Popova, M. E. Koryagin, V. I. Medvedev.* Methodological aspects of accounting and analysis cargo container transportation.....33
- I. K. Ardyshev.* Longitudinal deformations of continuously welded rail track under recuperative braking of trains in inclement climatic conditions41
- D. V. Parygina, V. V. Burovtsev.* Synergy sources of multimodal transport hubs of the Russian Far East49
- V. M. Buneev, N. B. Popova, M. E. Koryagin.* Problems of organization, functioning and development of dry ports in Siberia.....56
- V. M. Zadorozhniy, V. A. Bogachev, T. V. Bogachev, A. S. Kravets.* Geometric routing model in finding rational distributions of empty wagonflows in port transport-technological system 63
- M. V. Korneev, P. S. Burdyak.* Analysis of existing and proposed methods of arrangement and fastening of large-tonnage containers in universal railway gondola cars.....71
- N. I. Osipov.* Game-theoretic approach to selecting the optimal system of train traffic interval regulation on single-track railway lines80

Building and Architecture

- A. N. Ivanov, D. M. Zavyalov* On the issue of determining the torsional stiffness of elements of load-bearing structures of bridge structures.....89
- D. A. Razuvaev, A. L. Isakov, M. G. Chakhlov.* Two-parameter temperature criterion for the onset of cryogenic moisture transfer for solving problems of regulating moisture accumulation in freezing soils98
- V. V. Shcherbakov, S. S. Akimov.* Improving the method for measuring the longitudinal flatness of road surfaces106

TRANSPORT

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 5–12.
The Siberian Transport University Bulletin. 2024. No. 2 (69). P. 5–12.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.212.7
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_5

Оценка экономических затрат грузоотправителей на перевозку угля из России в Китай по схеме «железная дорога – река – море» в сравнении с традиционными цепями поставок

Вадим Алексеевич Гладунов^{1✉}, Екатерина Михайловна Бондаренко²

^{1,2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ gladunov.vadim@mail.ru✉

² kuchkinaem@mail.ru

Аннотация. В результате переориентации грузопотоков на восток и юг на Восточном полигоне железных дорог России возникла проблема недостаточной пропускной способности. Помимо этого, у ряда восточных портов и пограничных переходов наблюдается проблема низкой технической оснащенности. Данные факты говорят о том, что в настоящий момент транспортная система страны не способна полноценно справляться с возросшим объемом перевозок грузов, вследствие чего руководством компании ОАО «РЖД» и Правительством Российской Федерации вводятся ограничения на перевозку некоторых категорий грузов, а также устанавливается приоритетность одного груза над другим.

Долгое время лидирующие позиции по объемам перевозок занимал уголь, сейчас же на первый план выходят товары народного потребления. Угольный сектор, а также связанные с ним сектора экономики понесли большие финансовые потери: предприятия по добыче полезных ископаемых ограничили суточные объемы погрузки из-за несвоевременного вывоза груза, в результате чего пострадали все участники перевозочного процесса: клиенты, транспортные компании, операторы подвижного состава, компания ОАО «РЖД», портовые терминалы и угледобывающие предприятия.

Цель настоящего исследования заключается в сравнении экономических затрат грузоотправителей при перевозке по устоявшимся маршрутам доставки, а также по интенсивно развивающемуся в наши дни направлению – Северному морскому пути.

Для достижения поставленной цели проанализирована актуальность перевозок каменного угля в Китай, произведен расчет экономических затрат на доставку груза по традиционной и мультимодальной схеме с использованием Северного морского пути, на основании расчета сделан вывод о целесообразности перевозки по новой технологии для грузоотправителя.

В результате исследования установлено, что перевозки угля по схеме «железная дорога – река – море» по Северному морскому пути в настоящий момент не привлекательны для грузоотправителя по сравнению с традиционными маршрутами ввиду большой переплаты (в 2,6 раза).

Ключевые слова: транспортная логистика, цепи поставок, товарообмен между Китаем и Россией, перевозка угля, Северный морской путь

Для цитирования: Гладунов В. А., Бондаренко Е. М. Оценка экономических затрат грузоотправителей на перевозку угля из России в Китай по схеме «железная дорога – река – море» в сравнении с традиционными цепями поставок // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 5–12. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_5.

TRANSPORT

Original article

Assessment of the economic costs of shippers for transporting coal from Russia to China using the “railway – river – sea” scheme in comparison with traditional supply chains

Vadim A. Gladunov^{1✉}, Ekaterina M. Bondarenko²

^{1,2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ gladunov.vadim@mail.ru✉

² kuchkinaem@mail.ru

Abstract. As a result of the reorientation of freight flows to the east and south, the problem of insufficient throughput capacity arose on the Eastern range of Russian railways. In addition, a number of eastern ports and border crossings have a problem of low technical equipment. These facts indicate that at the moment the country's transport system is not able to fully cope with the increased volume of cargo transportation, as a result of which the management of the Russian Railways company and the Government of the Russian Federation are introducing restrictions on the transportation of certain categories of cargo, as well as the priority of one cargo over another.

For a long time, coal occupied the leading position in terms of transportation volumes, but now consumer goods are coming to the fore to meet the needs of the population. The coal sector, as well as related sectors of the economy, suffered large financial losses: mining enterprises limited daily loading volumes due to untimely removal of cargo, as a result of which all participants in the transportation process suffered – clients, transport companies, rolling stock operators, Russian Railways, port terminals and coal mining enterprises.

The purpose of this study was to compare the economic costs of shippers when transporting along established delivery routes, as well as along the direction that is rapidly developing today – along the Northern Sea Route.

To achieve this goal, it is necessary to analyze the relevance of transportation of hard coal to China, calculate the economic costs of delivering cargo according to the traditional and multi-modal scheme through the Northern Sea Route, and based on the calculation, draw a conclusion about the feasibility of transportation using a new technology for the shipper.

As a result of the study, it was established that transportation of coal using the “railway – river – sea” scheme via the Northern Sea Route is currently not attractive for the shipper compared to traditional routes due to the large over-payment (2.6 times).

Keywords: transport logistics, supply chains, trade between China and Russia, coal transportation, Northern Sea Route

For citation: Gladunov V. A., Bondarenko E. M. Assessment of the economic costs of shippers for transporting coal from Russia to China using the “railway – river – sea” scheme in comparison with traditional supply chains. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):5–12. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_5.

Введение

Российская Федерация занимает шестое место в мире по добыче угля (435,5 млн т за 2022 г.). Структура добычи угля за 2022 г. представлена на рис. 1 [1].

Россия экспортирует уголь во многие страны мира (рис. 2). Анализируя данные диаграммы, можно сделать вывод, что главным импортером российского угля является Китай. Одной из основных транспортных проблем 2022–2023 гг. является недостаточная пропускная способность железных дорог в сторону восточных портов России для осуществления экспортных отправок угля в Китай. Помимо этого, наблюдается проблема недостаточной технической оснащённости портовых терминалов для перевалки навалочных грузов, пограничных пе-

реходов с Китаем, Монголией и Казахстаном. Для решения данных проблем необходимо развивать новые логистические маршруты между Россией и Китаем, в том числе полностью или частично-исключающие основные перегруженные транспортные звенья в существующих цепях поставок в КНР через Восточный полигон России [2].

Материалы и методы исследования

Существующие цепи поставок угля из Кузбасса в Шанхай [3]. В настоящее время наибольшей популярностью пользуются два варианта технологии поставок угля в Китай:

1. Через дальневосточные порты Владивосток, Восточный, Находка и другие: на Кузбассе полувагоны загружаются углем и, как правило, следуют маршрутными отправлениями до порто-

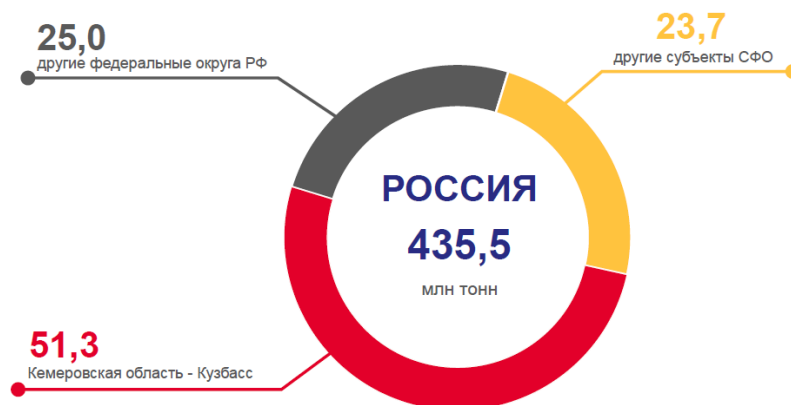


Рис. 1. Структура добычи угля в России за 2022 г., % к итогу

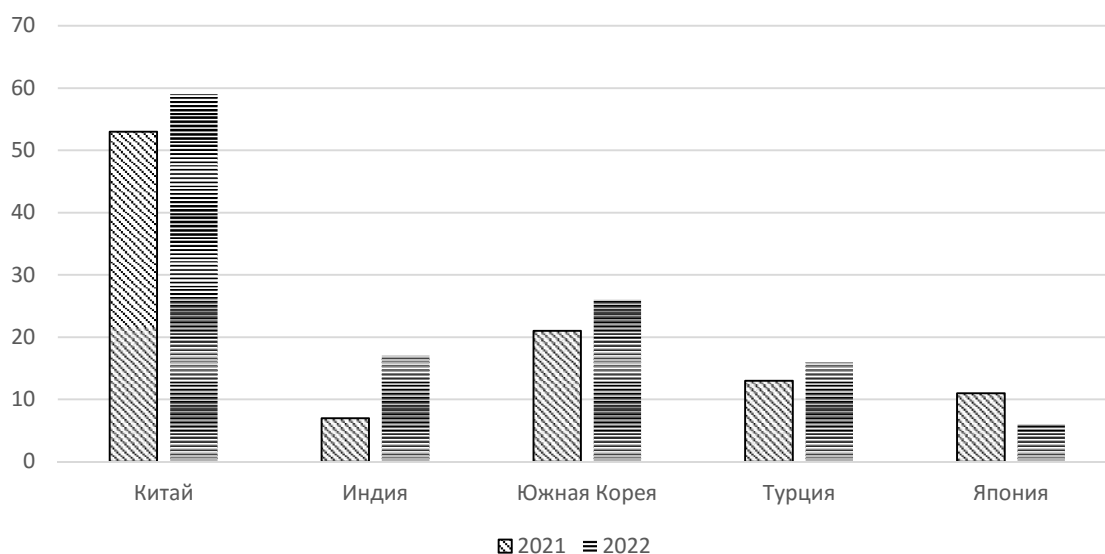


Рис. 2. Экспорт угля из России в отдельные страны (2021–2022 гг.), млн т

вых терминалов. Там осуществляется выгрузка груза на складские площади терминалов или перевалка на морские суда. Далее уголь морскими судами доставляется в Китай. Данная технология является наиболее популярной.

2. Через пограничные переходы Забайкальск – Маньчжурия (Россия – Китай), Наушки – Сухэ-Батор (Россия – Монголия) и другие: на Кузбассе полувагоны загружаются углем и, как правило, следуют маршрутными отправлениями до пограничных переходов. Далее вагоны следуют в Китай.

Предлагаемые цепочки поставок угля из Кузбасса в Шанхай [4]. Предлагается осуществлять доставку угля в Китай через речной порт Красноярск. В рамках данного исследования будет рассмотрен перспективный способ перевозки угля – в крупнотоннажных контейнерах [5]. При возросшем потоке грузов и высокой степени их контейнеризации данное мероприятие поможет снизить количество выбросов угольной пыли на территории Красноярска, которые возникают при открытой перевалке полезных ископаемых и их хранении (контейнер ограничивает попадание пыли в атмосферу).

В Кузбассе контейнеры загружаются углем и, как правило, следуют в составе контейнерных поездов до Красноярска. Там осуществляется выгрузка груза на складские площади терминалов

или его перевалка на речные суда по прямому варианту. Далее уголь речными судами доставляется по Енисею до морского порта Дудинка, где производится перегрузка контейнеров на морские суда. По акватории Северного морского пути осуществляется доставка груза в Китай.

Несмотря на то что в процессе перевозки по предлагаемой технологии возрастает количество перевалок груза, иногда это может являться единственным вариантом вывоза угля с мест добычи и доставки его до клиентов. Дефицит провозных мощностей Восточного полигона осенью 2022 г. оценивался в 140 млн т в год, что ограничивало суточные объемы погрузки угля. Именно поэтому освоение данного направления является перспективным.

Предлагаемая технология задействует в себе три транспортные артерии России: Транссибирскую магистраль, р. Енисей, Северный морской путь, что позволяет активно развивать данные объекты.

Бесспорным преимуществом организации перевозок по данной технологии является сокращение ниток поездов от Красноярска до портов Дальнего Востока. Следовательно, при неизменной пропускной способности Транссибирской магистрали можно увеличить поездопотоки в данном направлении.

Основными проблемами использования р. Енисей в качестве постоянного маршрута

доставки грузов являются ограниченная навигация и низкая пропускная способность русла реки. Морской порт Дудинка начинает принимать речные суда в начале июня. Выход первых судов начинается в конце мая, а последних – в середине октября. Закрывается порт для речного судоходства в начале октября, тогда как среднее течение Енисея – во второй половине октября. Из-за таких особенностей сроки доставки в начале и в конце навигации увеличиваются: первые суда, выходящие в начале навигации из Красноярска, на подходе к Дудинке дожидаются своей очереди на выгрузку, то же самое происходит по окончании навигации, когда слишком много судов прибывает в Дудинку перед закрытием переправы.

Основной проблемой использования Северного морского пути в качестве постоянного маршрута доставки грузов является лед. Период навигации магистрали – июль – октябрь, т. е. всего 2–4 месяца в году. В это время возможно беспрепятственно перевозить грузы судами ледовых классов, а в остальное время – только в сопровождении атомных ледоколов [6]. Следовательно, при задействовании данного пути имеют место дополнительные эксплуатационные и капитальные затраты, а также увеличение сроков доставки грузов до клиентов. В период ограничения навигации поезда вновь будут отправляться по Транссибирской магистрали.

Преимущества и недостатки предлагаемой технологии приведены в табл. 1.

Исходные данные для расчета экономической целесообразности перевозки для грузоотправителя:

- груз – каменный уголь (код ЕТСНГ 161005);
- перевозка осуществляется в 20-футовом контейнере;
- масса груза – 18 т.

Для сравнения денежных затрат от перевозки угля в контейнере спроектированы две цепочки поставок сырья из России в Китай. Логистическая цепь поставки I представлена на рис. 3, поставки II – на рис. 4.

Укрупненно затраты на перевозку угля в контейнерах и погрузочно-разгрузочные работы (ПРР) по маршрутам определяются следующим образом:

– для логистической цепи поставки I

$$P = P_{\text{жд}}^{\text{H-B}} + P_{\text{мор}}^{\text{B-III}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{жд}}^{\text{H-B}}$ – стоимость доставки 20-футового контейнера железнодорожным транспортом от Новокузнецка до Владивостока с учетом выгрузки, р.; $P_{\text{мор}}^{\text{B-III}}$ – стоимость доставки 20-футового контейнера морским транспортом из Владивостока в Шанхай с учетом погрузки, р.;

– для логистической цепи поставки II

$$P = P_{\text{жд}}^{\text{H-K}} + P_{\text{реч}}^{\text{K-D}} + \sum P_{\text{мор}}^{\text{D-III}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{жд}}^{\text{H-K}}$ – стоимость доставки 20-футового контейнера железнодорожным транспортом

Таблица 1

Преимущества и недостатки предлагаемой технологии

Преимущества	Недостатки
1. Активное освоение Северного морского пути (СМП)	1. Высокая вероятность нарушения сроков доставки продукции вследствие еще не отработанной технологии
2. Разгрузка железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона России	2. Продолжительные сроки доставки продукции от поставщика к потребителю в виду ледокольной проводки морских судов с грузом
–	3. Дополнительные затраты на транспортировку (например, ледокольную проводку)
	4. Высокие капитальные вложения в инфраструктуру, речной и ледокольный флот
	5. Ограниченность навигации



Рис. 3. Логистическая цепь поставки I

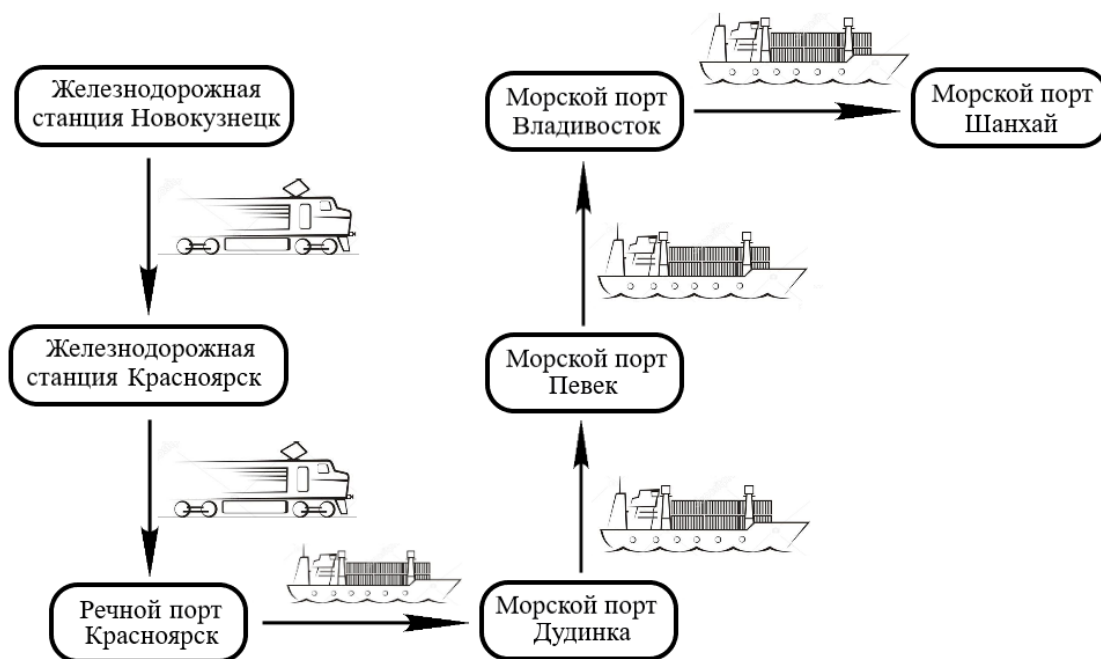


Рис. 4. Логистическая цепь поставки П

от Новокузнецка до Красноярска с учетом выгрузки, р.; $P_{\text{реч}}^{\text{К-Д}}$ – стоимость доставки 20-футового контейнера речным транспортом из Красноярска в Дудинку с учетом погрузки и выгрузки, р.; $\sum P_{\text{мор}}^{\text{Д-Ш}}$ – стоимость доставки 20-футового контейнера морским транспортом из Дудинки в Шанхай с учетом погрузки и выгрузки в перевалочных пунктах, р.

Стоимость доставки 20-футового контейнера морским транспортом из Дудинки в Шанхай складывается из стоимостей доставки груза между промежуточными морскими портами, а также стоимостей погрузочно-выгрузочных операций и определяется как

$$\sum P_{\text{мор}}^{\text{Д-Ш}} = P_{\text{мор}}^{\text{Д-П}} + P_{\text{мор}}^{\text{П-В}} + P_{\text{мор}}^{\text{В-Ш}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{мор}}^{\text{Д-П}}$ – стоимость доставки 20-футового контейнера морским транспортом из Дудинки до Певека с учетом погрузки и выгрузки, р.; $P_{\text{мор}}^{\text{П-В}}$ – стоимость доставки 20-футового контейнера морским транспортом из Певека до Владивостока с учетом погрузки и выгрузки, р.;

$P_{\text{мор}}^{\text{В-Ш}}$ – стоимость доставки 20-футового контейнера морским транспортом из Владивостока до Шанхая с учетом погрузки, р.

Стоимость перевозки 20-футового контейнера по железной дороге определена с помощью сервиса «Расчет стоимости и экологичности грузовых перевозок», размещенного на официальном сайте компании ОАО «РЖД» [7] (табл. 2).

Стоимость перевозки 20-футового контейнера на морских и речном плечах перевозки определена как среднее значение стоимостей, предложенных ведущими транспортными компаниями России, которые осуществляют свою деятельность на рассматриваемых направлениях. Результаты расчетов сведены в табл. 3, 4 [8–11].

Результаты исследования

Результаты расчетов представлены в табл. 5. На основании данной таблицы построены рис. 5 и 6.

Таблица 2

Стоимость перевозки 20-футового контейнера по железной дороге, р.

Направление перевозки	Стоимость перевозки 20-футового контейнера с учетом выгрузки
Новокузнецк – Красноярск	52 142
Новокузнецк – Владивосток	119 365

Таблица 3

Стоимость перевозки 20-футового контейнера, р.

Компания	Фрахт 20-футового контейнера с учетом погрузки и выгрузки
<i>Речной порт Красноярск – морской порт Дудинка</i>	
Транспортная компания «КрасТрансСервис»	190 000
Транспортно-экспедиционная компания «СНГ-Транс»	103 200
Транспортная компания «Трасса экспресс»	130 000
Транспортная компания «Сибирь-РечТранс»	149 000
Транспортная компания «СЕВЕР Спецперевозки»	122 000
<i>Среднее</i>	136 300
<i>Морской порт Певек – морской порт Владивосток</i>	
Транспортная компания «Восток»	269 500
Транспортно-экспедиторская компания ООО «ДВ ТЭК»	331 800
Транспортно-экспедиторская компания ООО «МаринТЭК»	525 000
Транспортная компания ООО «ВолГа Вл»,	515 000
<i>Среднее</i>	410 325
<i>Морской порт Дудинка – морской порт Певек</i>	
Транспортная компания «Универсальная морская компания Арктика»	180 000
<i>Среднее</i>	180 000

Таблица 4

Фрахт 20-футового контейнера на направлении морской порт Владивосток – морской порт Шанхай, долл. США

Компания	Фрахт 20-футового контейнера с учетом погрузки
Транспортная компания «Rail Trust»	2 215
Транспортно-логистическая компания «FESCO»	2 645
Транспортная компания «Юнитрейд»	3 450
Транспортная компания «LT LOGISTIC»	5 500
Экспедиторский сервис «НВ Транс»	4 000
<i>Среднее</i>	3 562
<i>Среднее, р. (1 долл. США = 85,57 р.)</i>	304 800

Таблица 5

Затраты грузоотправителя на перевозку 20-футового контейнера по исследуемым логистическим цепям поставок, р.

Логистическая цепь	Затраты на железнодорожную перевозку и ПРР	Затраты на речную перевозку и ПРР	Затраты на морскую перевозку и ПРР	Всего
I	11 9365	–	304 800	424 165
II	52 142	136 300	895 125	1 083 567

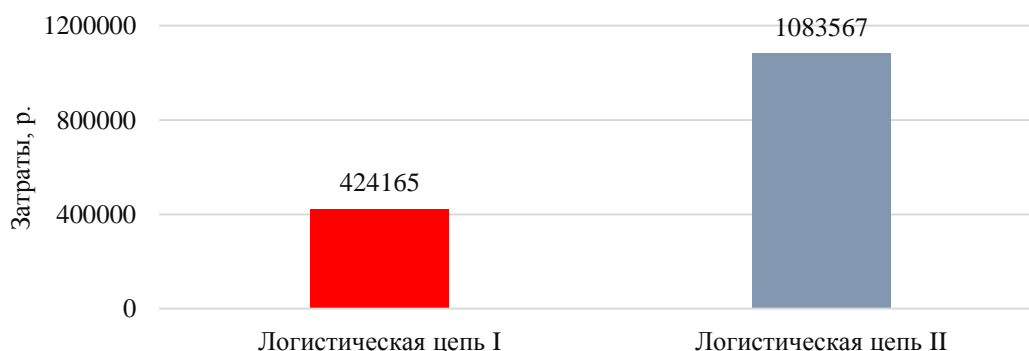
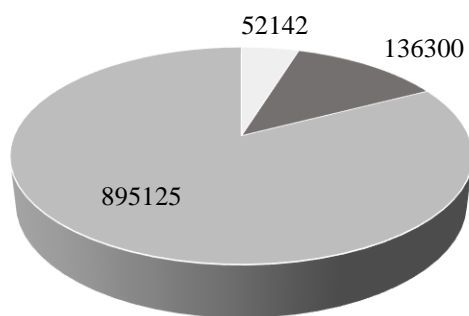


Рис. 5. Затраты грузоотправителя на перемещение 20-футового контейнера по рассматриваемым маршрутам



- Затраты на железнодорожную перевозку
- Затраты на речную перевозку
- Затраты на морскую перевозку

Рис. 6. Затраты грузоотправителя на каждый вид транспорта при перемещении 20-футового контейнера по предлагаемому маршруту

Выводы

Анализируя данные рис. 5, можно сделать следующий вывод: затраты на перевозку 20-футового контейнера по логистической цепи I составляют 424 165 р., по логистической цепи II – 1 083 577 р. Затраты на перевозку 20-футового контейнера из Новокузнецка в Шанхай по Северному морскому пути (логистическая цепь II) в 2,6 раз превосходят затраты на доставку по традиционной схеме (логистическая цепь I). Переплата за пользование новым маршрутом для клиентов составляет как минимум 660 000 р. за контейнер, что является достаточно высоким показателем. В настоящий момент выгоду от осуществления перевозок по предложенному варианту получают следующие участники перевозочного процесса:

1) компания ОАО «РЖД»: в результате использования маршрута по Северному морскому пути число ниток поездов останется прежним только до Красноярска, далее участок от Красноярска до Владивостока или другого восточного порта разгрузится, что позволит увеличить число поездов с востока до Красноярска. Увеличение ниток поездов, в свою очередь, позволяет компании ОАО «РЖД» получить дополнительную прибыль от эксплуатации инфраструктуры общего пользования;

2) угледобывающие предприятия: из-за недостаточной пропускной способности многим угольным компаниям ограничили суточные

объемы погрузки. При внедрении предлагаемого решения угольные потоки можно разделить на три восточных направления, что позволит предприятиям увеличить погрузку: из Кузбасса до Красноярска и далее по Северному морскому пути; из Кузбасса до восточных портов; из Кузбасса через магистраль Абакан – Тайшет и далее до восточных портов;

3) транспортные компании: увеличение количества ниток позволит привлекать большее число клиентов, что повлияет на доходность компаний.

Из данных рис. 6 следует, что наиболее лимитирующим видом транспорта на предлагаемом маршруте является морской. Это объясняется неразвитостью одной из перспективных водных магистралей России – Северного морского пути.

На основании исследования сделан вывод, что перевозки угля по схеме «железная дорога – река – море» с использованием Северного морского пути в настоящий момент не привлекательны для клиента ввиду большой переплаты. Перевозочный процесс может стать выгодным для всех участников лишь при комплексном развитии объектов транспортной инфраструктуры (речных и морских портов, водных и железнодорожных магистралей), что осуществимо лишь при государственно-частном партнерстве с привлечением новых видов грузов.

Список источников

1. Федеральная служба государственной статистики : [официальный сайт]. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 07.07.2023).
2. Поступинская А. В., Поступинская А. В. Восточный полигон и развитие восточных регионов // Вестник транспорта. 2022. № 2. С. 10–14. EDN DTYLHX.
3. Гладунов В. А., Бондаренко Е. М. Выбор оптимальных логистических схем поставок товаров из Китая в Российскую Федерацию при использовании контейнеров // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 15–23. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_15. EDN KHWKOS.
4. РЖД-Партнер.РУ : информационное агентство : [сайт]. URL: <https://www.rzd-partner.ru/> (дата обращения: 08.07.2023).
5. Перевозки угля в контейнерах на платформах АО «ФГК» // Вагоны и вагонное хозяйство. 2021. № 1 (65). С. 9. EDN UHXUAU.
6. ФГБУ Информационный аналитико-статистический центр Росморречфлота» : [официальный сайт]. URL: <http://www.nsra.ru/> (дата обращения: 08.07.2023).
6. ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://company.rzd.ru/> (дата обращения: 09.07.2023).
8. Транспортная компания «КрасТрансСервис» : [сайт]. URL: <https://tkkts.ru/> (дата обращения: 09.07.2023).
9. Дальневосточная транспортно-экспедиторская компания : [сайт]. URL: <https://www.dvtek.ru/> (дата обращения: 10.07.2023).
10. АО «Универсальная морская компания Арктика» : [сайт]. URL: <https://umcshipping.ru/> (дата обращения: 11.07.2023).
11. FESCO : [сайт]. URL: <https://www.fesco.ru/> (дата обращения: 13.07.2023).

References

1. Federal State Statistics Service: [official website]. (In Russ.). URL: <https://rosstat.gov.ru/>.
2. Postupinskaya A. V., Postupinskaya A. V. Eastern training ground and development of eastern regions. *Transport Messenger*. 2022;(2):10–14. EDN DTYLHX. (In Russ.).
3. Gladunov V. A., Bondarenko E. M. The choice of optimal logistics schemes for the supply of goods from China to the Russian Federation using containers. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):15–23. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_15. EDN KHWKOS. (In Russ.).
4. Information agency RZD-PARTNER.RU: [site]. (In Russ.). URL: <https://www.rzd-partner.ru/>.
5. Transportation of coal in containers on the platforms of AO FGK. *Wagons and Wagon Economy*. 2021;(65):9. EDN UHXUAU. (In Russ.).
6. Federal State Budgetary Institution. The Information Analytical and Statistical Center of Rosmorrechflot: [official site]. (In Russ.). URL: <http://www.nsra.ru/>.
7. Russian Railways: [official website]. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/>.
8. KrasTransService Transportation Company: [official site]. (In Russ.). URL: <https://tkkts.ru/>.
9. Far Eastern transport-forwarding company: [official website]. (In Russ.). URL: <https://www.dvtek.ru/>.
10. AO Universal Maritime Company Arctic: [official site]. (In Russ.). URL: <https://umcshipping.ru/>.
11. Far-Eastern Shipping Company: [official site]. (In Russ.). URL: <https://www.fesco.ru/>.

Информация об авторах

В. А. Гладунов – студент 5-го курса факультета «Управление процессами перевозок» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Е. М. Бондаренко – доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

V. A. Gladunov – fifth-year student, Management of Transportation Processes Faculty, Siberian Transport University.

E. M. Bondarenko – Associate Professor of the Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 17.09.2023; одобрена после рецензирования 11.12.2023; принята к публикации 25.03.2024.

The article was submitted 17.09.2023; approved after reviewing 11.12.2023; accepted for publication 25.03.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 625.143
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_13

Технико-экономическая эффективность внедрения нагревательных установок в технологию разрядки температурных напряжений в рельсовых плетях

Алина Ильдаровна Мухамедзянова¹, Дмитрий Валерьевич Величко^{2✉},
Роман Алексеевич Комардинкин³

^{1,2,3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ mukhamedzyanova.a@yandex.ru

² vdv.nsk@mail.ru✉

³ roma-novosib@mail.ru

Аннотация. Бесстыковые рельсовые плети являются основным элементом типовой бесстыковой конструкции железнодорожного пути. Разрядка температурных напряжений в таких плетях – одна из распространенных и трудоемких операций в путевом хозяйстве ОАО «РЖД».

В настоящее время известны два основных вида технологических процессов: с использованием гидравлического натяжного устройства (ГНУ); ГНУ и нагревательных установок (съёмных односторонних нагревательных установок).

Определены четыре основных парных варианта технологии разрядки температурных напряжений рельсовых плетей для дальнейшего технико-экономического анализа результатов по ряду технологических и экономических показателей: с применением ГНУ (КБ-65, ЖБР-65); ГНУ (ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР); ГНУ и нагревательных установок (КБ-65, ЖБР-65); ГНУ и нагревательных установок (ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР). Разработана методика определения и оценки технико-экономических показателей технологий, учитывающая ряд факторов: расходы на оплату труда работников, на топливо, на годовое техническое обслуживание оборудования, средние расходы по предоставлению «окон».

Внедрение нагревательных установок в технологию разрядки температурных напряжений в бесстыковых плетях обладает высокой технологической эффективностью; так, снижение времени «окна» составило до 16,7 %, трудозатрат – до 4 %, также уменьшаются размеры оплаты труда и средняя стоимость проведения «окна». Снижение общих экономических расходов по данной технологии составляет до 42 %, и в перспективе эта технология может успешно заменить существующие в настоящее время в путевом хозяйстве ОАО «РЖД» аналогичные технологии.

Ключевые слова: железнодорожный путь, бесстыковая плеть, эффективность, нагрев, технология, разрядка напряжений, рельсовое скрепление

Для цитирования: Мухамедзянова А. И., Величко Д. В., Комардинкин Р. А. Технико-экономическая эффективность внедрения нагревательных установок в технологию разрядки температурных напряжений в рельсовых плетях // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 13–22. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_13.

TRANSPORT

Original article

Technical and economic efficiency of the heating units introduction in the technology of temperature stresses discharge in rail lashes

Alina I. Mukhamedzyanova¹, Dmitry V. Velichko^{2✉}, Roman A. Komardinkin³

^{1,2,3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ mukhamedzyanova.a@yandex.ru

² vdv.nsk@mail.ru✉

³ roma-novosib@mail.ru

Abstract. Seamless rail lashes are the main element of a typical seamless railway track construction. The discharge of thermal stresses in seamless lashes is one of the most common and labour-intensive operations in the track facilities of Russian Railways.

Currently, two main types of technological processes are known, using: hydraulic tension device (GNU); GNU and heating units (removable heating units that have recently begun to be used).

Four main paired options for the technology of discharging thermal stresses of rail lashes were identified for further technical and economic analysis of the results for a number of technological and economic indicators: with the use of HPU (KB-65, JBR-65); GNU (JBR-65SH, JBR-65PSHM, JBR-65PSHR); GNU and heating units (KB-65, JBR-65); GNU and heating units (JBR-65SH, JBR-65PSHM, JBR-65PSHR). A methodology has been developed for determining and evaluating the technical and economic indicators of technologies, taking into account a number of factors: labour costs for employees, fuel costs, annual equipment maintenance costs, average costs for providing "windows".

The introduction of heating units into the technology of discharging thermal stresses in seamless lashes has a high technological efficiency than existing technologies, so the reduction in the "window" time was up to 16.7 %, and the reduction in labour costs was up to 4 %, and the amount of payment is also reduced labour and the average cost of holding a "window". The reduction in the total economic costs of the technology for discharging thermal stresses of seamless lashes due to the introduction of heating units is up to 42 %, and in the future these technologies can successfully replace similar technologies currently existing in the track facilities of Russian Railways.

Keywords: railway track, seamless track, efficiency, heating, technology, voltage discharge, rail fastening

For citation: Mukhamedzyanova A. I., Velichko D. V., Komardinkin R. A. Technical and economic efficiency of the heating units introduction in the technology of temperature stresses discharge in rail lashes. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):13–22. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_13.

Введение

Путевое хозяйство является одной из основных отраслей железнодорожного транспорта, его работники выполняют техническое обслуживание железнодорожного пути. Для дальнейшего увеличения эффективности и качества его обслуживания необходим постоянный поиск, а также внедрение новых технических и технологических решений с последующим совершенствованием организации и технологии путевых работ.

Разрядка температурных напряжений в рельсовых плетях необходима для снятия излишних температурных напряжений, возникающих в том числе вследствие несоответствия фактической температуры закрепления плети нормативной оптимальной температуре закрепления [1]. Реализация технологии разрядки позволяет перезакрепить плеть в оптимальный температурный интервал и получить значения и распределения напряжений, при которых обеспечивается прочность и устойчивость бесстыковой плети на протяжении всего периода эксплуатации.

Одним из элементов механизации, внедряемых в работы по разрядке температурных напряжений в рельсовых плетях, являются устройства для принудительного ввода рельсовых плетей в оптимальную температуру закрепления, в том числе одноконтурные нагревательные установки. Эта технология только начинает применяться в путевом хозяйстве ОАО «РЖД», и вопрос уточнения показателей технико-экономической эффективности внедрения таких установок является актуальным [2–4].

Материалы и методы исследования

Современными технологическими процессами по разрядке температурных напряжений в рельсовых плетях, разработанными проектно-конструкторскими бюро и утвержденными ОАО «РЖД», являются технологии с применением:

- гидравлического натяжного устройства (ГНУ) [5];
- ГНУ и нагревательных установок [6].

Типовые технологические процессы были уточнены с приведением их к единым эксплуатационным условиям. Кроме того, дополнительно были скорректированы технологические процессы для нескольких наиболее распространенных на Российских железных дорогах типов промежуточных рельсовых скреплений (ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР) [7] в единых с типовыми техпроцессами эксплуатационных условиях. Сравнение технологических процессов велось при фронте работ, равном 800 м рельсовой плети.

В итоге подробно рассмотрены четыре основных варианта технологии разрядки температурных напряжений рельсовых плетей с применением:

- 1) ГНУ со скреплениями КБ-65, ЖБР-65;
- 2) ГНУ со скреплениями ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР;
- 3) ГНУ и нагревательных установок со скреплениями КБ-65, ЖБР-65;
- 4) ГНУ и нагревательных установок со скреплениями ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР.

В результате сравнительной оценки дополнительно разработанных и уточненных типовых технологических процессов был проведен анализ результатов по ряду технологических и технико-экономических показателей.

Результаты исследования

Сравнительный анализ технологических процессов разрядки температурных напряжений по ряду параметров приведен в табл. 1.

Одним из главных достоинств использования одноконтурной нагревательной установки

РН-20.01 является равномерный нагрев с температурой горения пламени 650–700 °С, которому подвергается вся поверхность рельса, а не отдельная его часть. Это позволяет сохранить технические свойства рельса, также отсутствует негативное влияние на промежуточные рельсовые крепления.

Сравнительный анализ четырех вариантов технологии разрядки температурных напряжений по затратам труда представлен на рис. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ технологических параметров

Параметр	Разрядка с использованием ГНУ (варианты 1 и 2)	Разрядка с использованием ГНУ и нагревательных установок (варианты 3 и 4)
Требования к ВСП	Рельсы типа Р65 сварены в рельсовую плетть длиной до 800 м. Уравнительные рельсы длиной 12,5 м. Накладки в уравнительных пролетах шестидырные. Скрепления подкладочные типа КБ-65, ЖБР-65ПШ (либо бесподкладочные ЖБР--5, ЖБР-65Ш). Шпалы железобетонные, балласт щебеночный	
Производственный состав исполнителей работ*	Руководитель работ по должности не ниже заместителя или главного инженера дистанции пути. Дорожный мастер по планово-предупредительным работам – 1 чел. Бригадир пути – 1 чел. Монтеры пути – 24 чел.	Руководитель работ по должности не ниже заместителя или главного инженера дистанции пути. Дорожный мастер по планово-предупредительным работам – 1 чел. Бригадир пути – 1 чел. Монтеры пути – 20 чел. + операторы нагревательной установки
Технико-экономические показатели: общая продолжительность работ в «окно»	При скреплении КБ-65, ЖБР-65 – 3 ч 00 мин (вариант 1). При скреплении ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР – 2 ч 40 мин (вариант 2)	При скреплении КБ-65, ЖБР-65 – 2 ч 30 мин (вариант 3). При скреплении ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР – 2 ч 20 мин (вариант 4)
затраты труда (без учета сигналистов)	При скреплении КБ-65, ЖБР-65 – 2 080,90 чел.-мин (вариант 1). При скреплении ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШ – 2 013,25 чел.-мин (вариант 2)	При скреплении КБ-65, ЖБР-65 – 2 008,04 чел.-мин (вариант 3). При скреплении ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШ – 1 932,58 чел.-мин (вариант 4)

* В состав исполнителей не входят сигналисты для ограждения места работ. Их количество определяется в зависимости от местных условий и требований [8].

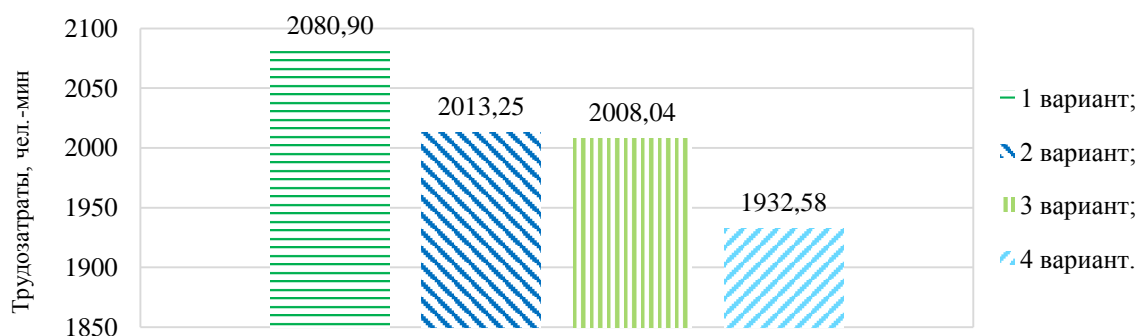


Рис. 1. Сравнительный анализ по затратам труда

В результате расчетов определено снижение трудозатрат:

– по варианту 4 меньше, чем по варианту 2, на 4,0 % (на 80,67 чел.-мин);

– по варианту 3 меньше, чем по варианту 1, на 3,5 % (на 72,86 чел.-мин).

Сравнительный анализ вариантов технологий (фронт работ 800 м) по продолжительности работ в «окно» представлен в табл. 2.

Снижение времени работ в «окно» составило:

– по варианту 4 меньше, чем по варианту 2, на 6,3 % (на 20 мин);

– по варианту 3 меньше, чем по варианту 1, на 16,7 % (на 30 мин).

Экономические расходы для выполнения работ по разрядке температурных напряжений в рельсовых плетях составляют

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{фот}} + \mathcal{E}_{\text{топ}} + \mathcal{E}_{\text{то}} + \mathcal{E}_{\text{ок.ср}}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{\text{фот}}$ – расходы на оплату труда работников (на одно «окно»), тыс. р.; $\mathcal{E}_{\text{топ}}$ – расходы на топливо (на одно «окно»), тыс. р.; $\mathcal{E}_{\text{то}}$ – расходы годового технического обслуживания оборудования (на одно «окно»), тыс. р.; $\mathcal{E}_{\text{ок.ср}}$ – средние расходы по предоставлению «окна», тыс. р. [9, 10].

Для эксплуатации любого из устройств по вводу плетей в оптимальный температурный интервал необходим обслуживающий персонал, который будет выполнять подготовительные работы, следить за работой устройств в период основных работ и проводить заключительные работы.

Для каждого устройства на весь технологический процесс необходимо разное количество персонала (см. табл. 1).

Фонд оплаты труда работников

$$\mathcal{E}_{\text{фот}i} = (OT_i + \Pi_i + \mathcal{D}B_i + PK_i + \mathcal{P}B_i)t_{\text{ок}}, \quad (2)$$

где OT – оплата труда за один час работы, р.; Π – размер премии, р.; $\mathcal{D}B$ – доплата за вредность, р.; PK – районный коэффициент, р.; $\mathcal{P}B$ – прочие дополнительные выплаты, р.; $t_{\text{ок}}$ – продолжительность «окна», ч.

Состав исполнителей работ для четырех вариантов технологии представлен в табл. 3.

Оплата труда за 1 ч работы

$$OT = n_{\text{раб}} r_i, \quad (3)$$

где $n_{\text{раб}}$ – количество работников; r_i – часовая тарифная ставка работника (3-й разряд – 109,47 р., 4-й разряд – 126,93 р., 5-й разряд – 142,38 р.).

Размер максимальной премии (110 %):

$$\Pi = OT \cdot 1,1. \quad (4)$$

Доплата за вредность составляет 4 % от заработной платы:

$$\mathcal{D}B = OT \cdot 0,04. \quad (5)$$

Районный коэффициент для ПЧ Т. составляет 30 %:

$$PK = OT \cdot 0,3. \quad (6)$$

Прочие дополнительные выплаты начисляются за различные производственные факторы:

$$\mathcal{P}B = OT k_i, \quad (7)$$

где k_i – прочие выплаты (для монтеров пути составляют максимально 30 %).

Расчеты с учетом числа исполнителей 3–5-го разрядов приведены в табл. 4.

Таблица 2

Сравнение технологических процессов по времени «окна»

Скрепление	Разрядка с использованием ГНУ (варианты 1 и 2)	Разрядка с использованием ГНУ и нагревательной установки (варианты 3 и 4)
КБ-65, ЖБР-65	3 ч 00 мин (вариант 1)	2 ч 30 мин (вариант 3)
ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР	2 ч 40 мин (вариант 1)	2 ч 20 мин (вариант 4)

Таблица 3

Состав исполнителей работ

Категория персонала	Варианты ввода плетей в оптимальный температурный интервал	
	1 и 2	3 и 4
Монтер пути	24 чел. (из них 3-й разряд – 4 чел., 4-й разряд – 8 чел., 5-й разряд – 12 чел.)	20 чел. + операторы нагревательной установки (из них 3-й разряд – 4 чел., 4-й разряд – 6 чел., 5-й разряд – 11 чел.)
Сигналист	Минимум 2 чел.*	

* Количество сигналистов определяется местными условиями [8].

Так как при различных вариантах технологии требуется разное время «окна» (см. табл. 2), определено сокращение размера оплаты труда:

– по варианту 4 меньше, чем по варианту 2, на 31 % (на 5,47 тыс. р.);

– по варианту 3 меньше, чем по варианту 1, на 37 % (на 7,04 тыс. р.).

Стоимость топлива (на одно «окно»)

$$\mathcal{E}_{\text{топ } i} = z g t_{\text{ок}} k_{\text{н}}, \quad (8)$$

где z – расход топлива за 1 ч, л; g – цена топлива (газа – 20,5), р./л; $k_{\text{н}}$ – количество нагревательных установок, используемых в одно «окно».

При работе ГНУ топливо не используется, но требуется гидравлическое масло для работы гидравлической системы. Объем гидравлических цилиндров составляет 3–5 л в зависимости от типа ГНУ. Необходимое количество масла в год не превышает 5 л.

Таким образом, можно принять, что $\mathcal{E}_{\text{топ } 1,2 \text{ вар}} = 0$ тыс. р.

Нагревательные установки работают на газе (пропане), расход 20 кг/ч.

Объем потребляемого газа (пропана) за 1 ч работы составляет

$$V = m/\rho, \quad (9)$$

где m – масса потребляемого газа ($m = 20$ кг); ρ – плотность жидкой фазы пропана при температуре 0 °С ($\rho = 529,7$ кг/м³).

Масса пропана в полностью заправленном баллоне (с соблюдением мер техники безопасности) составляет не более 40 л, т. е. одного полного баллона хватает на 1 ч работы нагревательной установки.

Стоимость газа для нагревательной установки на одно «окно»

$$\mathcal{E}_{\text{топ } 3,4 \text{ вар}} = 40 \cdot 20,5 \cdot 1 \cdot 4 = 3\,280 \text{ р.} = 3,28 \text{ тыс. р.}$$

Стоимость оборудования и проведения годового технического обслуживания представлена в табл. 5.

Годовое техническое обслуживание по вариантам 3 и 4 обходится дешевле, чем по вариантам 1 и 2: экономия составляет 79,80 тыс. р. в год.

Расходы, обусловленные предоставлением «окон»,

$$\mathcal{E}_{\text{ок } i \text{ вар}} = K_1 \mathcal{E}_{\text{ок1}} + K_2 \mathcal{E}_{\text{ок2}} + K_3 \mathcal{E}_{\text{ок3}}, \quad (10)$$

где K_1, K_2, K_3 – количество «отрицательных» плетей, подверженных перезакреплению, с температурой закрепления –30...–15 °С (например, на 2023 г. в ПЧ Т. – 6 шт.), –15...0 °С (в ПЧ Т. –

Таблица 4

Оплата труда исполнителей работ за 1 ч работы, р.

Статья расходов	Варианты технологии					
	1 и 2			3 и 4		
	3-й разряд	4-й разряд	5-й разряд	3-й разряд	4-й разряд	5-й разряд
Оплата труда	437,88	1 015,44	1 708,56	437,88	761,58	1 566,18
Премия	481,67	1 116,98	1 879,42	481,67	837,74	1 722,80
Доплата за вредность	17,52	40,62	68,34	17,52	30,46	62,65
Районный коэффициент	131,36	304,63	512,57	131,36	228,47	469,85
Прочие выплаты	131,36	304,63	512,57	131,36	228,47	469,85
<i>Итого</i>	1 199,79	2 782,31	4 681,45	1 199,79	2 086,73	4 291,33
<i>Всего</i>	8 663,55			7 577,85		

Таблица 5

Стоимость оборудования и технического обслуживания

Показатель	Варианты технологии	
	1 и 2	3 и 4
<i>Капитальные расходы</i>		
Расходы на покупку оборудования $\mathcal{E}_{\text{об}}$, тыс. р.	1 724,9	207,6*
<i>Эксплуатационные расходы</i>		
Стоимость ремкомплектов, тыс. р.	7,3	2,5
Стоимость проведения ТО, тыс. р.	56,25	150,0
Количество проведения ТО в год, шт.	4	1
Расходы на годовое техническое обслуживание оборудования $\mathcal{E}_{\text{то}}$, тыс. р.	232,3	152,5

* Данная стоимость предполагает, что одноконтурные нагревательные установки всегда работают в паре с ГНУ, которое было куплено отдельно.

23 шт.), 0...+25 °С (в ПЧ Т. – 28 шт.) соответственно; $\mathcal{E}_{ок1}$, $\mathcal{E}_{ок2}$, $\mathcal{E}_{ок3}$ – затраты на проведение плановых «окон» по вводу рельсовых плетей в оптимальный интервал температур, с начальной температурой закрепления –30...–15, –15...0, 0...+25 °С соответственно, р.

Затраты на проведение перезакрепления представлены в табл. 6.

Согласно [6] при самостоятельном вводе рельсовых плетей в оптимальный температурный интервал с помощью ГНУ существует условная зависимость между количеством «окон» и интер-

валом температур перезакрепления: в одно «окно» – от 0 до +25 °С; в два «окна» – от –15 до 0 °С; в три «окна» – от –30 до –15 °С.

Сравнение технологий по средним расходам на предоставление «окна» $\mathcal{E}_{ок}$ и годовым расходам на примере ПЧ Т. приведено на рис. 2.

Средняя стоимость проведения одного планового «окна»

$$\mathcal{E}_{ок.ср\ i\ вар} = \frac{K_1 \mathcal{E}_{ок1} + K_2 \mathcal{E}_{ок2} + K_3 \mathcal{E}_{ок3}}{K_{общ}}, \quad (11)$$

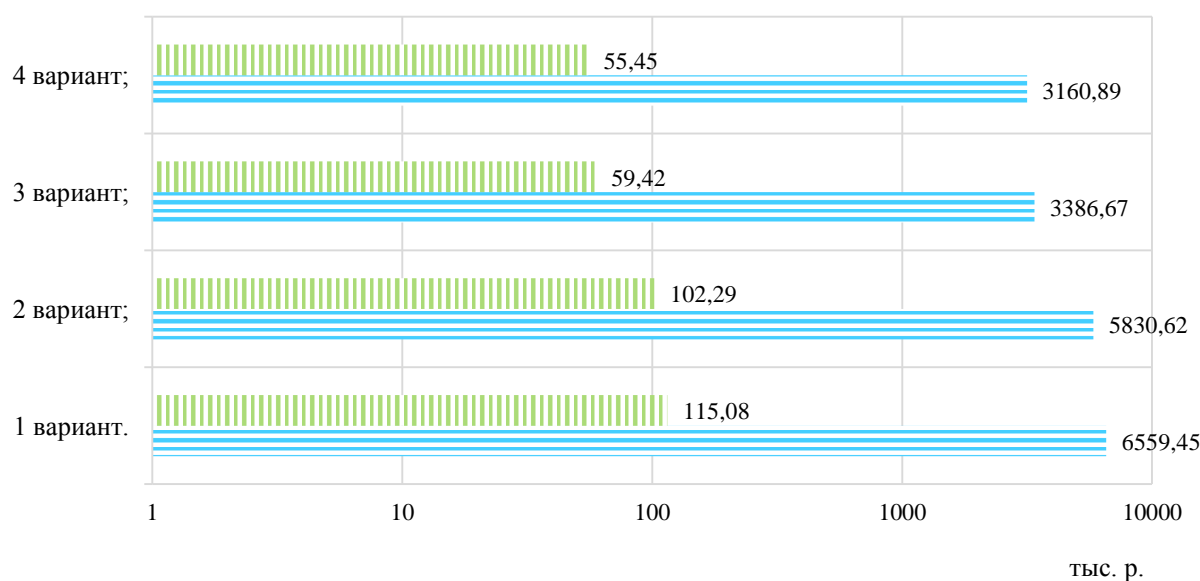
где $K_{общ}$ – общее количество плетей, подверженных перезакреплению в расчетном году, шт.

Таблица 6

Затраты на проведение работ по перезакреплению плетей

Показатель	Вариант технологии							
	1			2			3	4
Стоимость проведения одного планового «окна» по перезакреплению, р.	71 298			63 376			59 415	55 454
Необходимое количество «окон» для ввода «отрицательных» плетей в оптимальный температурный интервал, шт.	1	2	3	1	2	3	1	1
Затраты на проведение плановых «окон» по вводу рельсовых плетей в оптимальный интервал температур $\mathcal{E}_{окi}$, р.	71 298	142 597	213 895	63 376	126 753	190 129	59 415	55 454

Примечание. Стоимость проведения одного планового «окна» продолжительностью 2 ч по перезакреплению – 47 532,23 р.



|| – средняя стоимость проведения одного планового «окна» по перезакреплению при створовой системе $\mathcal{E}_{ок.ср}$, тыс. р.;

– – расходы, обусловленные предоставлением «окон» в 2023 г. $\mathcal{E}_{ок}$, тыс. р.

Рис. 2. Расходы на предоставление «окон» в 2023 г.

На примере ПЧ Т. ($K_{\text{общ}} = 57$ шт.) определено сокращение средней стоимости проведения одного планового «окна»:

– по варианту 4 меньше, чем по варианту 2, на 54 % (на 46,84 тыс. р.);

– по варианту 3 меньше, чем по варианту 1, на 52 % (на 55,66 тыс. р.).

Сравнение экономических расходов на проведение работ

Основные экономические расходы (табл. 7) вычислены по формуле (1), и определено сокращение расходов:

– по варианту 4 меньше, чем по варианту 3, на 1 % (на 1,29 тыс. р.);

– по варианту 4 меньше, чем по варианту 2, на 61 % (на 140,11 тыс. р.);

– по варианту 3 меньше, чем по варианту 1, на 61 % (на 141,68 тыс. р.);

– по варианту 2 меньше, чем по варианту 1, на 1 % (на 2,86 тыс. р.).

В 2023 году по ПЧ Т. планируется переукрепить 57 плетей общей протяженностью 18,56 км.

Годовые расходы на выполнение работ по разрядке температурных напряжений в рельсовых плетях

$$\mathcal{E}_{\text{год } i \text{ вар}} = (\mathcal{E}_{\text{ФОТ}} + \mathcal{E}_{\text{ТОП}})K_{\text{общ}} + \mathcal{E}_{\text{ТО}} + \mathcal{E}_{\text{ок } i \text{ вар}}, \quad (12)$$

где $K_{\text{общ}}$ – общее количество плетей, которые необходимо переукрепить в 2023 г. (в Т. дистанции пути – 57 шт.).

В соответствии с данными табл. 2 и 4 по формуле (2) определены расходы на оплату труда (рис. 3).

Сравнение технологий ввода плетей в оптимальный температурный интервал по общим экономическим расходам $\mathcal{E}_{i \text{ вар}}$ выполнено на рис. 4.

Таблица 7

Сравнение основных экономических расходов, тыс. р.

Показатель	Вариант технологии			
	1	2	3	4
Капитальные расходы				
Расходы на покупку оборудования $\mathcal{E}_{об}$	1 724,90		207,60*	
Эксплуатационные расходы				
Расходы на годовое техническое обслуживание оборудования $\mathcal{E}_{ТО}$	232,30		152,50	
Расходы на техническое обслуживание оборудования $\mathcal{E}_{ТО}$ на одно «окно» (в ПЧ Т.)	4,07		2,68	
Расходы на необходимое количество топлива $\mathcal{E}_{топ}$ на одно «окно»	0		3,28	
Расходы на оплату труда работников $\mathcal{E}_{ФОТ}$ за одно «окно»	25,99	23,13	18,95	17,66
Расход по средней стоимости проведения одного «окна» $\mathcal{E}_{ок.ср}$	115,08	102,29	59,42	55,45
Итого	145,14	129,49	84,33	79,07

* Одноточные нагревательные установки всегда работают в паре с ГНУ, которое покупается отдельно.

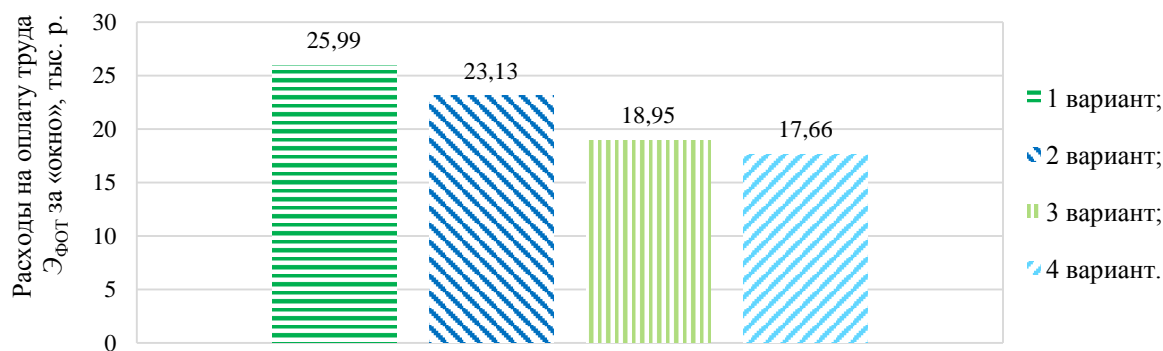


Рис. 3. Расходы на оплату труда работников в «окно»

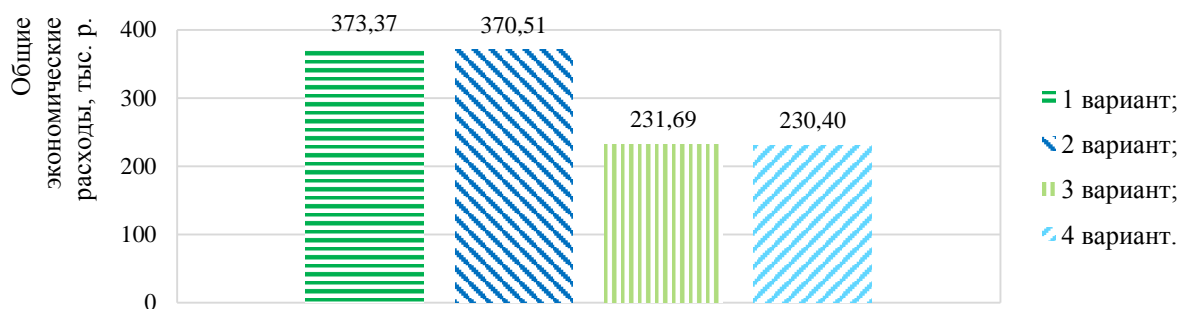


Рис. 4. Общие экономические расходы

Выводы

По результатам проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Проанализированы и приведены к единым эксплуатационным условиям существующие в настоящее время в путевом хозяйстве ОАО «РЖД» технологии разрядки температурных напряжений в бесстыковых плетях (фронт работ 800 м), в том числе уточнены четыре типовых технологических процесса (для скреплений КБ-65, ЖБР-65).

2. Определены четыре основных парных варианта технологии разрядки температурных напряжений рельсовых плетей для дальнейшего технико-экономического анализа результатов по ряду технологических и экономических показателей:

- 1) с применением ГНУ (КБ-65, ЖБР-65);
- 2) с применением ГНУ (ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР);
- 3) с применением ГНУ и нагревательных установок (КБ-65, ЖБР-65);
- 4) с применением ГНУ и нагревательных установок (ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР).

3. Разработана методика определения и оценки технико-экономических показателей технологии разрядки температурных напряжений в бесстыковых плетях, учитывающая ряд факторов: расходы на оплату труда работников (в том числе оплата труда за 1 ч работы, продолжительность «окна», размер премии, доплата за вредность, районный коэффициент, прочие дополнительные выплаты), расходы на топливо, расходы на годовое техническое обслуживание оборудования (в том числе стоимость ремкомплектов, проведения ТО, количество проведе-

ния ТО в год), средние расходы по предоставлению «окон» (в том числе затраты на задержку поездов, особенности предоставления «окон»).

4. Технология разрядки температурных напряжений в бесстыковых плетях с односторонними нагревательными установками, при реализации на скреплениях ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР (вариант 4), в сравнении со скреплениями КБ-65, ЖБР-65 (вариант 3) более эффективна: снижает время «окна» на 6,7 % (10 мин) и трудозатраты на 3,8 %.

5. Технологии разрядки температурных напряжений в бесстыковых плетях внедрением нагревательных установок (варианты 3 и 4) обладают более высокой технологической эффективностью, чем существующие технологии, парные им по типу скреплений (варианты 1 и 2); так, снижение времени «окна» составило 16,7 и 6,3 % соответственно, а снижение трудозатрат – 3,5 и 4 %.

6. Применение нагревательных установок (варианты 3 и 4) приводит к сокращению размера оплаты труда в сравнении с существующими технологиями (вариантами 1 и 2) на 37 и 31 % соответственно, сокращению средней стоимости проведения одного «окна» на 52 и 54 %.

7. В ходе исследования выявлено, что внедрение односторонних нагревательных установок РН-20.01 в технологию разрядки температурных напряжений в бесстыковых плетях обладает высокой технико-экономической эффективностью (снижение общих экономических расходов составляет 42 %) и в перспективе технологии с нагревательными установками могут успешно заменить существующие в настоящее время в путевом хозяйстве ОАО «РЖД» аналогичные технологии.

Список источников

1. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2544р от 14.12.2016 : (редакция от 19.10.2020). Москва : Инфра-М, 2017. 177 с.
2. Викторов С. Ремонт при любой погоде // Железнодорожник Поволжья. 2021. 25 дек. С. 7.
3. Бахтияров Э. М. Обзор технологий по вводу рельсовых плетей бесстыкового пути в оптимальный температурный интервал закрепления плетей // Наука и образование транспорта. 2019. № 2. С. 132–135.
4. Гибадуллин Р. А. Опыт работы применения машин для нагрева рельсовых плетей при их вводе в оптимальную температуру закрепления с одновременной приваркой машиной ПРСМ // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2013. Т. 6, № 6. С. 101–104.
5. Руководство по эксплуатации агрегата натяжного гидравлического для рельсовых плетей / АО «Кубаньжелдормаш». Армавир, 2018. 24 с.
6. Руководство по эксплуатации одноплеточной нагревательной установки для рельсовых плетей РН-20.01 / ООО «Подъемтрансмаш». Москва, 2020. 40 с.
7. Анализ технического состояния бесстыкового пути на Западно-Сибирской железной дороге / Д. В. Величко, Д. Г. Шелемetyев, Е. С. Антерейкин, А. А. Николаенко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3. С. 5–11.
8. Инструкция по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2540р : (редакция от 20.04.2022). Москва, 2019. 208 с.
9. Величко Д. В., Карюкин М. А. Анализ структуры технико-экономических затрат по видам восстановления целостности плети бесстыкового пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1. С. 102–108.
10. Щепотин Г. К., Величко Д. В., Славиковская Э. А. Технико-экономическая оценка эффективности бесстыкового пути в условиях Сибири : методические указания для курсового и дипломного проектирования. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2006. 53 с.

References

1. Instructions on the arrangement, laying, maintenance and repair of the seamless track. Approved by the Order Russian Railways No. 2544r of 14.12.2016: (version of 19.10.2020). Moscow: Infra-M; 2017. 177 p. (In Russ.).
2. Viktorov S. Repair in any weather. *Railwayman of the Volga region*. 2021. 25 Dec. P. 7. (In Russ.).
3. Bakhtiyarov E. M. Overview of technologies for the introduction of rail lashes of a seamless track into the optimal temperature interval for fixing the lashes. *Science and Education to Transport*. 2019;(2):132–135. (In Russ.).
4. Gibadullin R. A. Experience in the use of machines for heating rail lashes when they are brought into the optimal temperature of fastening with simultaneous welding by the track welding machine. *Implementation of modern designs and advanced technologies in track facilities*. 2013;6(6):101–104. (In Russ.).
5. Operating manual of the hydraulic tensioning unit for rail lashes. AO Kubanzheldormash. Armavir; 2018. 24 p. (In Russ.).
6. Operating manual for a single-filament heating installation for rail lashes RN-20.01. ООО Podymtransmash. Moscow; 2020. 40 p. (In Russ.).
7. Velichko D. V., Sheremetyev D. G., Antereykin E. S., Nikolaenko A. A. Analysis of the technical condition of the joint-free track on the West Siberian Railway. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2017;(3):5–11. (In Russ.).
8. Instructions for ensuring the safety of train traffic in the production of track work. Approved by order of Russian Railways dated 14.11.2016 No. 2540r (as amended on 20.04. 2022). Moscow; 2019. 208 p. (In Russ.).
9. Velichko D. V., Koryakin M. A. Structure analysis of technical and economic costs by types of the whip integrity restoration of the butt-free path. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(1):102–108. (In Russ.).
10. Shchepotin G. K., Velichko D. V., Slavikovskaya E. A. Technical and economic assessment of the efficiency of a seamless track in Siberia. Guidelines for course and diploma design. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Transport University; 2006. 50 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А. И. Мухамедзянова – студентка 5-го курса факультета «Строительство железных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Д. В. Величко – доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент.

Р. А. Комардинкин – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. I. Mukhamedzyanova – fifth-year student of the Railway Construction Faculty, Siberian Transport University.

D. V. Velichko – Associate Professor of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering, Associate Professor,

R. A. Komardinkin – postgraduate of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 05.10.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023; принята к публикации 25.03.2024.

The article was submitted 05.10.2023; approved after reviewing 05.12.2023; accepted for publication 25.03.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 625.12
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_23

Волноломы для защиты прижимных участков железных дорог

Роман Маратович Тлявлин

Научно-исследовательский центр «Морские берега» – обособленное подразделение АО «Центральный научно-исследовательский институт транспортного строительства», Сочи, Россия, mb-ns@yandex.ru, TlyavlinRM@Tsniiis.com

Аннотация. В статье рассмотрены наиболее распространенные конструкции волноломов, применяемые для инженерной защиты земляного полотна. Волноломы предназначены для гашения энергии волн и удержания наносов, формирующих волногасящий пляж. Цель работы – разработка критериев оценки технического состояния элементов волноломов по видам дефектов. Основными методами исследования являлись натурное обследование сооружений и физическое моделирование в гидроволновых бассейнах и лотке. Выполнено обследование волноломов на участке железнодорожной линии Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги с целью определения дефектов как сооружений в целом, так и их элементов. Проведены экспериментальные исследования взаимодействия волн с волноломами и пляжем на моделях в волновых бассейнах и лотке. По результатам исследований предложено деление волноломов на отдельные элементы по степени их весомости. Получены критерии технического состояния каждого элемента волнолома по видам дефектов. Разработан алгоритм оценки технического состояния волноломов для определения необходимых мероприятий по обеспечению работоспособности сооружений.

Предложенный алгоритм оценки технического состояния волноломов позволит повысить безопасность эксплуатации железнодорожного пути на прижимных морских участках. Полученные критерии оценки технического состояния волноломов учтены при разработке ГОСТ Р 59241–2020 «Берегозащитные сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

Ключевые слова: волнолом, железнодорожный путь, земляное полотно, инженерная защита, обследование, критерии технического состояния, экспериментальные исследования

Для цитирования: Тлявлин Р. М. Волноломы для защиты прижимных участков железных дорог // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 23–32. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_23.

TRANSPORT

Original article

Breakwaters for the protection of clamping sections of railways

Roman M. Tlyavlin

Central Research Institute of Transport Construction R&D Centre «Morskie berega» – separate subdivision of the Central Research Institute of Transport Construction, Sochi, Russia, mb-ns@yandex.ru, TlyavlinRM@Tsniiis.com

Abstract. The most common designs of breakwaters used for engineering protection of the roadbed are considered. Breakwaters are designed to dampen wave energy and retain sediments forming a wave-quenching beach. The purpose of the work is to develop criteria for the technical condition of breakwater elements by types of defects. The main research methods were a full-scale survey of structures and physical modeling in hydrowave pools and a tray. A survey of breakwaters on the section of the Tuapse – Adler railway line of the North Caucasus Railway (NCR) was carried out in order to determine defects in both structures as a whole and their elements. Experimental studies of the interaction of waves with breakwaters and the beach were carried out on models in wave pools and a tray. According to the research results, the division of breakwaters into separate elements according to their degree of weight is proposed. Criteria for the technical condition of each element of the breakwater by types of defects are obtained. An algorithm for assessing the technical condition of breakwaters and determining the necessary measures to ensure the operability of structures has been developed.

The proposed algorithm for assessing the technical condition of breakwaters will allow to assess their technical condition and thus improve the safety of the operation of the railway track on the pressure sea sections. The obtained criteria for assessing the technical condition of breakwaters are taken into account in the development of GOST R 59241-2020 “Coastal protection structures. Rules of inspection and monitoring of technical condition”.

Keywords: breakwater, railway track, roadbed, engineering protection, survey, criteria of technical condition, experimental studies

For citation: Tlyavlin R. M. Breakwaters for the protection of clamping sections of railways. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):23–32. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_23.

Введение

Волноломы, предназначенные для гашения энергии волн и для удержания наносов, отсыпаемых на защищаемый участок берега, наиболее распространены на прижимных участках железнодорожной линии Туапсе – Adler Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД).

В соответствии с СП 277.1325800.2016 предлагаются к проектированию подводные волноломы, которые подразделяются: по конструкции – на гравитационные из бетонных блоков и набросные из камня или фасонных массивов (рис. 1); по высоте гребня волнолома – на затопленные и с гребнем, расположенным на уровне моря 50 % обеспеченности из среднегодовых; по ширине гребня волнолома – на узкие, с небольшим заглублением гребня до 0,75 м и распластанные (широкие), с заглублением гребня до 2 м. Однако необходимо отметить, что для защиты прижимных участков железнодорожной линии наиболее часто применялись волноломы с гребнем, возвышающимся над средне-

многолетним уровнем воды. Такие волноломы активно строились в период 70–80-х гг. прошлого столетия.

В работе [1] автором впервые была опубликована методика оценки технического состояния берегозащитных сооружений. Позже данная методика вошла в ГОСТ Р 59241. В работе [2] подробно описана методика оценки технического состояния только волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия, а именно: защитные волногасящие покрытия из камня или фасонных массивов и волногасящий пляж. А в работе [3] представлены критерии оценки технического состояния бетонных бун, предназначенных для удержания волногасящего пляжа от вдольберегового перемещения.

Для включения в разработанный ГОСТ Р 59241 количественных критериев оценки технического состояния волноломов были выполнены натурные обследования и экспериментальные исследования.

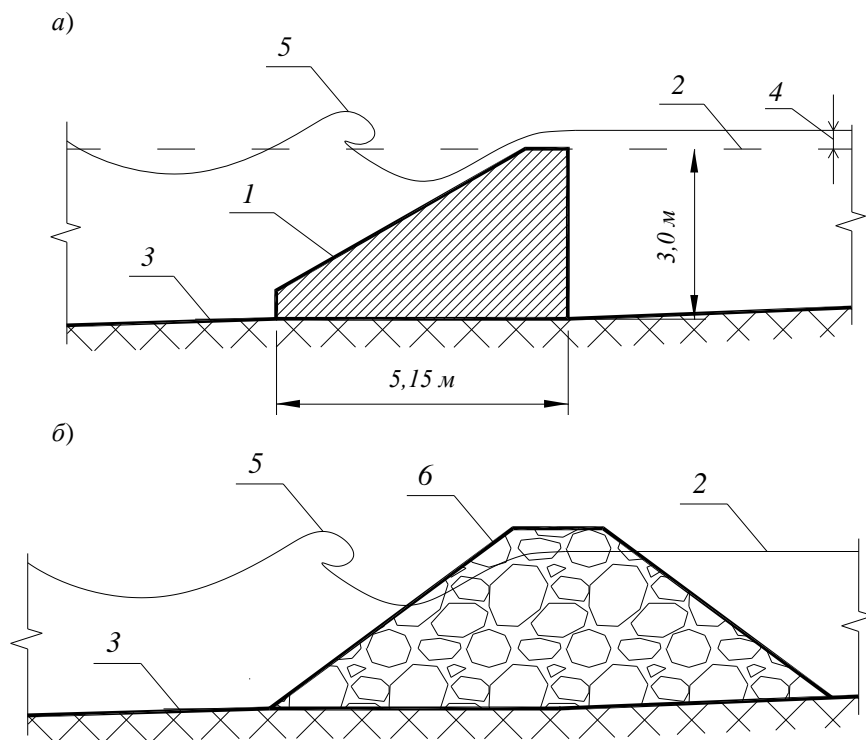


Рис. 1. Классические конструкции волнолома:

а – из бетонного массива; б – из наброски камня;

1 – бетонный массив волнолома; 2 – спокойный уровень воды; 3 – скальное дно;

4 – высота волнового нагона; 5 – гребень волны; 6 – контур наброски из камня

Материалы и методы исследования

Натурные обследования волноломов выполнялись в рамках научно-исследовательских и изыскательских работ. К основным из них необходимо отнести результаты обследований и инженерные изыскания в общем составе работ по комплексному обследованию береговой стороны железнодорожной линии Туапсе – Adler СКЖД, а также работы, выполненные в рамках разработки концепции проведения берегозащитных мероприятий и охраны береговой зоны в границах муниципального образования «Город-курорт Сочи».

По результатам выполненных обследований можно сделать вывод, что волноломы, сооружаемые для защиты земляного полотна железной дороги на участке Туапсе – Adler, как правило, построены из бетонных массивов массой от 80 до 100 т со скошенной передней гранью (гравитационные волноломы). Классическое сечение гравитационного волнолома показано на рис. 1. Таких волноломов на рассматриваемом участке насчитывается более 60. При этом большая часть из них представляет собой волноломы с отметкой гребня, расположенной выше уровня воды, а меньшая – затопленные волноломы с отметкой гребня, близкой к уровню моря 50 % обеспеченности из средних за год.

На рис. 2 показан волнолом, расположенный на 1910-м км СКЖД. Несмотря на сплошную конструкцию волнолома, при которой

блоки установлены вплотную друг к другу, в заволноломном пространстве отсутствует волногасящий пляж.

Применение гравитационных волноломов сплошной конструкции и с траверсами, образующими в плане замкнутые акватории, приводит к плохому водообмену заволноломного пространства с морем. Как показал опыт эксплуатации подобных сооружений, даже заглубление гребня волнолома под уровень воды на 0,5–0,8 м не обеспечивает необходимой интенсивности водообмена. К существенным недостаткам гравитационных волноломов в виде сплошного ряда бетонных массивов также необходимо отнести следующие: формирование волнового нагона за волноломами, повышение донных скоростей, оттягивание пляжевого материала от берега к волнолому, увеличение опасности размыва дна и постели сооружения, вытягивание пляжевого материала в разрывы между массивами при наличии даже небольших деформаций сооружений.

Как отмечается в статье [4], на Кавказском побережье Черного моря часто используются прерывистые волноломы. Так, на 1911-м км СКЖД построен гравитационный волнолом из бетонных массивов, но в отличие от волнолома, представленного на рис. 2, массивы установлены на расстоянии друг от друга и образуют прерывистую (сквозную) конструкцию (рис. 3). Но и такой подход, в отсутствие

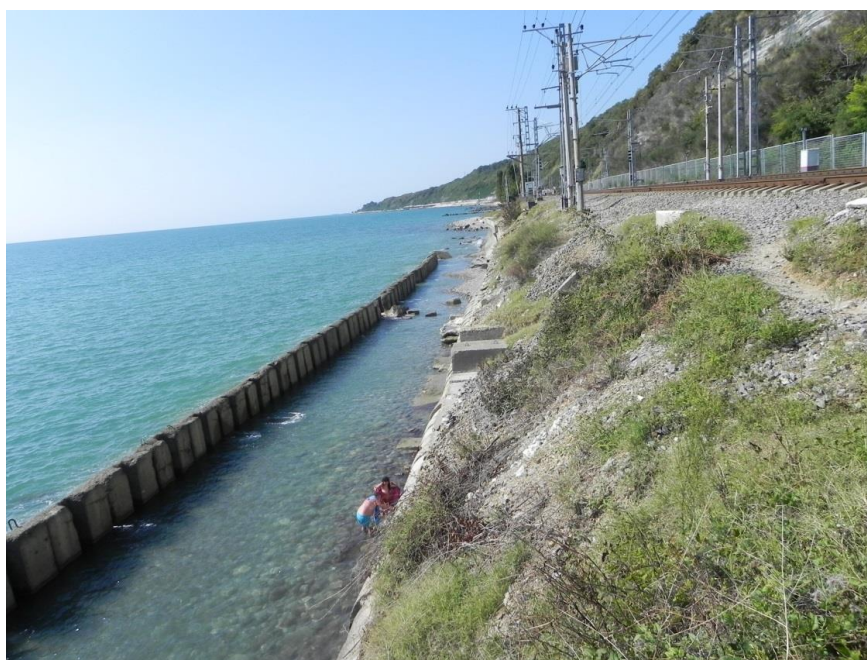


Рис. 2. Гравитационный волнолом на 1910-м км СКЖД (2018 г.)



Рис. 3. Прерывистый волнолом на 1911-м км СКЖД (2018 г.)

вдольберегового потока наносов, не защитил волногасящий пляж от размыва, что уже в 2017 г. привело к подмыву подпорно-волноотбойной стены на этом участке. Поэтому в [5] рекомендуется в случаях отсутствия или незначительного вдольберегового потока наносов с верховой стороны прерывистого волнолома выполнять периодические отсыпки пляжевого материала.

Таким образом, волноломы частично гасят энергию подходящих волн, но без волногасящего пляжа в полной мере не могут защитить земляное полотно от размыва. Волногасящая эффективность волноломов заметно снижается в случае, когда отдельные массивы смещаются под воздействием волн по береговому склону и прямолинейность сооружения в целом нарушается.

В Европе наибольшее распространение получили набросные волноломы из камня, например в Италии, юго-восточнее Пезаро (Pesaro), где вдоль побережья проходит железная дорога. Протяженность участка берега вдоль железной дороги составляет около 10 км и из них 8,8 км находится под защитой волногасящего пляжа и системы набросных волноломов из камня, а 1,2 км берега защищены бермой из камня. Длина волноломов варьируется от 50 до 350 м. Средняя крупность камня в волноломах составляет 1,2...1,5 м (рис. 4).

Физическое моделирование на гидроволновых установках – это один из основных методов научных исследований и обеспечения надежности и долговечности проектируемых конструкций в области защиты транспортных сооружений от волнового воздействия [6, 7]. Физическое моделирование взаимодействия волн с волноломами различных конструкций выполнялось в волновых бассейнах и лотке научно-исследовательского центра «Морские берега».

В соответствии с теорией подобия, исследовать на гидравлических моделях процессы взаимодействия волн с сооружениями необходимо при геометрическом подобии элементов модели (рельефа дна, сооружения и их деталей) натурному объекту, подобии объемных и поверхностных сил и волн. Таким образом, необходимо обеспечить подобие всех определяющих критериев. Одновременно обеспечить все эти условия не представляется возможным, но для целого ряда задач не требуется одновременное подобие по числам Фруда (Fr) и Рейнольдса (Re) [8].

При экспериментальных исследованиях волн на поверхности несжимаемой жидкости критерий Фруда записывается как

$$Fr = \frac{h}{gT^2}, \quad (1)$$

где h – высота волн; g – ускорение свободного падения; T – период волн.



Рис. 4. Набросной волнолом из камня в Италии, юго-восточнее Пезаро (Pesaro) (2010 г.)

Автором была выполнена оценка величины волнового нагона за волноломами различных конструкций. Исследовались два основных типа волноломов: гравитационный в виде сплошного ряда бетонных массивов (рис. 5, а) и проницаемый из наброски камня в металлическом каркасе (см. рис. 5, б). Экспериментальные исследования проводились в масштабе 1 : 30 в волновом лотке с размерами: длина 20 м; ширина 0,6 м; высота стенок 1,0 м. В качестве исходных данных для экспериментальных исследований были приняты [9]: высота волн в месте расположения волнолома $h_0 = 2,5$ м; длина волн $\lambda = 20$ м; глубина воды перед волноломом $d = 3$ м; расстояние от волнолома до уреза воды 75 м и уклон дна перед волноломом $i = 0,02$. Измерение величины волнового нагона выполнялось датчиками уровня непосредственно за волноломами.

Степень гашения волн вычислялась по формуле [10]:

$$\psi = \frac{h_0 - h}{h_0} 100 \%, \quad (2)$$

где h_0 – исходная высота волны, м; h – высота волн за волноломом, м.

В результате проведения серии опытов получено, что волновой нагон за гравитационным волноломом в виде сплошного ряда бетонных массивов составил в пересчете на натуру 0,54 м, а за проницаемым волноломом

из наброски камня – 0,21 м. При этом степень гашения волн составляла 59 и 58 % соответственно.

Таким образом, при практически равной степени гашения волн величина волнового нагона различается в 2,57 раза. Значительная величина волнового нагона, как уже отмечалось в работах [5, 9], при эксплуатации приводит к уменьшению ширины волногасящего пляжа и устойчивости отдельных бетонных массивов, увеличению опасности размыва дна или постели волнолома.

Для оценки пляжеудерживающей способности набросных волноломов и их влияния на контуры волногасящей полосы были выполнены экспериментальные исследования на физической модели в среднем волновом бассейне. Размеры среднего волнового бассейна: длина 19 м; ширина 13 м; высота стенок бассейна 0,7 м. Генерация волн осуществлялась с помощью волнопродуктора, установленного у одной из стенок бассейна. Для оперативного изменения угла подхода волн к исследуемой модели берега в дно бассейна встроен поворотный круг диаметром 12 м, на котором и была построена модель. В соответствии с выбранным масштабом равным 1 : 50, в волновом бассейне была построена модель участка берега и дна до изобаты 8 м и протяженностью вдоль берега 500 м.

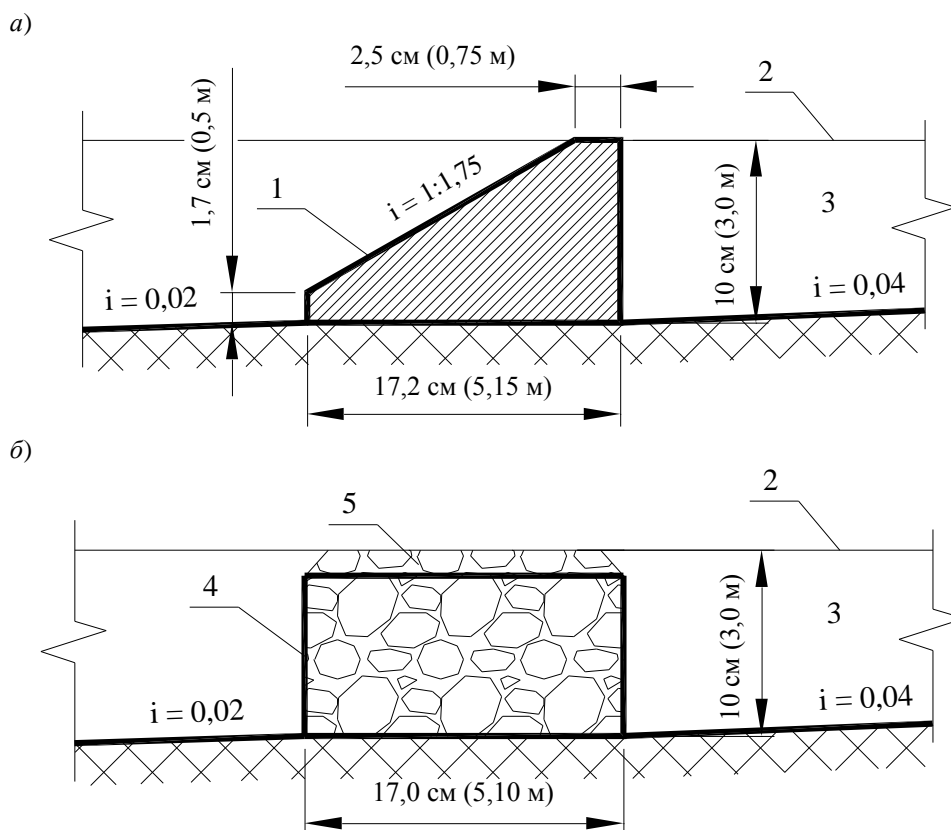


Рис. 5. Экспериментальные исследования волнового нагона в волновом лотке:

а – волнолом из бетонных массивов; *б* – волнолом из наброски камня в металлическом каркасе;
 1 – гравитационный волнолом из бетонных массивов; 2 – уровень воды; 3 – заволноломное пространство;
 4 – металлический каркас; 5 – наброска камня

Волногасящая полоса на модели отсыпалась песком крупностью 1 мм, что в пересчете на натуру соответствовало галечнику со средней крупностью 50 мм. Эксперименты на пространственной модели в среднем волновом бассейне проводились при воздействии на сооружения волн, возможных 1 раз в 50 лет, в сочетании с 1 % уровнем моря. Таким образом, высота волн 1 % обеспеченности в системе шторма повторяемостью 1 раз в 50 лет по линии первого обрушения составляла в натуре $h_{1\%} = 5,4$ м, а средний период волн – 8,4 с. В пересчете на модель высота волн равна 10,1 см, а период – 1,19 с. Уровень наполнения бассейна водой при расчетном уровне моря 1 % обеспеченности, равном +0,32 м БС, составлял 35,6 см. Время воздействия волн на пляж и сооружения во всех опытах было одним и тем же и составляло 5 ч, что соответствовало продолжительности воздействия шторма в натуральных условиях в фазу его стабилизации в течение 35 ч.

Изменения рельефа пляжа оценивались по данным нивелировок и результатам измерений

надводной и подводной ширины волногасящей полосы от волноотбойной стены. Сравнение результатов измерений сформированных волнениями контуров волногасящей полосы с положением исходной отсыпки пляжного материала дало наглядное представление о деформациях береговой линии и влиянии на эти процессы набросных волноломов из камня и гексабитов.

На рис. 6, *а* показан вид модели перед началом и в конце одного из экспериментов, а на рис. 6, *б* – во время взаимодействия волн с сооружениями.

Как видно из рис. 6, на модели сформировалась волногасящая полоса, контуры которой по линии уреза воды представляют собой чередование небольших аккумулятивных выступов, расположенных напротив набросных волноломов, и микробухт. Такое же очертание имеет и подводная часть пляжа. В процессе проведения эксперимента под воздействием волн, обрушение которых происходило непосредственно на гребне волноломов, отмечались незначительные деформации сооружения и смещение отдельных фигурных массивов (гексабитов).

а)



б)



Рис. 6. Вид модели:

а – перед началом и в конце опыта; б – во время проведения эксперимента

По результатам проведения серии экспериментов получено:

1. Наилучшей защитой земляного полотна от воздействия волн будет являться волногасящая полоса, которая одновременно должна выполнять и рекреационные функции.

2. Устойчивость создаваемой волногасящей полосы на рассматриваемом участке берега невозможно обеспечить без применения волноломов и бун.

3. При подходе волн к берегу частичное их разрушение начинается перед линией набросных волноломов. Непосредственно за волноломами высота волн снижается в 2–3 раза. В просветах между волноломами волны высотой до 4,5 м проникают в заволноломную акваторию. Большая часть волн при прохождении от волноломов до пляжа трансформируется, и окончательное их обрушение происходит на пляже. Сразу за волноломами высота волн не превышает 1,5...2 м.

4. Для полноценного гашения волн ширина волногасящей полосы должна быть не менее 35 м.

5. Водообмен в заволноломном пространстве во время волнения будет осуществляться за счет вдольберегового перемещения водных масс и циркуляционных течений, возникающих благодаря просветам между волноломами. В штилевых условиях водообмен будет происходить за счет ветров. Водообмену также способствует и проницаемый тип конструкции волноломов.

6. В экспериментах, в которых наблюдалось смещение под воздействием волн фигурных блоков (гексабитов) с гребней волноломов, их пляжеудерживающая эффективность резко снижалась.

7. Основными причинами разрушений набросных волноломов являлись размыв основания волноломов и недостаточная масса фигурных блоков.

Методика оценки технического состояния

По результатам многолетних наблюдений, обследований и экспериментальных исследований были определены основные виды дефектов для набросных и гравитационных волноломов, а также причины их разрушений

[1–3, 11]. Предложено деление сооружений на отдельные элементы, и определены значения коэффициентов весомости групп элементов в составе сооружения.

При разработке ГОСТ Р 59241–2020 автором был предложен алгоритм оценки технического состояния сооружений. Применительно к волноломам он может быть следующим:

1. Определить тип волнолома: гравитационный волнолом из бетонных массивов; набросной волнолом из камня или фигурных блоков.

2. Выполнить деление волноломов на отдельные элементы. Для набросного волнолома основными элементами являются дно и наброска из камня или фигурных блоков. Для гравитационного волнолома из бетонных массивов предлагается к основным элементам отнести массивовую кладку (бетонные блоки) и дно под сооружением и вокруг.

3. Принять коэффициент весомости групп элементов в составе сооружения b_i . Коэффициенты весомости для дна составляют 20 %, а для наброски из камня, фигурных блоков или массивовой кладки – 80 %.

4. Определить коэффициент сохранности группы однородных элементов a_i по формуле (4.1) и в соответствии с табл. 4.5 ГОСТ Р 59241–2020. Коэффициент сохранности отдельного элемента определяется путем экспертной оценки, учитывая, что состояние дна перед сооружением назначается работоспособным ($a = 1,0 \dots 0,8$) в случае, если локальное переуглубление составляет не более чем 0,2 м на участке не более $0,25L$, где L – это длина секции или элемента сооружения. Предельное, или аварийное, состояние дна перед сооружением ($a = 0,2 \dots 0$) назначают в случае, когда локальное переуглубление составляет более чем 0,5 м на участке более $0,25L$.

Для волноломов, построенных из бетонных массивов, основными показателями состояния элементов являются: горизонтальное смещение массива до 50 мм при работоспособном состоянии и более 100 мм при предельном; средняя осадка массива до 100 и более 300 мм; отклонение от вертикального по-

ложения массивов до 3 и более 5 %; ширина шва между массивами до 40 и более 60 мм; разрушение бетона на глубину более 0,25 ширины массива до 20 % от площади поверхности одного массива и более 50 %; снижение прочности бетона не более чем на 20 % от проектной и более чем на 40 %.

Для набросных волноломов из камня или фигурных блоков основными показателями состояния элементов являются: размывы и оползни с морской стороны, которые не допускаются при работоспособном состоянии, а при предельном (аварийном) определяются в зависимости от их величины; отклонение массы отдельных элементов наброски от проектных значений до 5 и более 10 %; отклонение прочности элементов наброски (камень и бетон) до 7 и более 20 %.

5. Определить коэффициент сохранности волнолома в целом a_n по формуле (4.2) ГОСТ Р 59241–2020.

6. По коэффициенту сохранности волнолома в целом a_n присвоить вид технического состояния: нормативное ($a_n = 1$), работоспособное ($a_n = 1 \dots 0,8$), ограниченно работоспособное ($a_n = 0,8 \dots 0,6$), неработоспособное ($a_n = 0,6 \dots 0,4$), предельное ($a_n = 0,4 \dots 0$).

7. По виду технического состояния волнолома определить мероприятия для обеспечения его работоспособности по табл. 4.5 ГОСТ Р 59241–2020.

Выводы

По результатам натурного обследования и физического моделирования в волновых бассейнах и лотке выявлены основные виды дефектов для набросных и гравитационных волноломов, определены причины их разрушения, предложено их деление на отдельные элементы, назначены коэффициенты весомости групп элементов и коэффициенты сохранности группы однородных элементов. Количественные показатели, полученные по результатам выполненных исследовательских работ, учтены при разработке ГОСТ Р 59241–2020 «Берегозащитные сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

Список источников

1. Тлявлин Р. М. Проблемы обследования и мониторинга сооружений инженерной защиты береговой зоны // Олимпийское наследие и крупномасштабные мероприятия: влияние на экономику, экологию и социокультурную сферу принимающих дестинаций : материалы XI Международной научно-практической конференции (Сочи, 14–15 ноября 2019 г.). Сочи : Сочинский государственный университет, 2019. С. 244–248. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41552411> (дата обращения: 22.08.2023).
2. Тлявлин Р. М. Оценка технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2020. Т. 17, № 2. С. 198–209. DOI 10.20295/1815-588X-2020-2-198-209. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43009379> (дата обращения: 22.08.2023).
3. Тлявлин Р. М. Критерии технического состояния бетонных бун // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (57). С. 73–82. DOI 10.20291/2079-0392-2023-1-73-82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50521078> (дата обращения: 22.08.2023).
4. Петров В. А. Расчет морских берегозащитных сооружений // Гидротехническое строительство. 2018. № 5. С. 9–13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35061476> (дата обращения: 10.08.2023).
5. Петров В. А. Волногасящие галечные пляжи. Москва : Экон-Информ, 2021. 295 с.
6. Тлявлиной Г. В. Методы научного обоснования нормативных требований в области инженерной защиты транспортных сооружений от волнового воздействия // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 2 (64). С. 80–91. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54073624> (дата обращения: 22.08.2023).
7. Frostick L. E., McLelland S. J., Mercer T. G. Users guide to physical modelling and experimentation. London : Taylor & Francis Group, 2011. 272 p. DOI 10.1201/b11335. ISBN 9780415609128.
8. Дейли Дж., Харлеман Д. Механика жидкости : пер. с англ. Москва : Энергия, 1971. 480 с.
9. Лызов И. А., Морозов Л. А., Натальчишин Г. Д. Определение величины волнового нагона за берегоукрепительными подводными волноломами // Труды ЦНИИСа. Вып. 86. Укрепление морских берегов. Москва : Транспорт, 1972. С. 134–138.
10. Натальчишин Г. Д. Экспериментальные исследования волногасящей способности подводных волноломов при косом подходе волн // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники имени Б. Е. Веденеева. Москва ; Ленинград, 1967. Вып. 34. С. 269–273.
11. Тлявлиной Г. В. Лабораторные и натурные исследования в обеспечение развития нормативной базы и безопасности транспортных сооружений в условиях волнового воздействия // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9, № 4. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50407678> (дата обращения: 22.08.2023).

References

1. Tlyavlin R. M. Problems of inspection and monitoring of engineering protection structures of the coastal zone. Olympic heritage and large-scale events: impact on the economy, ecology and socio-cultural sphere of host destinations. *Materials of the XI International Scientific and Practical Conference* (Sochi, November 14–15, 2019). Sochi: Sochi State University; 2019. P. 244–248. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41552411>.
2. Tlyavlin R. M. Assessment of the technical condition of wave-extinguishing structures of engineering protection of the roadbed from wave action. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2020.;17(2):198–209. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43009379>.
3. Tlyavlin R. M. Criteria for the technical condition of concrete buns. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2023;(57):73–82. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50521078>.
4. Petrov V. A. Calculation of marine coastal protection structures. *Hydrotechnical Construction*. 2018;(5):9–13. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35061476>.
5. Petrov V. A. Wave-extinguishing pebble beaches. Moscow: Ekon-Inform; 2021. 295 p. (In Russ.).
6. Tlyavlina G. V. Methods of scientific substantiation of regulatory requirements in the field of engineering protection of transport structures from wave impact. *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2023;(64):80–91. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54073624>.
7. Frostick L. E., McLelland S. J., Mercer T. G. Users guide to physical modelling and experimentation. London: Taylor & Francis Group; 2011. 272 p.
8. Daly J., Harleman D. Fluid Mechanics. Translated from the English. Moscow: Energy; 1971. 480 p. (In Russ.).

9. Lyzlov I. A., Morozov L. A., Natalchishin G. D. Determination of the magnitude of the wave surge behind shore-protecting underwater breakwaters. *Proceedings of Central Scientific Research Institute of Transport Engineering*. Iss. 86. Strengthening of sea shores. Moscow: Transport; 1972. P. 134–138. (In Russ.).

10. Natalchishin G. D. Experimental studies of the breaking capacity of underwater breakwaters with an oblique approach of waves. *Proceedings of the All-Union Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedenev*. Vol. 34. Moscow; Leningrad; 1967. P. 269–273. (In Russ.).

11. Tlyavlina G. V. Laboratory and field studies to ensure the development of the regulatory framework and the safety of transport facilities in the conditions of wave impact. *Transport Facilities*. 2022;9(4). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50407678>.

Информация об авторе

Р. М. Тлявлин – руководитель Научно-исследовательского центра «Морские берега» – обособленного подразделения АО «Центральный научно-исследовательский институт транспортного строительства», кандидат технических наук.

Information about the author

R. M. Tlyavlin – Director of the AO Central Research Institute of Transport Construction R&D Centre “Morskie berega” – separate subdivision of the Central Research Institute of Transport Construction, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 12.01.2024; одобрена после рецензирования 29.01.2024; принята к публикации 25.03.2024.

The article was submitted 12.01.2024; approved after reviewing 29.01.2024; accepted for publication 25.03.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.073.7:338.49
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_33

Методические аспекты учета и анализа грузовых контейнерных перевозок

Наталья Борисовна Попова^{1✉}, Марк Евгеньевич Корягин², Владимир Ильич Медведев³

^{1,2,3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ pnb1512@yandex.ru✉

² markkoryagin@yandex.ru

³ medvedevvi2017@yandex.ru

Аннотация. Перевозка грузов в контейнерах во многом отражает сущность современного этапа развития контейнерных перевозок как сегмента железнодорожного транспортного рынка. Чтобы оценить перспективные направления его регионального развития, в качестве информационно-аналитической основы была рассмотрена существующая ситуация в сфере контейнерных перевозок, сложившаяся в зоне влияния Западно-Сибирской железной дороги. В статье представлены результаты учетно-аналитической деятельности применительно к видам отправленных грузов и станциям назначения. Для понимания связей между товарными потоками грузов в контейнерах и развитием поставок были учтены виды грузов, а также типы производств, продукцией которых стали данные предметы транспортной работы. В рамках комплексного анализа были учтены грузополучатели, внутренние и внешние.

Цель настоящего исследования заключалась в анализе видового разнообразия грузов, отправленных в контейнерах, и местоположения грузополучателей. Это позволяет определить роль железной дороги на внутреннем и внешнем товарно-транспортных рынках.

Установлено, что во внутренних контейнерных отправлениях наибольшая доля (36,9 %) приходится на грузы химического комплекса, перечень которых состоит из почти полутора десятков единиц. Кроме того, высокий удельный вес показали контейнерные грузы аграрно-промышленного комплекса (20,8 %), количество которых также приближается к десятку. Получателями грузов в контейнерах явились 25 железных дорог.

Во внешних отправлениях наибольшую долю (35,5 %) показали грузы химического комплекса. Удельный вес грузов, произведенных на предприятиях аграрно-промышленного комплекса, составил 23,3 %. Замыкает тройку лесной комплекс, продукция которого – пиломатериалы – составила 23,3 % в общем объеме грузов, отправленных на экспорт. Получателями грузов в контейнерах явились 49 государств мира.

В статье приведена методика учета и анализа грузовых контейнерных отправок, апробированная в регионе на полигоне Западно-Сибирской железной дороги.

Ключевые слова: грузовые контейнерные перевозки, внутреннее сообщение, экспортные поставки, типы отраслевых производств, виды грузов

Для цитирования: Попова Н. Б., Корягин М. Е., Медведев В. И. Методические аспекты учета и анализа грузовых контейнерных перевозок // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 33–40. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_33.

TRANSPORT

Original article

Methodological aspects of accounting and analysis cargo container transportation

Natalia B. Popova^{1✉}, Mark E. Koryagin², Vladimir I. Medvedev³

^{1,2,3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ pnb1512@yandex.ru✉

² markkoryagin@yandex.ru

³ medvedevvi2017@yandex.ru

Abstract. Transportation of goods in containers largely reflects the essence of the current stage of development of container transportation as a segment of the railway transport market. In order to assess the directions of its regional development for the future, the existing situation in the sphere of container transportation, which has

developed in the zone of influence of the West Siberian Railway, was considered as an information and analytical basis of the base.

The article presents the results of accounting and analytical activities in relation to the types of shipped goods and destination stations. In order to understand the links between the commodity flows of goods in containers and the development of supplies, the types of goods, as well as the types of industries, the products of which were these items of transport work, were taken into account. As part of the comprehensive analysis, the consignees – internal and external – were taken into account.

The purpose of this study was to analyze the species diversity of cargo shipped in containers and the location of consignees. This makes it possible to determine the role and place of the railway in the internal and external commodity transport markets.

It was found that in domestic container shipments, the largest share (36.89 %) falls on chemical complex cargoes, the list of which amounted to almost a dozen and a half units. Container cargoes of the agro-industrial complex also showed a high share (20.83 %), the list of which is also approaching the top ten. 25 railways were the recipients of cargo in containers. Chemical complex cargoes also showed the largest share (35.5 %) in external shipments. The share of goods produced at the enterprises of the agricultural and industrial complex amounted to 23.3 %. The forest complex closes the top three, whose products – lumber – accounted for 23.3 % of the total volume of goods sent for export. The 49 countries of the world were recipients of cargo in containers.

The article presents the methodology of accounting and analysis of container shipments, tested in the region at the landfill of the West Siberian Railway.

Keywords: cargo container transportation, internal communication, export deliveries, types of industrial production, types of cargo

For citation: Popova N. B., Koryagin M. E., Medvedev V. I Methodological aspects of accounting and analysis cargo container transportation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):33–40. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_33.

Введение

Перевозка грузов в контейнерах, с одной стороны, во многом отражает сущность современного этапа развития индустрии транспорта, с другой – товарные взаимоотношения между производителями и потребителями продукции, созданной в хозяйственных комплексах регионов страны. Организация перевозок грузов в контейнерах всецело зависит от деятельности региональных операторов – железных дорог сети, функционирующих на всех стадиях производственного процесса на железнодорожном транспорте. К ним относятся такие важные аспекты, как взаимодействие с участниками перевозки, знание товарных групп грузов, подвергающихся контейнерной перевозке, а также умение распоряжаться имеющимися материальными ресурсами. Именно эти параметры во многом определяют результативность железнодорожных контейнерных перевозок.

Исследованиями в области контейнерных перевозок занимались и занимаются отечественные и зарубежные ученые: С. С. Котельников, В. Е. Гозбенко [1], С. М. Резер, С. Б. Левин [2], Д. Бенсон, Дж. Уайтхед [3], Я. В. Кукушкина [4], В. П. Клепиков [5], В. А. Ярополов, С. Г. Барченко [6], Е. М. Бондаренко [7] и др. Работы большинства авторов в основном посвящены технической стороне реализации таких перевозок, поскольку преимущественно рассматривается тоннаж контейнеров либо технологические

инновации транспортировки и работы контейнерных терминалов. Публикаций по исследованиям, связанным с изучением направления контейнерных отправок для оптимизации контейнерных перевозок как одного из бизнес-процессов компании, практически не встречается.

Цель исследования – выяснить и проанализировать видовое разнообразие грузов, отправленных в контейнерах; местоположение грузополучателей с тем, чтобы определить роль железной дороги (грузоотправителя) на внутреннем и внешнем товарно-транспортных рынках страны.

Материалы и методы исследования

Оценка и анализ данных, характеризующих отправление грузов в контейнерах, указывает на многогранность деятельности железной дороги как структурного подразделения компании, функционирующего на рынке перевозок. В реализации процесса перевозок могут участвовать многие подразделения компании, а также клиенты (грузоотправители) и грузополучатели. Элементами учета и анализа остаются такие параметры, как товарные группы грузов, отправленных в контейнерах, и адресаты или станции назначения. Если перевозка грузов в контейнерах в принципе отражает лишь один из бизнес-процессов компании, то территориально-транспортная ориентация отправленных грузов, в том числе и контейнерных, во многом характеризует роль перевозчика (в нашем случае ЗСЖД)

на существующих и, возможно, перспективных товарных рынках страны и мира.

В соответствии с направлениями инновационного развития ОАО «РЖД» [8, 9] для региональных представителей этого холдинга необходимо не только увеличение доли грузовых контейнерных перевозок, но и расширение своего так называемого географического (или территориального) присутствия в этом сегменте товарно-транспортного рынка. Решение явных задач, связанных с технологическими и управленческими инновациями, даст результат в виде ассортимента и качества услуг, предоставляемых пользователям, увеличения объемов перевозимых грузов, улучшения работы грузовых терминалов в соответствии с требованиями производителей-грузоотправителей и др.

Расширение географического рынка и своего присутствия на этом рынке, по нашему

мнению, не столько связано с повышением удовлетворенности клиентов и конкурентоспособности оказываемых услуг, сколько с анализом и оценкой перспектив территориально-отраслевого и территориально-транспортного партнерства. Такое партнерство во многом основано на учете и анализе перечня грузов, отправляемых в тех или иных направлениях, где получателями в широком смысле выступают железные дороги сети, а в геополитическом контексте – другие страны.

Методика учета и анализа

Чтобы представить перспективы территориально-отраслевого и территориально-транспортного партнерства, необходимо проанализировать и оценить существующую ситуацию по реализации грузовых контейнерных отправок. Отправки во внутреннем сообщении учтены по названиям дорог назначения (табл. 1).

Таблица 1

Виды, типы (рода) и объемы грузов, отправленных в контейнерах во внутреннем сообщении в 2022 г.

Тип груза	Вид (род) груза	Доля груза, %	Дорога назначения
Топливные	Уголь каменный марки «Д», масло рапсовое	12,15	Дальневосточная, Забайкальская, Северная, Восточно-Сибирская, Казахстанские
Металлургические	Сырье коксохимическое, алюминий и сплавы	3,05	Северная, Западно-Сибирская, Московская, Свердловская, Дальневосточная, Северо-Кавказская, Октябрьская, Горьковская, Южно-Уральская, Белорусская
Химические	Ферросилиций, ксилол, кумол, капролактан, полипропилен, полиэтилен, углерод технический, фенол расплавленный, селитра аммиачная, спирт изопропиловый, масло моторное	36,9	Дальневосточная, Калининградская, Южно-Уральская, Северо-Кавказская, Юго-Восточная, Свердловская, Западно-Сибирская, Куйбышевская, Октябрьская, Северная, Московская, Горьковская, Забайкальская, Восточно-Сибирская, Железные дороги Якутии, Крымская, Красноярская, Белорусская, Казахстанские, Латвийская, Львовская, Молдавская
Лесные	Пиломатериалы	15,0	Забайкальская, Восточно-Сибирская, Дальневосточная, Красноярская, Октябрьская, Северо-Кавказская, Казахстанские
Строительные	Материалы строительные, битумы вязкие, шпон лущеный и строганный	9,4	Дальневосточная, Железные дороги Якутии, Восточно-Сибирская, Забайкальская, Приволжская, Красноярская, Московская, Северо-Кавказская, Северная, Октябрьская, Западно-Сибирская, Казахстанские
Агропромышленные	Семена льна, ячмень, напитки, водка, комбикорма, мука пшеничная, мука другая, крупа	20,8	Дальневосточная, Забайкальская, Восточно-Сибирская, Северо-Кавказская, Железные дороги Якутии, Красноярская, Московская, Западно-Сибирская, Северная, Свердловская, Калининградская, Октябрьская, Белорусская, Казахстанские
Сборная контейнерная отправка		2,7	Дальневосточная, Восточно-Сибирская, Железные дороги Якутии, Забайкальская, Северная, Северо-Кавказская, Октябрьская, Московская, Красноярская, Калининградская, Крымская, Южно-Уральская, Азербайджанская, Узбекские
Итого		100,0	–

Примечание. Здесь и далее объемы, структура и направления отправок приняты по данным ЗСЖД для служебного пользования.

При изучении исходной информации, характеризующей отправление грузов в контейнерах во внутреннем сообщении, первоначально потребовалось учесть их производственную принадлежность. Для этого весь номенклатурный перечень грузов, подвергаемых перевозке, был диверсифицирован по отраслевым комплексам, на предприятиях которых производятся указанные виды продукции, т. е. по типам произведенных грузов. В результате выяснилось, что грузы, отправленные в контейнерах, были произведены на предприятиях, отраслевая принадлежность которых – это специализированные производственные комплексы (СПК). В качестве основных выделили шесть СПК: топливный, металлургический, химический, лесной, строительный, агропромышленный. При этом «сборная контейнерная отправка» рассматривалась как единая структурная и отраслевая товарная единица.

Затем была определена «дорожная» принадлежность отправленных грузов. Для этого, согласно наименованиям железных дорог, были учтены и сопоставлены все адресаты, или дороги-грузополучатели.

На основании обработки исходных данных была составлена классификационная табл. 1, в графах которой объединена имеющаяся информация по видовому разнообразию грузов, участвующих во внутренних контейнерных отправлениях, их товарному происхождению (типам производств) и целевому назначению в соответствии с местоположением грузополучателей (железных дорог). Далее – этап аналитической деятельности.

Анализ табличных данных показал, что наибольший удельный вес (36,9 %) в контейнерных отправлениях занимают грузы химического комплекса. Более десятка наименований различных химических грузов направляются в адрес грузополучателей по 16 дорогам страны. Кроме того, данные типы грузов отправлены в контейнерах в адрес пяти железных дорог ближнего зарубежья.

Другой группой грузов, удельный вес которых в контейнерных отправлениях составил почти 21 %, стали грузы агропромышленного комплекса (АПК). В отправки вошла продукция непосредственно сельскохозяйственного производства (семена льна, ячмень), а также

ряда перерабатывающих отраслей (мукомольно-крупяной, комбикормовой, винодельческой и т. п.). По данной группе грузов контейнерные отправки имели назначением 13 железных дорог страны и две дороги, расположенные на территориях стран ближнего зарубежья.

Удельный вес топливных и строительных видов грузов, имеющих значительно меньший перечень (2–3 позиции), составил 12,15 и 9,4 % соответственно. При этом если топливные грузы в контейнерах отправились в адрес пяти железных дорог, включая Казахстанские, то грузы строительного комплекса оказались востребованными грузополучателями на 12 железных дорогах, включая Казахстанские. Сборная контейнерная отправка по объему показала наименьший удельный вес (2,7 %), однако отправки такого типа состоялись в адрес 15 железных дорог, включая две дороги ближнего зарубежья (Азербайджанскую и Узбекские).

Таким образом, Западно-Сибирская железная дорога формирует контейнерные отправки грузополучателям, находящимся на различных железных дорогах страны, а также по железнодорожной сети ближнего зарубежья. В целом адресатами явились 18 железных дорог России, включая Крымскую и АО АК «Железные дороги Якутии». Семь других дорог имеют с Российскими железными дорогами непосредственную связь, т. е. являются пограничными – Белорусская, Казахстанские, Азербайджанская. Опосредованную связь (через рельсовые пути стран ближнего зарубежья – СНГ, ЕАЭС) имеют Латвийская, Львовская, Молдавская, Узбекские железные дороги, в адрес которых также поступили грузы в контейнерах, отправленные с ЗСЖД.

Результаты исследования

Как уже отмечалось выше, особое внимание в исследовании уделялось видовому разнообразию грузов, отправленных в контейнерах, и местоположению грузополучателей. В случае внутренних перевозок к таким адресатам относились железные дороги, входящие в общую сеть РЖД, а также железные дороги стран ближнего зарубежья (см. табл. 1). При экспортных отправлениях во внимание принималась страна назначения. Типы (отрасли производств) и виды (рода) грузов во внутренних и

экспортных отправлениях идентифицировались по сходному номенклатурному перечню, а обработка исходных данных производилась по методике, изложенной выше. Полученные сведения представлены в табл. 2.

Анализ исходных сведений показал, что контейнерные грузы, отправленные на экспорт, являлись продукцией, произведенной в основном теми же отраслевыми комплексами. Номенклатурный перечень товарных групп грузов был несколько отличным. Так, если во внутренних отправлениях грузов, произведенных предприятиями химического комплекса, отмечено 11 позиций, то в экспортных отправлениях таких грузов зафиксировано шесть позиций. Также меньшим по номенклатуре оказался список грузов, произведенных на предприятиях металлургического, агропромышленного и строительного комплексов. Сохранили свой видовой состав грузы топливного (уголь каменный марки Д, рапсовое масло) и лесного (пиломатериалы) комплексов.

Анализ результатов выполненных расчетов показал, что наибольший удельный вес (35,5 %) в контейнерных отправлениях экспортного назначения занимают грузы химического комплекса.

Получателями различных грузов данной группы значатся 39 стран, расположенных практически на всех континентах, в том числе 14 – в Азии, 10 – в Европе, 9 американских государств и 7 – в Африке. Другая группа грузов в контейнерах, имеющая довольно высокий удельный вес (23,3 %), – это пиломатериалы, отправленные в 16 стран. Грузы топливного комплекса (19,0 %) были направлены в страны Азии, где основным грузополучателем значился Китай. Эта страна также являлась основным грузополучателем экспортной продукции агропромышленного сектора. Наименьший удельный вес в контейнерных отправлениях имели грузы металлургического (2,1 %) и строительного (2,2 %) комплексов. При этом если грузополучателями строительных грузов значились всего две страны в Азии – Китай и Вьетнам, то металлургическая продукция была отправлена в 25 стран, из которых 11 – в Азии, 8 – в Европе, 2 – в Африке и 4 – на Американском континенте.

Таблица 2

Виды, типы (рода) и объемы грузов, отправленных в контейнерах (экспортные поставки) в 2022 г.

Тип груза	Вид (род) груза	Доля груза, %	Страна назначения
Топливные	Уголь каменный марки «Д», масло рапсовое	19,0	Китай, Республика Корея, Вьетнам
Металлургические	Алюминий и сплавы	2,1	Китай, Турция, Япония, Нидерланды, Республика Корея, Болгария, Польша, Малайзия, Франция, Таиланд, Хорватия, Тайвань (Китай), ОАЭ, Вьетнам, Филиппины, Индонезия, Греция, Беларусь, Канада, США, Шри-Ланка, Бразилия, Армения, Марокко, Мексика
Химические	Ферросилиций, ксилол, капролактан, полипропилен, полиэтилен, углерод технический	35,5	Нидерланды, Япония, Республика Корея, Турция, Великобритания, Тайвань (Китай), Таиланд, Алжир, Индия, Вьетнам, Марокко, Мексика, Бразилия, Италия, Перу, Оман, Египет, Аргентина, Саудовская Аравия, Китай, Индонезия, ЮАР, Колумбия, Камерун, ОАЭ, Малайзия, Финляндия, Беларусь, Болгария, Парагвай, Эквадор, Германия, Израиль, Бельгия, Польша, Виргинские острова (США), Канада, Греция, Филиппины
Лесные	Пиломатериалы	23,3	Китай, Вьетнам, Египет, Республика Корея, Камбоджа, Израиль, Япония, Таиланд, Тайвань (Китай), Канада, Малайзия, Австралия, Турция, Бельгия, Индонезия, Индия
Строительные	Шпон лущеный и строганный	2,2	Китай, Вьетнам
Агропромышленные	Семена льна, ячмень	17,9	Китай, Тайвань (Китай), Польша, Япония
<i>Итого</i>		100,0	–

Таким образом, полный учет государственной принадлежности экспортных грузов показал, что в целом адресатами (грузополучателями) контейнерных отправок явились 49 стран, расположенных преимущественно в Азии, что указывает на общий вектор развития товарно-транспортных связей России в целом и Западно-Сибирской железной дороги в частности.

Востребованность контейнерных грузов, отправленных с ЗСЖД в адрес железных дорог России и стран мира, иллюстрирует рисунок, на котором отображено типовое разнообразие грузов в соответствии с долевыми значениями их отправок в 2022 г.

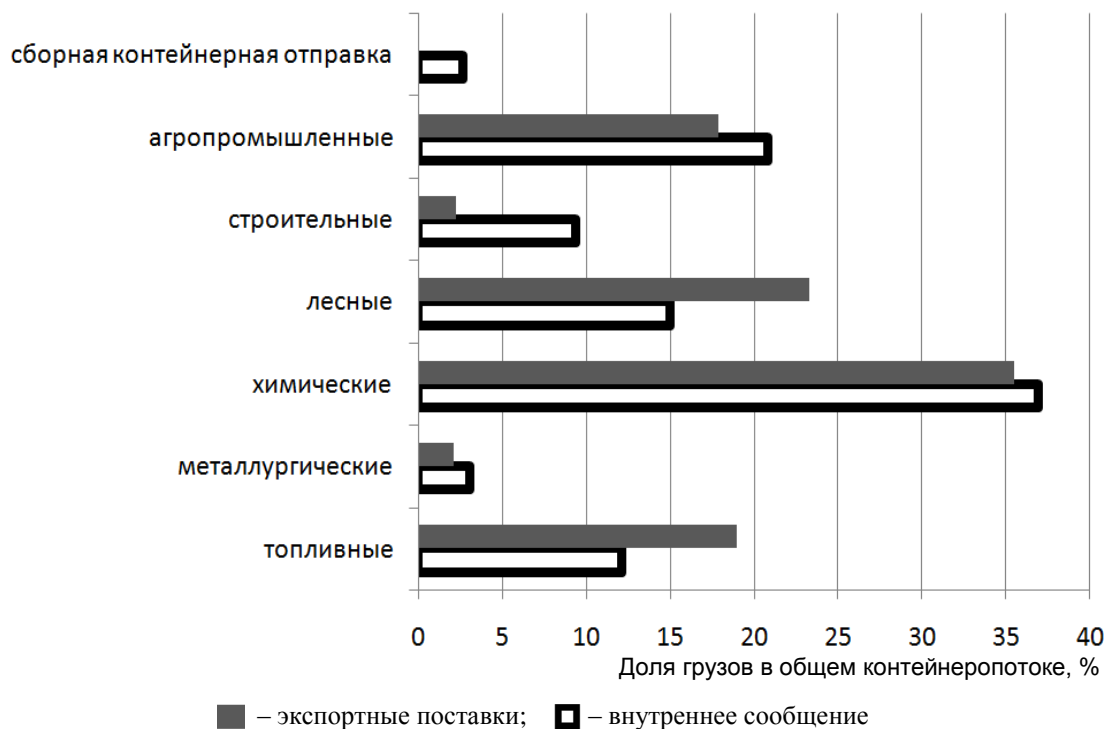
По рисунку видно, что основными в отправлениях стали грузы химического комплекса, доля которых оказалась весьма значительной как во внутренних (36,9 %), так и в экспортных отправлениях (35,5 %). Далее долевое участие групп грузов во внутренних отправлениях имело следующий вид: агропромышленные (20,8 %), лесные (15,0 %), топливные (12,15 %), строительные, металлургические. В экспортных отправлениях долевое участие контейнерных грузов – продукции различных отраслевых комплексов – показало несколько иную картину. По долевой величине отправок значительными оказались лесные (23,3 %) и топливные (19,0 %) грузы. Грузы

АПК (17,9 %), хотя и имели значительную долю, но меньшую, чем по отправлениям во внутреннем сообщении. Отметим, что, кроме лесных грузов, в экспортных отправлениях значительна доля топливных грузов, также превысившая по величине отправок долю аналогичных грузов, отправленных во внутреннем сообщении. По другим группам грузов – металлургического, строительного производств – отмечено превышение долевого показателя по отправлениям внутри страны.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Необходимость методического обоснования особенностей учета и анализа грузовых контейнерных отправок, выполненных на примере ЗСЖД, обусловлена тем, что регион обслуживания обладает значительным промышленным потенциалом, изучение и оценка которого применительно к перспективам развития грузопотока представляют важную научно-прикладную задачу. Подтверждением является тот факт, что грузовые контейнерные перевозки в настоящее время продолжают развиваться, наращивая удельный вес на рынке перевозок. За 2022 г. в России доля таких перевозок, выполненных железнодорож-



Сравнение внутренних и экспортных контейнерных отправок грузов отраслевых комплексов, выполненных ЗСЖД в 2022 г.

ным транспортом, составила 4,7 % [10, с. 37–38]. По данным ДЦФТО ЗСЖД, в последние годы доля контейнерных перевозок также прирастает и за 2022 г. составила 1,3 %.

2. По мнению специалистов, спрос на услуги на рынке контейнерных перевозок в России будет превышать среднемировой показатель в среднем в полтора раза и страна обладает потенциалом увеличения объемов контейнерных перевозок до 10 % [11]. Поскольку ЗСЖД представляет собой часть единой железнодорожной сети страны, то изучение и методическое обобщение сведений по современному состоянию контейнерных отправок в рамках этого субъекта позволит обосновать и спрогнозировать роль и место контейнерных отправок в реализации внутреннего и экспортного потенциалов ЗСЖД и страны в целом.

3. Методический подход к оценке современного состояния контейнерных отправок состоит в следующем. Первоначально необходимо разобратся в происхождении отправленных грузов с отраслевых и территориальных позиций. Так, с отраслевых позиций отправленные контейнерные грузы являлись продукцией определенных промышленных производств, идентификация которых выполнялась в соответствии с общепринятой классификацией: топливные, металлургические, химические, лесные, строительные и т. д.

В частности, учет и анализ сведений по ЗСЖД показал, что внутренние и внешние грузопотоки контейнерных отправок представляют довольно широкий спектр продукции отраслевых комплексов, в которых в настоящее время ведущее место занимают химические, агропромышленные и лесные грузы.

Затем выяснялась так называемая дорожная и страновая принадлежность контейнерных отправок. Методический прием состоит в том, что контейнерные отправки внутри страны были объединены в соответствии с «дорожной» принадлежностью. Контейнерные отправки на экспорт определялись по странам назначения.

4. Составление таблиц, отражающих расчетную информацию на основе учета и обобщения сведений по контейнерным отправлениям, выполненным во внутреннем и внешнем сообщении, позволяет, во-первых, анализировать товарную сущность данного вида перевозок; во-вторых, прогнозировать видовое разнообразие контейнерных отправок для расширения номенклатуры контейнеропригодных грузов, что обеспечит в перспективе оптимизацию процессов перевозок на железнодорожном транспорте.

5. Анализ грузовых контейнерных отправок с отраслевых (производственных) и территориальных (дорожных, страновых) позиций, выполненный на основе сведений по ЗСЖД, делает очевидным тот факт, что востребованность региональных грузовых контейнерных перевозок определяет прогресс в международной и национальной логистике. Следовательно, расширение спектра грузовых контейнерных перевозок как по товарным группам, так и по направлениям обуславливает необходимость не только методического обоснования приемов, способов учета и анализа исходных данных в этом сегменте перевозочного процесса, но также углубления и расширения позиций учета и анализа с привлечением информации по типам контейнеров, технологиям переработки и т. п. Что и предполагается принять в расчет при дальнейших разработках в рамках данной научно-прикладной проблемы.

Список источников

1. Котельников С. С., Гозбенко В. Е. Исследование рынка контейнерных перевозок с учетом расширения номенклатуры перевозимых грузов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 11. С. 65–72.
2. Резер С. М., Левин С. Б. Модель организации управления контейнерными перевозками в логистической цепи // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 2. С. 3–8.
3. Бенсон Д., Уайтхед Дж. Транспорт и доставка грузов : пер. с англ. Москва : Транспорт, 2000. 279 с.
4. Кукушкина Я. В. Совершенствование организации контейнерных перевозок на железных дорогах России // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2017. № 2. С. 54–59.
5. Клепиков В. П. Тенденции развития международной логистической инфраструктуры контейнерных перевозок // Логистика и управление цепями поставок. 2016. № 3 (74). С. 46–59.
6. Ярополов В. А., Барченко С. Г. Развитие контейнерных перевозок в России // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5, ч. 1. С. 151–152.

7. Гладунов В. А., Бондаренко Е. М. Выбор оптимальных логистических схем поставок товаров из Китая в Российскую Федерацию при использовании контейнеров // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 15–23.

8. Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № 877р. [Об утверждении Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года и плана мероприятий на 2008–2015 годы по ее реализации] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902111037> (дата обращения: 02.11.2023).

9. Верещака Ю. А. Роль контейнерных перевозок в условиях новой экономики // Экономика транспортного комплекса. 2012. № 20. С. 150–158. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-konteynernih-perevozok-v-usloviyah-novoy-ekonomiki> (дата обращения: 02.11.2023).

10. Транспорт в России : статистический сборник : 2022 / Росстат. Москва, 2022. 101 с.

11. Концепция комплексного развития контейнерного бизнеса в холдинге «РЖД» : утверждена ОАО «РЖД» от 6 октября 2011 г. № 256 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902325994> (дата обращения: 01.11.2023).

References

1. Kotelnikov S. S., Gozbenko V. E. Research of the container transportation market taking into account the expansion of the nomenclature of transported goods. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2018;(11):65–72. (In Russ.).

2. Rezer S. M., Levin S. B. Model of container transportation management organization in the logistics chain. *Transport: Science, Technology, Management*. 2015;(2):3–8. (In Russ.).

3. Benson D., Whitehead J. Transport and cargo delivery: trans. from English. Moscow: Transport; 2000. 279 p. (In Russ.).

4. Kukushkina Ya. V. Improving the organization of container transportation on the railways of Russia. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2017;(2):54–59. (In Russ.).

5. Klepikov V. P. Trends in the development of international logistics infrastructure of container transportation. *Logistics and Supply Chain Management*. 2016;(74):46–59. (In Russ.).

6. Yaropolov V. A., Kharchenko S. G. Development of container transportation in Russia. *Modern High-tech Technologies*. 2014;(5, part 1):151–152. (In Russ.).

7. Glazunov V. A., Bondarenko E. M. The choice of optimal logistics schemes for the supply of goods from China to the Russian Federation when using containers. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):15–23. (In Russ.).

8. Order of the Government of the Russian Federation of 17.06.2008 No. 877r 171 p. [On Approval of the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030 and the 2008–2015 Action Plan for its implementation]. *Electronic Fund of Legal and Regulatory-technical Documents*. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902111037>

9. Vereshchaka Yu. A. The role of container transportation in the new economy. *The Economy of Transport Complex*. 2012;(20):150–158. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-konteynernih-perevozok-v-usloviyah-novoy-ekonomiki>.

10. Transport in Russia. Statistical collection. 2022. Rosstat. Moscow; 2022. 101 p. (In Russ.).

11. The concept of integrated development of container business in Russian Railways. Approved by Russian Railways on 6.10.2011 № 256. *Electronic Fund of Legal and Regulatory-technical Documents*. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902325994>.

Информация об авторах

Н. Б. Попова – профессор кафедры «Экономика транспорта» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор географических наук.

М. Е. Корягин – заведующий кафедрой «Высшая математика» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

В. И. Медведев – профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

Information about the authors

N. B. Popova – Professor of the Transport Economics Department, Siberian Transport University, Doctor of Geographic Sciences.

M. E. Koryagin – Head of the Higher Mathematics Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

V. I. Medvedev – Professor of the Life Safety Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

Статья поступила в редакцию 24.11.2023; одобрена после рецензирования 07.12.2023; принята к публикации 25.03.2024.

The article was submitted 24.11.2023; approved after reviewing 07.12.2023; accepted for publication 25.03.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 625.143.482
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_41

Продольные деформации рельсовых плетей при рекуперативном торможении поездов в суровых климатических условиях

Илья Константинович Ардышев

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, ardyshev.ilya@ya.ru

Аннотация. В статье проанализированы некоторые направления развития железнодорожного транспорта в России до 2030 г. Рассмотрены одни из основных проблем в техническом обслуживании бесстыкового пути. Вопросы методов технического обслуживания бесстыкового пути с учетом воздействия поездов остаются сегодня актуальными, поэтому необходимо обратить внимание на исследования в данной сфере и скорректировать существующие методы, которые в настоящее время лишь частично учитывают особенности температурной работы бесстыкового пути.

В статье дан обзор существующих теорий угона пути, особое внимание уделено механизму появления специфических упругих продольных деформаций рельсовых плетей бесстыкового пути, которые возникают при проезде локомотива, следующего в режиме торможения.

Выполнены расчеты продольных сил в рельсовых плетях и их упругих перемещений в пределах колесной базы электровозов серии ЭС10, следующих в режиме рекуперативного торможения в различных эксплуатационных условиях. Возникающие дополнительно при торможении такие продольные силы оказывают влияние на интервалы закрепления плетей бесстыкового пути и на устойчивость рельсошпальной решетки в целом.

Даны предложения по корректированию расчетного интервала температуры закрепления рельсовых плетей на постоянный режим работы путем сопоставления сжимающих продольных сил от повышения температуры рельсовых плетей и продольных сил, передающихся на рельсовые плети при рекуперативном торможении электровоза. Установлено, что в рассмотренных в статье условиях необходимость усиления конструкции верхнего строения пути возникает раньше, чем это предусмотрено Инструкцией по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути.

Ключевые слова: устойчивость бесстыкового пути, выброс пути, рекуперативное торможение, продольные деформации, рельсовые плети

Для цитирования: Ардышев И. К. Продольные деформации рельсовых плетей при рекуперативном торможении поездов в суровых климатических условиях // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 41–48. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_41.

TRANSPORT

Original article

Longitudinal deformations of continuously welded rail track under recuperative braking of trains in inclement climatic conditions

Ilya K. Ardyshev

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, ardyshev.ilya@ya.ru

Abstract. The article analyzes some directions for the development of railway transport in Russia until 2030. Some of the main problems in the maintenance of continuously welded rail track are considered. Issues of maintenance methods for continuously welded rail track taking into account the impact of trains remain relevant today, so it is necessary to pay attention to research in this area and adjust existing methods, which currently only partially take into account the peculiarities of the temperature operation of continuously welded rail track.

The article provides an overview of existing theories of track hijacking, but attention is paid to the mechanism of the continuously welded rail track specific elastic longitudinal deformations, which occur when a locomotive passes in braking mode.

Calculations of longitudinal forces in continuously welded rail track and their elastic movements within the wheelbase of the ES10 series electric locomotives running in regenerative braking mode under various operating conditions were performed. Such longitudinal forces, which additionally arise during braking, affect the fastening intervals of the continuously welded rail track strands and the stability of the rail and sleeper grid as a whole.

Proposals are given for adjusting the calculated temperature range for fixing rail strands to a constant operating mode by comparing the compressive longitudinal forces from an increase in the rails temperature and the longitudinal forces transmitted to the rail strands during regenerative braking of the electric locomotive. It has been established that, under the conditions considered in the article, the need to strengthen the structure of the superstructure of the track arises earlier than provided for by the Instructions for the design, laying, maintenance and repair of continuously welded rail track.

Keywords: stability of continuously welded rail track, track buckling, recuperative braking of trains, longitudinal deformations

For citation: Ardyshev I. K. Longitudinal deformations of continuously welded rail track under recuperative braking of trains in inclement climatic conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):41–48. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_41.

Введение

Увеличение скоростей движения поездов до 140 км/ч и достижение нагрузки на ось до 27–30 тс [1] требует проведения обширных исследований, включающих оценку состояния пути при воздействии подвижного состава, в том числе совершенствование существующих методов оценки состояния бесстыкового пути, а также ускорение научно-технического прогресса в целом и совершенствование организации производства [2]. Методы, которые применяются при техническом обслуживании бесстыкового пути, в настоящее время лишь частично учитывают особенности его температурной работы.

Это подтверждает в своей статье профессор В. И. Новакович, обращая внимание на то, что «в действующей Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути присутствуют устаревшие и поэтому на сегодня ошибочные указания» [3, с. 32].

О проблеме воздействия на путь электровазов повышенной мощности с асинхронными двигателями говорит, совместно с коллективом авторов, профессор В. О. Певзнер: «Результаты расчетов и эксплуатационных наблюдений позволили установить, что на участках обращения электровазов 2ЭС10, 3ЭС10 и аналогичных машин с асинхронным тяговым приводом в режимах максимальной тяги и электродинамического торможения требуется применение особого режима технического обслуживания пути...» [4, с. 5].

Вопросы методов технического обслуживания бесстыкового пути с учетом воздействия поездов остаются сегодня актуальными, поэтому необходимо обратить внимание на исследования в данной сфере.

Вместе с тем широкое применение получило электрическое торможение поездов. Этот режим используется для поддержания

определенной скорости на уклонах и при торможении с целью остановки, когда тяговые двигатели электровазов работают как генераторы, отдающие энергию в контактную сеть.

Применение электродинамического торможения устраняет необходимость использования механических тормозов, что дает возможность уменьшить износ бандажей и тормозных колодок, а также повысить безопасность движения поездов. Однако при таком торможении усложняется температурная работа рельсовых плетей бесстыкового пути вследствие концентрации тормозных нагрузок в пределах колесной базы локомотива и в условиях резко континентального климата.

Обзор существующих теорий угона пути

Под воздействием проходящих поездов и окружающей среды в рельсовых плетях возникают вертикальные, горизонтальные продольные и поперечные силы. Одним из проявлений этих сил является угон пути. Его изучению посвящен ряд исследований отечественных специалистов, результаты которых нашли практическое применение.

Признание получила теория угона пути, разработанная профессором В. Г. Альбрехтом, в основу которой положено явление перемещения точек подошвы рельса за счет поворота его сечений при перекачивании колеса по рельсу. Перемещение подошвы рельса вызывает упругое отклонение основания в горизонтальной плоскости, вследствие чего в нем возникают продольные силы, принимаемые за силы угона пути. В. Г. Альбрехт разработал методику определения сил угона при торможении колес в зависимости от величины потери кинетической энергии движущегося поезда, следующего в режиме торможения [5].

Экспериментальными исследованиями, выполненными профессором Н. И. Карпушенко, установлено: «Наибольшее продольное воздей-

ствие на путь оказывают электровозы в режиме рекуперативного торможения. Восьмиосные цистерны с нагрузкой от оси колесной пары на рельсы 220 кН оказывают на путь такое же продольное воздействие, как и четырехосные полувагоны с нагрузкой 250 кН» [6, с. 85].

Основы теории продольных деформаций рельсов под воздействием поездной нагрузки заложены профессором А. Я. Коганом [7]. Им предложено дифференциальное уравнение продольных деформаций рельсов при их фрикционном и упругом взаимодействии с подрельсовым основанием под проходящим поездом.

Методы исследования

Конструкция бесстыкового пути с промежуточными скреплениями клеммного типа и резиновыми прокладками обеспечивает упругую продольную связь рельсов с основанием. При нормальном функционировании таких связей наибольший интерес представляет не угон рельсов по основанию, который в этом случае возникает только после отказа системы связей, а упругие продольные перемещения рельсовых плетей, вызванные идущим поездом. Важной особенностью таких расчетов является необходимость учета неразрывности деформаций рельсовых плетей «неограниченной» длины [8, с. 103].

Научный интерес при рассмотрении продольных перемещений рельсовых плетей вызывает воздействие на путь грузового маги-

стрального восьмиосного электровоза постоянного тока 2ЭС10 «Гранит», который предназначен для вождения тяжеловесных поездов массой 9,0 тыс. т на участках с равнинным профилем пути (с уклонами до 6 ‰) и поездов массой до 6,3 тыс. т на участках с горным профилем, имеющим уклон до 10 ‰. Электровоз оснащен как рекуперативным, так и реостатным электрическими тормозами. Для вождения поездов повышенной массы по всему полигону возможно рассмотреть электровоз 2ЭС10 в трехсекционном исполнении или при разработке бустерной секции предусмотреть вариант 3ЭС10 (рис. 1). Асинхронный привод с индивидуальными инверторами позволяет создать четырехосные электровозы на базе 2ЭС10, такие электровозы могут быть использованы в качестве грузопассажирских.

Авторы статьи [9, с. 6], рассматривая новые проблемы содержания бесстыкового пути, обращают внимание на следующее: «Грузовые электровозы с асинхронными двигателями в режиме максимальной тяги становятся причиной возникновения в рельсовых плетях продольных сил, которые могут достигать 250 кН. Эта величина составляет 43 % от максимальных температурных сил в рельсовых плетях – 580 кН».

В рамках данной научно-исследовательской работы выполнены расчеты продольных сил в рельсовых плетях и их упругих перемещений в пределах колесной базы электровозов

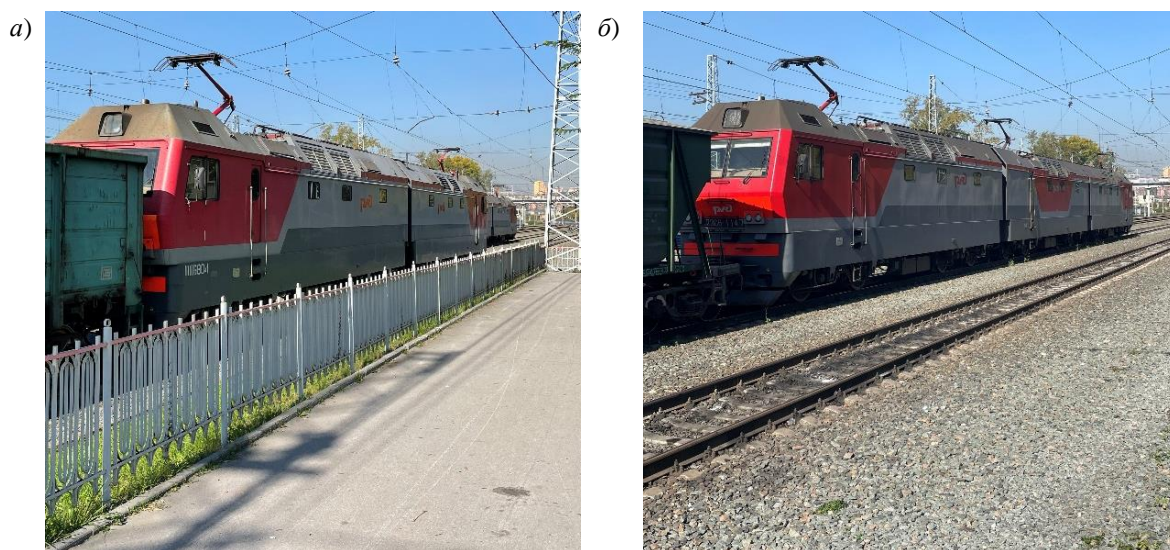


Рис. 1. Грузовые поезда с ведущим локомотивом 2ЭС6 применили режим торможения на путях о. п. Сибирская (г. Новосибирск):

а – локомотив 2ЭС6; б – локомотив 2ЭС6С с бустерной секцией

серии ЭС10, следующих в режиме рекуперативного торможения.

Параметры упругости пути для летних и зимних условий эксплуатации U_0^r варьируются в пределах от 5 до 25 МПа соответственно.

Дифференциальное уравнение продольных перемещений рельсовой плети относительно продольной оси z имеет вид [8]:

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} + \frac{U^r(z)}{mV^2 - EF} \lambda = \frac{\tau(z)}{mV^2 - EF}, \quad (1)$$

где λ – отклонение точек оси рельса при упругих продольных деформациях; U^r – модуль горизонтальной (продольной) упругости рельсового основания; m – распределенная масса рельса; E – модуль упругости рельсовой стали; F – площадь поперечного сечения рельса; τ – распределенная тормозная нагрузка.

В пределах колесной базы локомотива, идущего в режиме рекуперативного торможения (рис. 2), на рельсы действуют продольная распределенная нагрузка τ_1 и вертикальная распределенная нагрузка $q_{\text{лок}}$ [8].

$$q_{\text{лок}} = \frac{Q_{\text{лок}}}{a}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{лок}}$ – вес локомотива; a – колесная база локомотива.

Уравнение (1) для этого участка примет вид:

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial z_1^2} + \frac{U_1^r}{EF} \lambda = \frac{\tau_1}{EF}. \quad (3)$$

Уравнение (3) имеет следующее решение:

$$\begin{cases} \lambda(z) = C_1 \text{sh} k_1 z_1 + C_2 \text{ch} k_1 z_1 + \frac{\tau_1}{U_1^r}, \\ N(z) = k_1 EF (C_1 \text{ch} k_1 z_1 + C_2 \text{sh} k_1 z_1), \end{cases} \quad (4)$$

где $\lambda(z)$ – продольные перемещения рельсовой плети; C_1 и C_2 – постоянные интегрирования; k_1 – коэффициент относительной жесткости рельсового основания; $N(z)$ – продольные силы в рельсовой плети.

При $z = l$ под последней осью локомотива

$$\begin{cases} \lambda(l) = C_2 + \frac{\tau_1}{U_1^r}, \\ N(l) = k_1 C_1 EF. \end{cases} \quad (5)$$

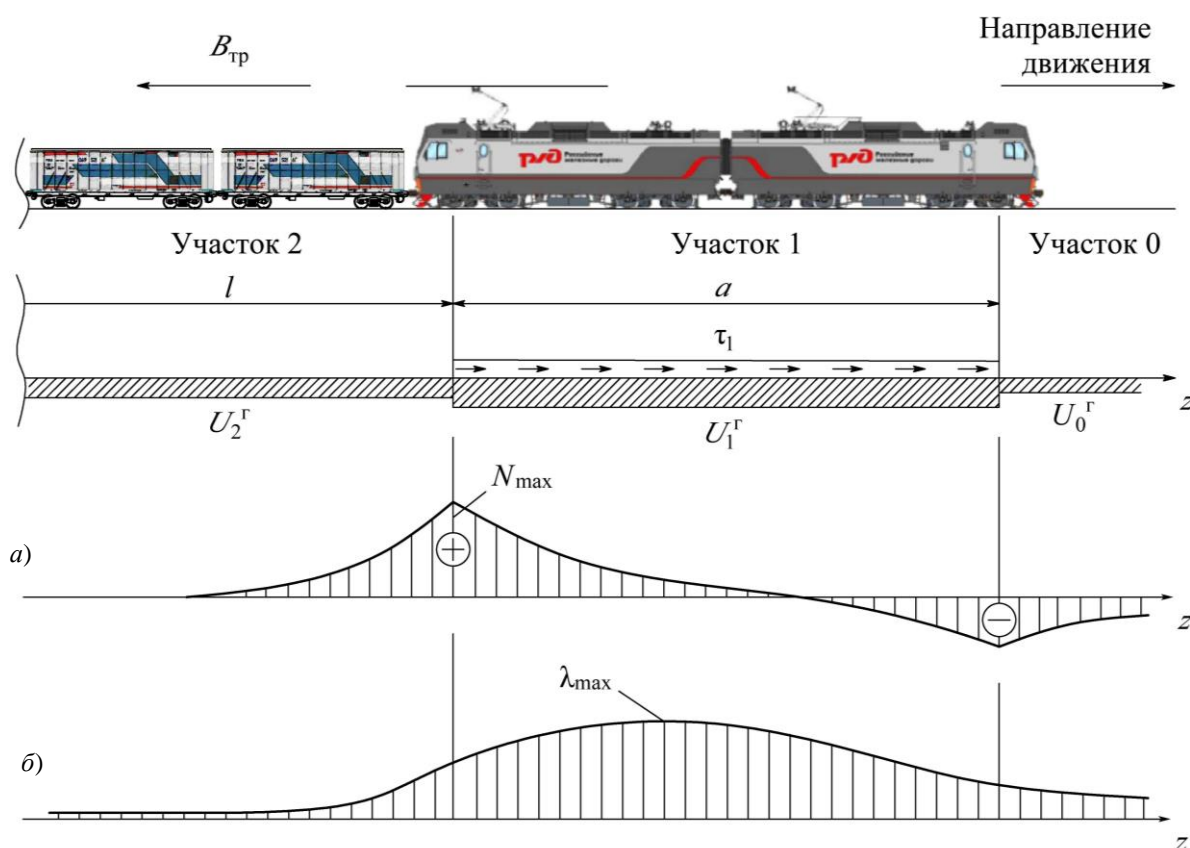


Рис. 2. Эпюры продольных сил (а), продольных перемещений рельсовых плетей (б) при рекуперативном торможении поезда

При $z = l + a$ под первой осью локомотива

$$\begin{cases} \lambda(l+a) = C_1 shk_1 a + C_2 chk_1 a + \frac{\tau_1}{U_1^r}, \\ N(l+a) = k_1 EF(C_1 chk_1 a + C_2 shk_1 a). \end{cases} \quad (6)$$

При рекуперативном торможении поезда значения продольных перемещений рельсов λ окажутся максимальными под локомотивом и определятся по первой формуле системы уравнений (6), а продольные силы – по формулам из систем уравнений (5) и (6).

В случае применения двойной и тройной тяги, а также рекуперативного торможения наибольшие значения продольных перемещений рельсов [8] составят

$$\lambda_{\max} = \frac{\tau_1}{U_1^r} = \frac{\tau_1}{U_0^r + Aq_{\text{лок}}}. \quad (7)$$

Распределенная тормозная нагрузка при рекуперативном торможении электровоза

$$\tau_1 = \frac{B_{\text{тр}}}{a}. \quad (8)$$

Наибольшая величина тормозной силы $B_{\text{тр}}$ определяется коэффициентом сцепления колеса с рельсом ψ_k и силой давления колеса на рельс P :

$$B_{\text{тр}} \leq \psi_k nP, \quad (9)$$

где n – суммарное число осей локомотива.

Эмпирические формулы для определения коэффициента сцепления колес с рельсами ψ_k для электровозов постоянного тока при движении в прямом и в кривом участке пути радиусом менее 500 м:

$$\begin{cases} \psi_k = 0,25 + \frac{8}{100 + 20V}, \\ \psi_{k_{\text{кр}}} = \psi_k \frac{250 + 1,55R}{500 + 1,1R}. \end{cases} \quad (10)$$

Расчетный коэффициент сцепления определяется опытным путем в эксплуатационных условиях.

Расчетные значения вертикальных и тормозных нагрузок приведены в таблице. На основе данных таблицы выполнены расчеты продольных сил N в рельсовых плетях и их продольных перемещений λ в зависимости от вида торможения, секционного исполнения электровоза и в различных условиях эксплуатации по формулам из систем уравнений (5) и (6). Результаты расчетов приведены в виде диаграмм на рис. 3 и 4.

Расчетные распределенные вертикальные (q) и тормозные (τ) нагрузки на рельсовые плети в зависимости от секционного исполнения локомотива

Вариант секционного исполнения электровоза	Вид распределенной нагрузки, передаваемой на рельсовую плеть, кН/м	
	вертикальная $q_{\text{лок}}$	тормозная $\tau_{\text{лок}}$
ЭС10	68,77	12,40 / 15,50
2ЭС10	66,71	13,83 / 17,29
3ЭС10	63,41	13,15 / 16,44

Примечание. В числителе приведены значения распределенных тормозных нагрузок при служебном торможении, в знаменателе – при экстренном.

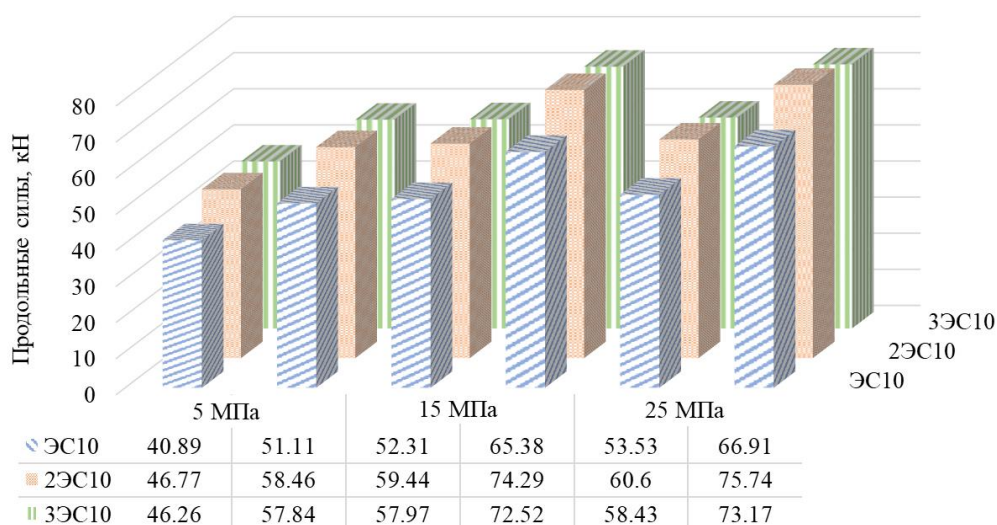


Рис. 3. Максимальные продольные силы N , кН, в рельсовых плетях при служебном и экстренном торможении для различных параметров продольной упругости

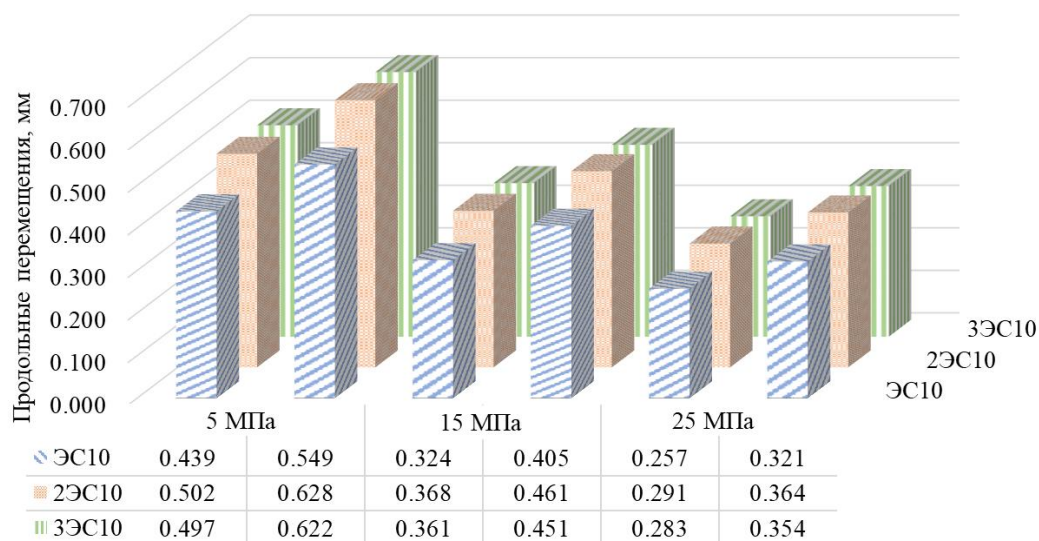


Рис. 4. Максимальные упругие продольные перемещения λ , мм, в рельсовых плетях при служебном и экстренном торможении для различных параметров продольной упругости

Анализ полученных данных показывает, что наибольшие продольные силы в рельсовых плетях и их упругие перемещения возникают под последней осью электровоза 2ЭС10, идущего в режиме экстренного торможения: $N_{\max} = 75,74$ кН; $\lambda_{\max} = 0,63$ мм.

По абсолютной величине максимальные значения продольных сил в рельсовых плетях при рекуперативном торможении летом в 1,3 раза меньше, чем зимой, а их упругие продольные перемещения летом в 1,7 раза больше, чем зимой.

Под колесами электровоза 2ЭС10, следующего в режиме рекуперативного торможения, продольные силы и перемещения на 1,0–1,1 % больше летом и на 2,7–3,6 % больше зимой по сравнению с силами и перемещениями под электровозом 3ЭС10. Бустерная секция оказывает незначительное влияние на значения продольных сил и перемещений при рекуперативном торможении.

Применение электровозов в двухсекционном исполнении по сравнению с ЭС10 приводит к увеличению продольных сил в рельсовых плетях на 12,6 % летом и на 11,7 % зимой, а продольные перемещения увеличиваются на 12,6 % летом и на 11,8 % зимой. При этом по абсолютной величине продольные силы под колесами электровоза 2ЭС10 не превышают 76 кН.

Результаты

Сопоставив сжимающие продольные силы от повышения температуры рельсовых плетей

N_t и продольные силы N_τ , передающиеся на рельсовые плети при торможении электровоза, необходимо скорректировать расчетный интервал температуры закрепления рельсовой плети бесстыкового пути:

$$\begin{cases} N_t = N_\tau, \\ \alpha EF \Delta t = k_0 EF \frac{\tau_1}{U_1^r}. \end{cases} \quad (11)$$

Из второго уравнения системы (11) получено значение Δt , затем найдено выражение для определения повышения температуры рельсовой плети при рекуперативном торможении электровоза:

$$\Delta t_\tau = \frac{k_0 \tau_1 \cdot 10^3}{\alpha U_1^r \cdot 10^6}, \quad (12)$$

где k_0 – коэффициент относительной жесткости подрельсового основания в продольном направлении перед идущим поездом; τ_1 – распределенная тормозная нагрузка под локомотивом; α – коэффициент линейного расширения рельсовой стали; U_1^r – модуль упругости рельсового основания в горизонтальном (продольном) направлении в пределах колесной базы локомотива.

Результаты расчетов интервалов температур закрепления плетей бесстыкового пути на постоянный режим работы в условиях Западной Сибири для электровоза 2ЭС10, с учетом нагрузок при рекуперативном торможении, представлены на рис. 5.

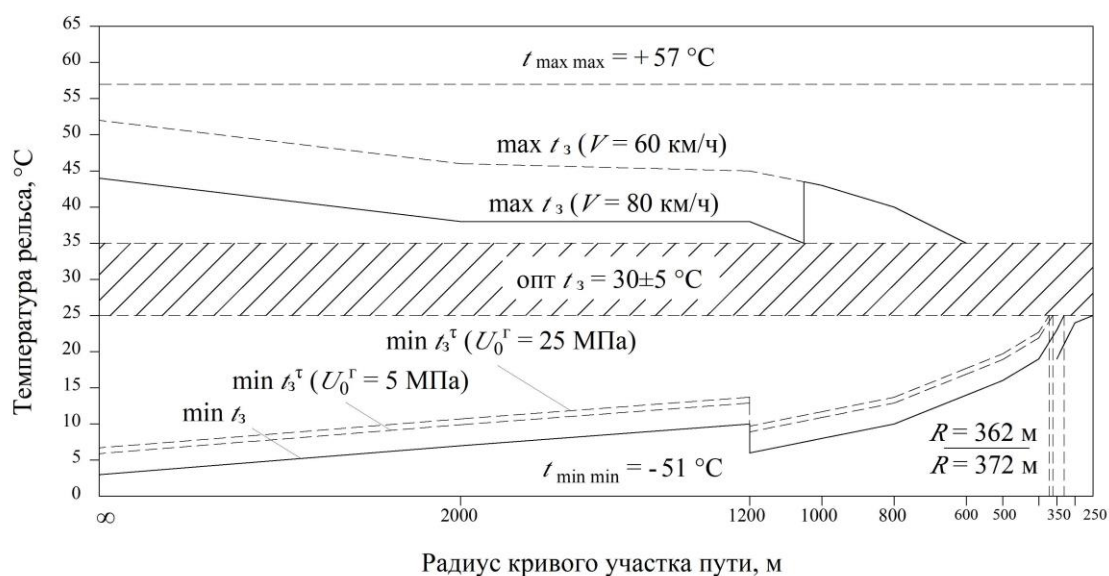


Рис. 5. Интервалы температур закрепления плетей бесстыкового пути на постоянный режим работы для грузового электровоза 2ЭС10

Согласно расчетам, для эксплуатации бесстыкового пути в условиях сурового климата Западной Сибири в прямых и в кривых участках пути радиусом R более 330 м применяется типовая конструкция бесстыкового пути. При радиусе кривого участка пути $250 \leq R \leq 350$ м, согласно Инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути [10], применяется усиленная конструкция бесстыкового пути в кривых малого радиуса, реализуемая с помощью укладки железобетонных шпал с повышенным (не менее чем на 25 % по сравнению с типовыми Ш-3) сопротивлением сдвигу поперек оси пути [10].

Однако, если в расчетах учесть влияние рекуперативного торможения, скорректировав допускаемое по условию устойчивости пути повышение температуры рельсовой плети $[\Delta t_y]$ на показатель Δt_τ , необходимость в усилении пути возникает раньше: при радиусе кривого участка пути $R = 362$ м в летних условиях эксплуатации и при радиусе $R = 372$ м в зимних.

Выводы

Выполненные расчеты продольных сил N в рельсовых плетях и их упругих перемещений λ в пределах колесной базы электровозов серии ЭС10, следующих в режиме рекуперативного торможения, дают основания для следующих выводов и предложений.

Наибольшие продольные силы в рельсовых плетях возникают под последней осью электровоза 2ЭС10, идущего в режиме экстренного торможения в зимних условиях ($N_{\max} = 75,74$ кН), наибольшие продольные перемещения рельсовых плетей — под электровозом 2ЭС10, идущим в режиме экстренного торможения ($\lambda_{\max} = 0,63$ мм).

Скорректирован расчетный интервал температуры закрепления рельсовой плети путем сопоставления сжимающих продольных сил от повышения температуры рельсовых плетей N_t и продольных сил N_τ , передающихся на рельсовые плети при торможении электровоза.

Установлено, что для рассмотренных в статье условий эксплуатации возникает необходимость в усилении конструкции бесстыкового пути уже при радиусе кривого участка $R = 362$ м в летних условиях и при $R = 372$ м в зимних. Однако Инструкцией по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути [10] предусмотрено усиление пути при радиусе кривого участка $250 \leq R \leq 350$ м. Поэтому возникает необходимость учета показателя Δt_τ при расчетах интервалов температур закрепления плетей бесстыкового пути на постоянный режим работы.

Для апробации результатов теоретических исследований продольных деформаций рель-

совых плетей при торможении поезда необходимо провести экспериментальные исследования по определению продольных сил в рельсовых плетях и их упругих перемещений, вы-

званных тормозящим поездом, а также уточнить значения модуля упругости рельсового основания в продольном направлении для новых видов рельсовых скреплений.

Список источников

1. Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 769/р от 17.04.2018. Москва, 2018. 128 с.
2. Севостьянов А. А. Анализ воздействия поездов на железнодорожный путь в условиях Среднесибирского хода // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (55). С. 26–33.
3. Новакович В. И. Пересмотреть Инструкцию по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 8. С. 32–33.
4. Воздействие на путь электропоездов с асинхронными двигателями / В. О. Певзнер, Т. И. Громова, И. Б. Петропавловская [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 11. С. 2–5.
5. Альбрехт В. Г., Коган А. Я. Угон железнодорожного пути и борьба с ним. Москва : Транспорт, 1996. 160 с.
6. Карпущенко Н. И. Надежность связей рельсов с основанием. Москва : Транспорт, 1986. 150 с.
7. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. Москва : Транспорт, 1997. 326 с.
8. Карпущенко Н. И., Ардышев И. К. Продольные деформации рельсов бесстыкового пути под воздействием поезда // Образование – наука – производство : материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Чита : Забайкальский институт железнодорожного транспорта, 2019. С. 103–109.
9. Карпущенко Н. И., Ардышев И. К. Новые проблемы содержания бесстыкового пути на особогрузонапряженных участках // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 5–14.
10. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р : редакция от 10.04.2023. Москва, 2023. 176 с.

References

1. Strategy for scientific and technical development of the Russian Railways Holding for the period until 2025 and for the future until 2030: approved by Russian Railways dated 17.04.2018 No. 769/r. (In Russ.).
2. Sevostyanov A. A. Analysis of the impact of trains on the railway track in the conditions of the Central Siberian Railway. *Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(55):26–33. (In Russ.).
3. Novakovich V. I. Review the Instructions for the construction, laying, maintenance and repair of continuously welded rail track. *Track and Track Facilities*. 2023;(8):32–33. (In Russ.).
4. Pevzner V. O., Gromova T. I., Petropavlovskaya I. B. [et all.]. Impact of electric locomotives with asynchronous motors on the track. *Track and Track Facilities*. 2022;(11):2–5. (In Russ.).
5. Albrecht V. G., Kogan A. Y. Railway track hijacking and combating it. Moscow: Transport; 1996. 160 p. (In Russ.).
6. Karpuschenko N. I. Reliability of connections between rails and base. Moscow: Transport; 1986. 150 p. (In Russ.).
7. Kogan A. Y. Track dynamics and its interaction with rolling stock. Moscow: Transport; 1997. 326 p. (In Russ.).
8. Karpuschenko N. I., Ardyshev I. K. Longitudinal deformations of continuously welded rail track track under the train load influence. *Education – science – production. Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference*; 2019. P. 103–109. (In Russ.).
9. Karpuschenko N. I., Ardyshev I. K. New problems of continuously welded rail track maintaining in particularly heavy-duty tracks. *Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):5–14. (In Russ.).
10. Instructions for the design, installation, maintenance and repair of continuously welded rail track: approved by Russian Railways dated 10.04.2023 No. 2544r. 176 p. (In Russ.).

Информация об авторе

И. К. Ардышев – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

I. K. Ardyshev – postgraduate of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 08.12.2023; одобрена после рецензирования 18.01.2024; принята к публикации 25.03.2024.

The article was submitted 08.12.2023; approved after reviewing 18.01.2024; accepted for publication 25.03.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.078.12:339.9(571.6)
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_49

Источники синергии мультимодальных транспортных узлов Дальнего Востока России

Диана Викторовна Парыгина^{1✉}, Владимир Викторович Буровцев²

^{1,2} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

¹ apple-bit@mail.ru✉

² rector@festu.khv.ru

Аннотация. Развитие мультимодальных транспортных узлов имеет большое значение для транспортного комплекса России. Формируя скоординированную транспортную сеть и усиливая интеграцию различных видов транспорта, они способствуют повышению мобильности и увеличивают общую эффективность предприятий транспорта. Основные тенденции рынка транспортно-логистических услуг свидетельствуют о необходимости формирования опорной сети транспортных узлов, в частности в Дальневосточном регионе. В то же время при неоспоримой значимости транспорта недостаточность транспортной инфраструктуры является лимитирующим условием экономического развития Дальнего Востока России. Выполненное авторами исследование показало, что учет выявленных источников синергии мультимодальных транспортных узлов позволит повысить эффективность деятельности предприятий транспорта с учетом территориальных особенностей.

В статье рассмотрены основные транспортные узлы федерального значения с зонами влияния, представлена динамика грузоперевозок за 2018–2023 гг., с перспективой до 2035 г. Среди основных тенденций развития рынка можно выделить увеличение дальности перевозок, повышение роли автотранспорта в перевозке грузов, увеличение грузооборота портов, в частности в Дальневосточном регионе, и повышение тарифов на перевозку грузов. Выделены основные драйверы роста рынка транспортно-логистических услуг, и определены риски его развития. Наличие одного транспортного узла федерального значения на территории Дальнего Востока России в условиях дефицита транспортной инфраструктуры снижает возможности эффективного освоения увеличившихся транспортных потоков предприятиями транспорта.

Цель настоящего исследования – выявление источников синергии мультимодальных транспортных узлов Дальнего Востока России.

Установлено, что развитие транспортной инфраструктуры в целях формирования мультимодальных транспортных узлов на пересечении путей транспортных коридоров и территорий опережающего развития позволит получить эффект синергии предприятий транспорта и близлежащих территорий.

Ключевые слова: мультимодальный транспортный узел, логистика, Дальний Восток России, синергия

Для цитирования: Парыгина Д. В., Буровцев В. В. Источники синергии мультимодальных транспортных узлов Дальнего Востока России // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 49–55. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_49.

TRANSPORT

Original article

Synergy sources of multimodal transport hubs of the Russian Far East

Diana V. Parygina^{1✉}, Vladimir V. Burovtsev²

^{1,2} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

¹ apple-bit@mail.ru✉

² rector@festu.khv.ru

Abstract. The development of multimodal transport hubs is of great importance for the Russian transport complex. By forming a coordinated transport network and strengthening the integration of various modes of transport, they contribute to increased mobility and increase the overall efficiency of transport enterprises. The main trends in the market of transport and logistics services indicate the need to form a backbone network of transport hubs, in particular in the Far Eastern region. At the same time, with the undeniable importance of transport, the insufficiency of transport infrastructure is a limiting condition for the economic development of the Russian Far East.

The study carried out by the authors showed that taking into account the identified sources of synergy of multimodal transport hubs will increase the efficiency of transport enterprises, taking into account territorial characteristics.

The article examines the main transport hubs of federal importance with zones of influence, presents the dynamics of cargo transportation for 2018-2023 looking forward to 2035. Among the main trends in the development of the market, it is possible to highlight an increase in the range of transportation, an increase in the role of motor transport in the transportation of goods, an increase in the turnover of ports, in particular in the Far Eastern region, and an increase in tariffs for cargo transportation. The main drivers of the growth of the transport and logistics services market are highlighted and the risks of its development are identified. The presence of one transport hub of federal importance on the territory of the Russian Far East in conditions of a shortage of transport infrastructure reduces the ability of transport enterprises to effectively develop increased traffic flows.

The purpose of this study was to identify the synergy sources of multimodal transport hubs in the Russian Far East.

It is established that the development of transport infrastructure in order to form multimodal transport hubs at the intersection of the path of transport corridors and territories of advanced development will allow for the synergy effect of transport enterprises and nearby territories.

Keywords: multimodal transport hub, logistic, Russian Far East, synergy

For citation: Parygina D. V., Burovtsev V. V. Synergy sources of multimodal transport hubs of the Russian Far East. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):49–55. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_49.

Введение

Ввиду пограничного положения и удаленности Дальнего Востока России от центральной и западной части страны транспорт играет значительную роль в развитии региона. Наиболее важным фактором экономического развития является организация путей транспортного сообщения, в том числе логистика. Изменение транспортных потоков в восточном направлении (увеличение грузопотока почти на 50 % в 2022 г. по сравнению с 2021 г.) при ограничении ресурсов транспортной инфраструктуры показало дефицит предложения транспортных услуг, что является лимитирующим условием экономического развития Дальнего Востока России. С 2022 г. изменилась не только география транспортных перевозок, но и приоритетные виды доставки с применением нескольких видов транспорта.

Важность исследуемого вопроса подтверждается не только государственными документами, но и уже имеющимися исследованиями и работами по данной тематике [1–6]. Обособленное развитие видов транспорта в условиях ограничения ресурсов при большой территории региона – достаточно капиталоемкий процесс, требующий как значительных капиталовложений, так и времени, что приведет к упущенным возможностям для развития транспортной отрасли. Примерно 3/4 протяженности всех железнодорожных и автомобильных дорог сконцентрировано в южной части региона, в ряде северных и центральных районов Дальнего Востока формирование транспортной сети носит очаговый характер.

Так, 2022 г. показал, что дальневосточная инфраструктура не готова к обслуживанию стремительно увеличивающегося грузопотока, загрузка погрузо-разгрузочных механизмов увеличилась на 30 %. Нарастающие объемы грузопотока привели к увеличению практически вдвое емкости контейнерных линий, в основном в направлении Китая, и открытию новых направлений (Санкт-Петербург – ключевые порты Китая и Индии через Суэцкий канал), позволивших снять дополнительную нагрузку с Восточного полигона.

Согласованная работа участников мультимодального транспортного узла позволит при имеющихся ограничениях сформировать скоординированную транспортную сеть и усилить интеграцию различных видов транспорта, способствуя повышению мобильности и увеличивая общую эффективность предприятий транспорта.

Мультимодальный транспортный узел представляет собой пункт взаимодействия предприятий нескольких видов транспорта, являющийся центральной точкой маршрутной сети, где формируется пассажиро- и грузопоток с целью эффективной транспортировки груза или перевозки пассажиров по единому перевозочному документу при сохранении юридической самостоятельности участников объединения.

Все вышесказанное обуславливает цель настоящей работы, которая заключается в проведении исследования по выявлению источников синергии мультимодальных транспортных узлов Дальнего Востока России для

повышения эффективности работы предприятий транспорта.

Материалы и методы исследования

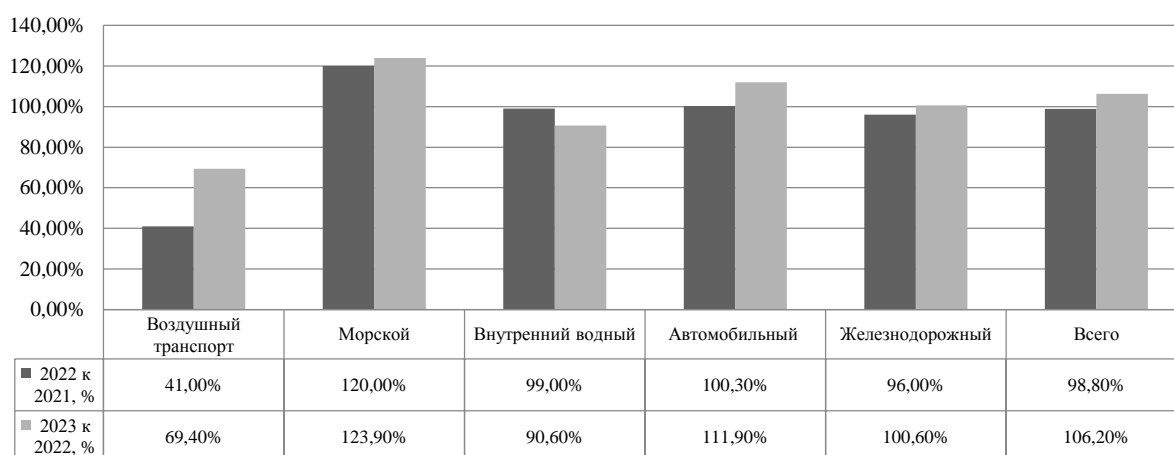
Исследование мультимодальных транспортных узлов Дальнего Востока России и выявление источников синергии проводилось с помощью таких методов, как структурный анализ, метод обобщения и комплексного анализа, что позволило проанализировать полученные результаты и прийти к общему выводу.

На основе данных открытых источников были определены основные тенденции развития рынка транспортно-логистических услуг, среди которых можно выделить увеличение объема перевозок (за исключением внутреннего водного транспорта) и дальности перевозки груза. В 2022 г. перевозка грузов по видам транспорта составила 7 953,1 млн т, что

составляет 98,8 % к уровню 2021 г., а грузооборот – 5 555,5 млрд т-км, т. е. 97,4 % к уровню 2021 г. (рис. 1).

Основными драйверами роста рынка являются импортозамещение, развитие электронной коммерции, увеличение объема инвестиций. На Дальнем Востоке в 2022 г. наблюдалось рекордное увлечение грузоперевозок, чуть более 50 %, прирост перевозок грузов через пограничные пункты пропуска составил 7,5 % (257,2 млн т грузов). В данных условиях необходимо обеспечить устойчивое взаимодействие объектов транспортного комплекса и ускоренное развитие транспортной и терминально-логистической инфраструктуры [7] путем эффективного использования имеющихся ресурсов, в том числе за счет организации транспортных потоков через мультимодальные транспортные узлы.

а)



б)

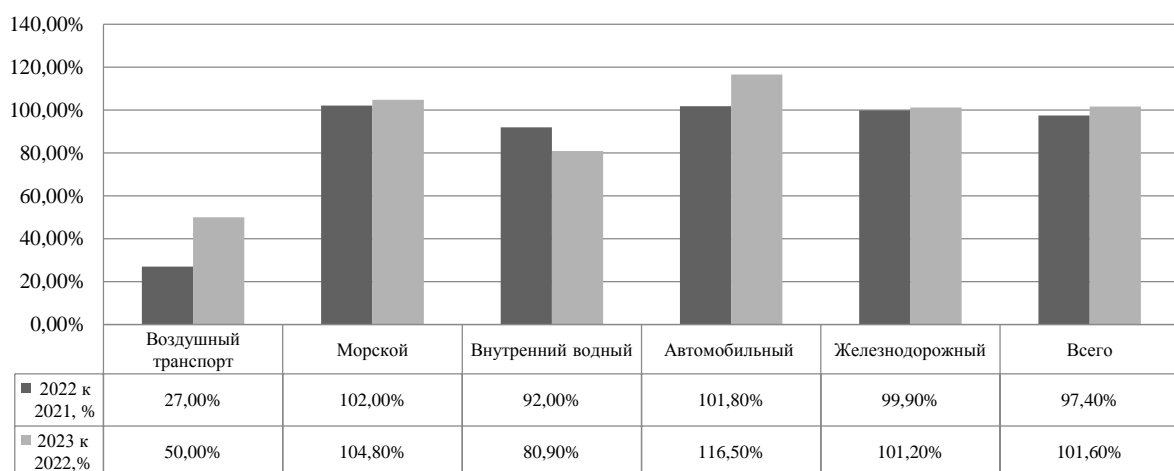


Рис. 1. Динамика объемов транспортных услуг в 2022, 2023 гг., % [8]:

а – перевозка грузов; б – грузооборот

В настоящее время можно выделить девять основных транспортных узлов федерального значения (таблица).

Перевозка грузов через транспортно-логистические центры федерального значения в 2023 г. составила около 61,05 млн т. По прогнозам на 2024 г. перевозки возрастут до 84,65 млн т, а к 2035 г. увеличатся в 1,5 раза. Данные о грузопотоке представлены с учетом взаимодействия железнодорожного и автомобильного транспорта (как основных видов транспорта во всех узлах), где в среднем около 74 % приходится на железнодорожный транспорт. В данном случае речь идет о бимодальных перевозках. В зависимости от специфики отдельных регионов, в том числе и Дальнего Востока, необходимо рассматривать в связке с железнодорожным и автомобильным транспортом водный и воздушный, тем более что недостаточное развитие мультимодальных перевозок, по данным [1], приводит к значительным избыточным совокупным издержкам – приблизительно 750 млрд р. в год.

Особенно остро вопрос ограничения ресурсов транспортной инфраструктуры и дефицита провозных мощностей стоит в Дальневосточном регионе, что является лимитирующим условием его экономического развития. С 2018 г. железнодорожный грузопоток вырос приблизительно в 3 раза, а дефицит провозной способности железнодорожных подходов оценивается в 95 млн т в год, по прогнозу к 2027 г. – 187 млн т, тогда как портовые мощности Дальневосточного бассейна превышают ее уже в 2 раза. Разбалансированность грузо-

потоков между видами транспорта привела к увеличению сроков доставки грузов в 1,5 раза.

Результаты исследования

Как уже было отмечено, развитие транспортной сети требует больших капиталовложений, а стремительно растущий спрос на грузоперевозки – принятия оперативных решений по организации логистики. В этих условиях развитие мультимодальных транспортных узлов с учетом источников синергии ускорит освоение увеличившегося грузопотока транспортной сети Дальнего Востока с эффективным использованием имеющихся ресурсов. Необходимо рассматривать внешние драйверы роста, т. е. источники синергии – возможности или пути достижения максимального эффекта синергии мультимодального транспортного узла.

Изменение направления грузоперевозок с запада на восток привело к пересмотру значимости международных транспортных коридоров. По сравнению с 2021 г. грузопоток в Китай увеличился на 5,5 %, а перевозки по трем веткам коридора «Север – Юг» на 60 %, к 2030 г. прогнозируется прирост почти в три раза за счет привлечения транзитных потоков в перспективе. Возросла нагрузка на порты Дальнего Востока (95–115 %), прирост внешнеторгового контейнерного трафика привел к увеличению сроков доставки груза и, как следствие, к организации дополнительных контейнерных поездов из Центральной России в направлении Дальнего Востока. Общий объем инвестиций на развитие транспортной инфраструктуры до 2030 г. составит порядка 10,5 трлн р.

Основные транспортные узлы федерального значения и потенциал грузопереработки

Транспортный узел	Зона влияния	Рейтинг	Грузопоток, тыс. т в год	
			2024	2035
1. Москва	Вся страна	6	19 130	28 724
2. Владивосток	Дальний Восток	6	12 914	19 932
3. Санкт-Петербург	Северо-запад России	5	13 109	17 437
4. Калининград	Запад России	5	2 443	4 797
5. Екатеринбург	Урал	4	9 558	13 430
6. Самара	Поволжье	3	4 844	10 590
7. Нижний Новгород	Центральная Россия	3	6 848	10 598
8. Новосибирск	Сибирь	2	5 493	10 897
9. Ростов-на-Дону	Юг России	1	10 312	21 910
Итого	–		84 651	135 315

Примечания: 1. Рейтинг ТУ выстраивался исходя из совокупности данных по транспортной инфраструктуре всех видов транспорта зоны тяготения.

2. Таблица составлена на основе [9].



Рис. 2. Источники синергии мультимодальных транспортных узлов Дальневосточного региона

В целях ускоренного развития мультимодальных транспортных узлов вблизи транспортных коридоров следует учитывать территории опережающего развития. Особый режим налогообложения, ряд льгот для бизнеса способствуют концентрации грузов и привлечению дополнительных инвестиций в развитие транспортной сети. Например, при перевозке отдельных категорий товаров через порты Дальнего Востока с использованием нескольких видов транспорта предприятия освобождаются от уплаты таможенных пошлин и налогов [10]. Это позволит снизить стоимость перевозки, привлечь грузоотправителей, расширить транспортную сеть и получить значительные эффекты синергии для всех участников перевозки. Таким образом, развитие мультимодальных транспортных узлов на территориях опережающего развития и путей перемещения грузопотока по транспортным коридорам будет способствовать формированию эффекта синергии как для предприятий транспорта, так и для регионов тяготения транспортного узла (рис. 2).

Фактически все транспортные узлы федерального значения расположены на западе и в центральной части страны, и только один, Владивосток, находится на Дальнем Востоке. В условиях стремительно меняющейся логистики одного транспортного узла недоста-

точно для эффективного освоения увеличивающихся транспортных потоков.

Если рассматривать федеральные транспортные узлы на западе России, то можно отметить, что они сконцентрированы вблизи международных транспортных коридоров, что позволяет генерировать необходимый объем грузопотока. Для Дальнего Востока, ввиду очагового формирования транспортной сети, развивать мультимодальные транспортные узлы следует в совокупности с территориями опережающего развития.

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод, что развитие транспортной сети имеет первостепенное значение для экономического развития Дальнего Востока России. Особенности территориального развития предполагают применение дифференцированного подхода к формированию транспортной сети региона с учетом источников синергии, к которым можно отнести территории опережающего развития, транспортные коридоры. Локальное развитие мультимодальных транспортных узлов позволяет добиться четкости реализации льготных режимов (налоговых, таможенных), упорядочить инвестиции в инфраструктуру, избежать непроизводительного распыления ограниченных ресурсов, ускоряя и увеличивая их эффективность и отдачу.

Список источников

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозным периодом до 2035 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р // Министерство транспорта Российской Федерации : [сайт]. URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozm-na-period-do-2035-goda> (дата обращения: 29.11.2023).
2. Бардаль А. Б. Транспорт Дальнего Востока России: возможности и ограничения // Восточная аналитика. 2010. № 1. С. 24–27. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transport-dalnego-vostoka-rossii-vozmozhnosti-i-ogranicheniya> (дата обращения: 29.11.2023).
3. Карпов Ю. А. Анализ транспортной обеспеченности Дальневосточного федерального округа // Региональная экономика и управление : электронный научный журнал. 2022. № 4 (72). URL: <https://eee-region.ru/article/7219/> (дата обращения: 29.11.2023).
4. Аврамчикова Н. Т., Рожнов И. П., Захарова Л. Н. Мультимодальные транспортные узлы: преимущества и перспективы развития // Менеджмент социальных и экономических систем. 2019. № 4. С. 25–30. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/multimodalnye-transportnye-uzly-preimuschestva-i-perspektivy-razvitiya> (дата обращения: 11.12.2023).
5. Бирюкова О. Ю. Логистические технологии синхронизации взаимодействия смежных видов транспорта в национальной экономике России // Инновационная экономика : материалы IV Международной научной конференции (Казань, октябрь 2017 г.). Казань : Бук, 2017. С. 91–93. URL: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/262/13032/> (дата обращения: 10.12.2023).
6. Буровцев В. В., Парыгина Д. В. Факторы синергии в модели организации политранспортного хаба // Политранспортные системы : материалы XII Международной научно-технической конференции (Новосибирск, 21–22 сентября 2022 г.) : в 3 ч. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2022. Ч. 3. С. 196–200.
7. Стратегическое представление цифровой трансформации транспортно-логистической экосистемы Дальневосточного региона / Р. Г. Король, Н. А. Самсонова, М. В. Холоша, Н. С. Нестерова // *Transport Business in Russia*. 2023. № 5. С. 8–11.
8. Табах А., Подругина А. Транспорт и логистика: переориентация направлений и изменения в структуре // Эксперт РА : [сайт]. URL: https://raexpert.ru/researches/traffic_2023/?ysclid=lq353np4c5652049647. Дата публикации: 17.10.2023.
9. Министерство транспорта Российской Федерации : [официальный сайт]. 2010–2023. URL: mintrans.gov.ru (дата обращения: 15.10.2023).
10. Постановление Правительства РФ от 12.07.2023 № 1139 «Об освобождении от предоставления обеспечения исполнения обязанности по уплате таможенных пошлин, налогов в отношении отдельных категорий товаров». Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

References

1. Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast period up to 2035. Approved by order of the Government of the Russian Federation No. 3363-r dated 27.11.2021. (In Russ.).
2. Bardal A. B. Transport of the Russian Far East: opportunities and limitations. *Oriental Analytics*. 2010;(1). (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transport-dalnego-vostoka-rossii-vozmozhnosti-i-ogranicheniya>.
3. Karpov Yu. A. Analysis of transport security of the Far Eastern Federal District. *Regional Economy and Management: Electronic Scientific Journal*. 2022;(72). (In Russ.). URL: <https://eee-region.ru/article/7219/>.
4. Avramchikova N. T., Rozhnov I. P., Zakharova L. N. Multimodal transport hubs: advantages and development prospects. *Management of Social and Economic Systems*. 2019;(16). (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/multimodalnye-transportnye-uzly-preimuschestva-i-perspektivy-razvitiya>.
5. Biryukova O. Yu. Logistic technologies for synchronizing the interaction of transport adjacent modes in the national economy of Russia. *Innovative Economics: Proceedings of the IV International Scientific Conference (Kazan, October 2017)*. Kazan: Buk; 2017. P. 91–93. (In Russ.). URL: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/262/13032/>.
6. Burovtsev V. V., Parygina D. V. Synergy factors in the organization model of a polytransport hub. *Polytransport systems: Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference (September 21–22, 2022)*. In 3 parts. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Transport University; 2022. P. 196–200. (In Russ.).

7. Korol R. G. Samsonova N. A., Kholosha M. V., Nesterova N. S. Strategic representation of the digital transformation of the transport and logistics ecosystem of the Far Eastern region. *Transport Business in Russia*. 2023;(5):8–11. (In Russ.).

8. Tabakh A., Drugina A. Transport and logistics: reorientation of directions and changes in structure. *Macroeconomics*. Expert Rating Agency. 17.10.2023. (In Russ.). URL: https://raexpert.ru/researches/traffic_2023/?ysclid=lq353np4c5652049647.

9. Ministry of Transport of the Russian Federation: [official site]. 2010–2023. (In Russ.). URL: mintrans.gov.ru.

10. Decree of the Government of the Russian Federation dated 12.07.2023 No. 1139 On exemption from Providing Security for the Fulfillment of the obligation to pay Customs duties and taxes in respect of certain categories of goods. (In Russ.).

Информация об авторах

Д. В. Парыгина – старший преподаватель кафедры «Экономика и коммерция» Дальневосточного государственного университета путей сообщения.

В. В. Буровцев – ректор Дальневосточного государственного университета путей сообщения, доктор экономических наук, доцент.

Information about the authors

D. V. Parygina – Senior Lecturer of the Economic and Commerce Department, Far Eastern State Transport University.

V. V. Burovtsev – Rector of the Far Eastern State Transport University, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor.

Статья поступила в редакцию 20.12.2023; одобрена после рецензирования 29.01.2024; принята к публикации 08.04.2024.

The article was submitted 20.12.2023; approved after reviewing 29.01.2024; accepted for publication 08.04.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.078.12
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_56

Проблемы организации, функционирования и развития сухих портов в Сибири

Виктор Михайлович Бунеев¹, Наталья Борисовна Попова^{2✉}, Марк Евгеньевич Корягин³

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

^{2,3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ buneev_vm@mail.ru

² pnb1512@yandex.ru✉

³ markkoryagin@yandex.ru

Аннотация. Крупные морские порты расположены в пределах городских поселений и в своем развитии территориально ограничены. В процессе развития как приморские города, так и порты разрастаются, создавая инфраструктурные проблемы. В настоящее время это выражается в отсутствии дополнительных территорий для терминалов, в недостаточности развития внутрипортовых автомобильных и железнодорожных подъездных путей, а также припортовых станций. Сложившееся положение ограничивает пропускную способность морских и речных портов. Решение задач согласования и координации при функционировании морских и сухопутных видов транспорта видится в использовании логистических технологий и принципов управления транспортными процессами и системами в новой организационной форме. Такой формой является сухой порт – терминал, расположенный вне территории морского порта.

Несмотря на сравнительно небольшие сроки своего существования, сухие порты уже имеют свою историю. Вначале это были небольшие по размеру территориально-производственные образования, располагавшиеся вблизи морских портов. Затем сухие порты стали размещать в более отдаленных областях. Транспортно-экономические (грузовые) связи с ними, осуществляемые посредством водного и автомобильного транспорта, обеспечивают эффективность логистических услуг в международной торговле.

В статье исследованы проблемы организации, функционирования и развития сухих портов, уточнены определение понятия и функции сухого порта. Рассмотрена концепция сухого порта с функциями транспортного логистического центра для перевалки морских грузов на внутренних направлениях. Установлены предпосылки развития сухого порта в системе транспортных коридоров при участии сибирских рек и Северного морского пути.

Ключевые слова: сухой порт, контейнерный грузопоток, маршруты доставки, логистические технологии, территориально-транспортная инфраструктура

Для цитирования: Бунеев В. М., Попова Н. Б., Корягин М. Е. Проблемы организации, функционирования и развития сухих портов в Сибири // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 56–62. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_56.

TRANSPORT

Original article

Problems of organization, functioning and development of dry ports in Siberia

Victor M. Buneev¹, Natalya B. Popova^{2✉}, Mark E. Koryagin³

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

^{2,3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ buneev_vm@mail.ru

² pnb1512@yandex.ru✉

³ markkoryagin@yandex.ru

Abstract. Large seaports are located within urban settlements and they are territorially limited in their development. In the process of their development, both coastal cities and ports create infrastructural problems. Currently, this is expressed in the lack of additional territories for terminals, in the insufficient development of intra-port road and railway access roads, as well as port stations. The current situation limits capacity in sea and river ports. The solution of the problems of coordination in the functioning of sea and land modes of transport is seen in

the use of logistics technologies and principles of managing transport processes and systems in a new organizational form. This form is a dry port – that is, a terminal located outside the territory of a seaport.

Despite the relatively short period of its existence, dry ports already have their own history. At first, these were small-sized territorial production formations located near seaports. Then dry ports began to be located in more remote areas. Transport and economic (freight) links with them, through water and road transport, ensure the effectiveness of logistics services in international trade.

The article examines the problems of organization, operation and development of dry ports, and clarifies the definition of the concept and function of a dry port. The concept of a dry port with the functions of a transport logistics center for transshipment of sea cargo on domestic routes is considered. The prerequisites for the development of a dry port in the system of transport corridors, with the participation of Siberian rivers and the Northern Sea Route, have been established.

Keywords: dry port, container cargo flow, delivery routes, logistics technologies, territorial transport infrastructure

For citation: Buneev V. M., Popova N. B., Koryagin M. E. Problems of organization, functioning and development of dry ports in Siberia. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):56–62. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_56.

Введение

В современных условиях динамичного развития международной торговли управленческие структуры должны оперативно реагировать на изменяющуюся ситуацию, рассматривать маршруты доставки грузов в нескольких вариантах и иметь грузы в высокой степени готовности к отправке в любой момент. Между тем в целом ряде портов страны существуют проблемы в организации построения работы и логистически грамотного управления деятельностью транспортно-дорожного комплекса.

Особенно сложное транспортно-дорожное положение складывается в морских портах, где на береговой территории одновременно стыкуются рельсовые и автодорожные пути. Так, российские порты Балтики (Санкт-Петербург, Усть-Луга и др.), порты Приморья (Владивосток), азово-черноморские порты (Новороссийск) и другие российские порты уже не в состоянии обеспечить на должном уровне прием, хранение и обработку возрастающих контейнерных грузопотоков.

Задачи согласования и координации грузовой работы на береговой территории представляются выполнимыми при использовании новой организационной формы. Такой формой является сухой порт, т. е. терминал, расположенный вне территории морского порта. Термин «сухой порт» означает транспортный объект, на котором, в отличие от морского порта, отсутствуют грузовые операции с судами. Предпосылки формирования и развития объекта «сухой порт» исходят из зарубежных и отечественных научных и проектных разработок.

Так, судя по публикациям, во Вьетнаме развитие транспортно-логистической системы «су-

хой порт» проявилось в устойчивой тенденции снижения перегруженности морских портов, что привело к совершенствованию работы складов и сокращению сроков таможенного оформления [1]. В рамках исследования [2] описано, каким образом было определено оптимальное место для развития сухого порта в Швеции. Выбор местоположения такого объекта был сделан с использованием аналитического сетевого процесса, в ходе которого было установлено место оптимальной организации логистических связей. Работа [3] посвящена анализу развития внутренних систем распределения грузов для продвижения внутренних морских ворот по всему миру. Это выражается в построении пространственных и функциональных отношений с соседними и/или удаленными шлюзовыми портами, учете конкуренции с грузовыми автомобилями и баржами в Европе. В рамках исследования [4] обосновано расположение сухого порта с учетом его мощности и преимуществ масштаба. Определены расходы, связанные со строительством и эксплуатацией сухого порта, транспортировкой, временными затратами и затратами на взаимодействие с окружающей средой. Авторы построили совместную модель оптимизации местоположения сухого порта и схемы транспортировки. В работе [5] утверждается, что концепция сухих портов вызывает значительный интерес среди практиков и исследователей в последние годы. Примеры сухих портов по всему миру различаются в зависимости от местоположения, функций, услуг, собственности и уровня «зрелости».

Публикации отечественных авторов главным образом посвящены обоснованию целесообразности создания сухих портов для эф-

фективного функционирования, например, дальневосточных транспортных узлов [6]. Объект «сухой порт» рассматривается с позиций возможностей перспективного развития территории [7]. В ряде работ, в частности [8], исследуются логистические решения проблемы взаимодействия видов транспорта, а также развития сухих портов международного значения [9]. На основе сухих портов исследована логистика взаимодействия железнодорожного и морского видов транспорта [10]. Монографическое исследование посвящено комплексному решению проблем организации, функционирования и развития системы «морской порт – сухой порт» [11]. Следовательно, в научных публикациях как отечественных, так и зарубежных авторов рассматриваются различные аспекты, связанные с вопросами организации функционирования и развития сухих портов.

Вместе с тем в современных условиях развития территориальных транспортных связей научной проработки требует проблема формирования сети сухих портов на территории России с учетом взаимодействия этих комплексов с Северным морским путем (СМП) и создания на этой базе международных транспортных коридоров. Этого требуют как геополитические и геостратегические интересы России, так и сложившаяся технологическая необходимость создания новых форм территориальных транспортных объектов [12, 13].

Постановка проблемы и задач

Межправительственное соглашение о «сухих портах» предусматривает единое определение. Сухой порт – это «место внутри территории страны с логистическим центром, соединенным с одним или более видами транспорта, предназначенным для обработки, временного хранения и предусматриваемого законом осмотра грузов, перевозимых в процессе международной торговли, и совершения применимых таможенных контрольных функций и формальностей» [11–13].

Таким образом, сухой порт – это организационная форма транспортно-логистического объекта (узла либо комплекса), непосредственно связанного автомобильным и (или) железнодорожным сообщением с морским портом, на котором (узле или комплексе) осу-

ществляется перевалка морских грузов на внутренние направления и обратно, исключая погрузочно-разгрузочные работы на судах.

Реализация перечисленных выше особенностей на практике выразилась в том, что первыми в России стали строить тыловые терминалы для разгрузки портовой инфраструктуры в Санкт-Петербурге. Такими стали терминально-логистический комплекс «Модуль Пулковский» (2007 г.) и «Модуль Южный» (2008 г.), связанные с морским портом, железной дорогой и значимыми автомагистралями Санкт-Петербурга. Также «Логистика-терминал», действующий с 2010 г., и транспортно-логистический парк «Янино» – первый логистический центр, на территории которого были объединены контейнерный и железнодорожный терминалы, складские и таможенный комплексы [6, 12]. Перечень тыловых терминалов в настоящее время значительно расширен, и в качестве сухих портов они располагаются на территориях, весьма далеких от моря [14].

Необходимо подчеркнуть, что четких разграничений между распределительными комплексами, логистическими центрами и сухими портами нет, но можно отметить, что так называемый классический сухой порт – это площадка, где переваливаются и подрабатываются грузы различной партионности с возможностью их мультимодальной доставки. Другими словами, сухой порт является универсальным по своему технологическому содержанию, т. е. способен оказывать весь спектр услуг по обработке различных видов грузов [9].

Общий принцип работы сухого порта рассмотрен на примере схемы или маршрутов следования грузопотоков, отправленных из морского порта на внутреннее направление и обратно, и представлен графически на рис. 1.

Организация работы состоит в следующем. Груз прибывает в морской порт, где осуществляется его выгрузка из судна и погрузка на транспортное средство, либо из пунктов отправления перемещается до сухого порта. И уже здесь, на месте, выполняется целый ряд функций, для которых этот комплекс предназначен. В частности, это переработка и хранение контейнеров и грузов; погрузка контейнеров в подвижные транспортные средства и выгрузка из них при перемещении наземным транспортом; экспедиционное обслуживание; консолидация грузов; таможенное оформление и пограничный

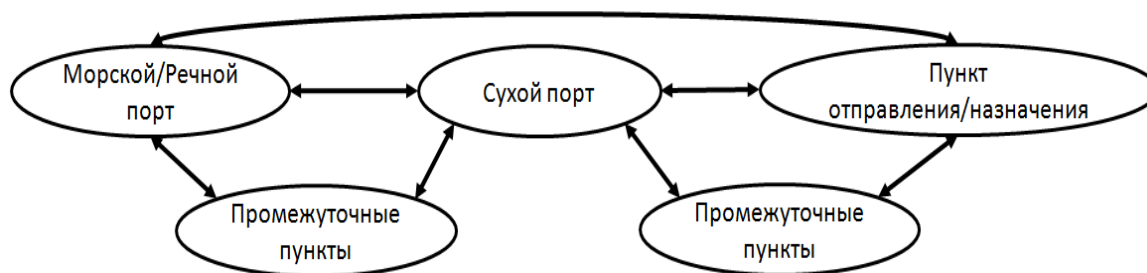


Рис. 1. Маршруты следования грузопотоков через сухой порт

контроль; брокерские услуги; ремонт контейнеров, оборудования, вагонов, автомобилей, прицепов и полуприцепов.

Для выполнения перечисленных выше функций в сухом порту должна быть соответствующая инфраструктура. В частности, это склад временного хранения; открытые площадки для хранения контейнеров; сооружения для обслуживания и ремонта стандартных контейнеров; автомобильные и железнодорожные подъездные пути, место перевалки грузов; площадка для таможенного оформления товаров.

Необходимо подчеркнуть, что сухие порты с железнодорожным обслуживанием, в отличие от типовых морских портов, должны иметь более развитую железнодорожную инфраструктуру, способную работать с полно-размерными поездами.

Организация и функционирование сухого порта

Существенное значение при организации сухого порта имеет его местоположение. С одной стороны, он не должен быть оторванным от морского порта, а с другой – от товарных складов. Следовательно, его следует располагать на пересечении основных логистических маршрутов. Кроме того, сухие порты должны находиться в транспортном сообщении с другими сухими портами, пограничными пунктами (наземными постами таможенного контроля), комплексными контрольно-пропускными пунктами, морскими портами, терминалами внутренних водных путей и/или аэропортами.

Примером оптимального местоположения являются балтийский ТЛЦ («Логистика-Терминал» в Шушарах) и логистический парк «Янино» (Ленинградская область), а также ТЛЦ «Белый Раст» в Дмитровском районе Московской области – первый международный проект

развития терминально-логистической инфраструктуры, реализованный ОАО «РЖД» и китайской компанией «Ляонин Порт».

Однако существуют регионы страны с низким уровнем транспортной доступности. Это арктические территории Европейской России, Сибири, крайний северо-восток страны (Чукотка). Примером тому могут служить морские порты Арктического побережья с неразвитой инфраструктурой: Диксон (Енисейский залив Карского моря), Тикси (бухта моря Лаптевых), Зеленый Мыс (Якутия, правый берег реки Колымы), Анадырь (бухта на берегу залива Берингова моря). Для связи морских и сухих портов здесь могут быть использованы речной транспорт и зимники.

В связи с этим возникает потребность в научном обосновании предложений по выбору местоположения и параметров сухого порта. Методический инструментальный исследования этой проблемы и решения комплекса задач основан на принципах системного подхода и методов технико-экономического обоснования транспортных узлов. Приняты во внимание также организационно-экономические и методологические предпосылки формирования сухих портов, рассмотренные в работах [6, 10, 11].

Кроме того, учтен опыт создания сухих портов и оценки перспектив их развития, чему посвящены исследования, обобщенные в работах [7, 9, 15].

Обоснование местоположения сухого порта определяется на основании маршрутов следования грузопотоков и транспортно-логистической схемы доставки грузов, представленной в виде транспортной задачи.

Перспективы развития сухих портов

Межправительственным соглашением о сухих портах был определен список действующих

объектов инфраструктуры, работающих по принципам сухих портов в России [12, 13]. С учетом современных реалий этот перечень можно дополнить терминально-логистическими мощностями транспортных компаний (Freight Village Vorsino в Калужской области, в Домодедове Московской области, в Хабаровске, Томске, Новосибирске, Владивостоке). Большинство таких терминалов расположено вдоль Транссибирской магистрали, как основного маршрута транспортного коридора «Восток – Запад». Выбрав такое местоположение, компании получают преимущества наличия инфраструктуры сухих портов на Дальнем Востоке, в Сибири и вблизи главного транспортного пункта России – Москвы. Контроль над сухими портами в ключевых точках Транссибирской магистрали позволяет сбалансировать грузопоток, оптимизировать расходы, расширять базу клиентов и успешно развивать интермодальные перевозки [9].

Наиболее успешно в Сибири развивается транспортно-логистическая инфраструктура в Новосибирске. Здесь функционируют ТЛЦ «Клещиха», контейнерный терминал «Северный», контейнерный терминал «Континент» и строящийся ТЛЦ «Сибирский». Первая очередь введена в эксплуатацию в октябре 2023 г., а вторая планируется в 2025 г. Проектная перерабатывающая мощность составляет 1,0 млн контейнеров в двадцатифутовом эквиваленте в год с возможностью обрабатывать полносоставные контейнерные поезда. Общая площадь этого ТЛЦ – 300 га. Кроме того, на территории ТЛЦ

«Сибирский» на станции Чик Западно-Сибирской железной дороги будет создан целый ряд дополнительных возможностей для обработки грузов. Это склады временного хранения, проведение операций по сортировке, оформлению таможенных документов и фитосанитарный контроль [14, 15].

Таким образом, в Новосибирске формируется и развивается целый транспортно-логистический комплекс терминалов, который, по сути, является крупнейшим в Сибири сухим портом.

Удачное расположение сухого порта Новосибирск обусловлено прохождением через этот пункт основных транспортных коридоров. Это «Восток – Запад» (Владивосток – Санкт-Петербург; Владивосток – Астрахань; Владивосток – Новороссийск; Владивосток – Брест) и «Юг – Север» (Кузбасс – Мурманск), а также выход к Северному морскому пути по Оби до Салехарда (порт в долине реки Оби на Крайнем Севере) и Сабетты (порт, восточный берег полуострова Ямал у Обской губы Карского моря).

Другой выход на трассу СМП (Новосибирск – Ачинск – Лесосибирск по железной дороге и далее по реке Енисей до порта Дудинка) отображен на рис. 2, где синим цветом отображены водные пути, красным – рельсовые пути в исследуемом регионе.

Предпосылки развития сети сухих портов Сибирского региона видятся в формировании на базе Новосибирска сети таких образований вдоль трассы Транссиба, в составе транспортных коридоров и на водных магистралях рек Обь, Енисей и Лена.

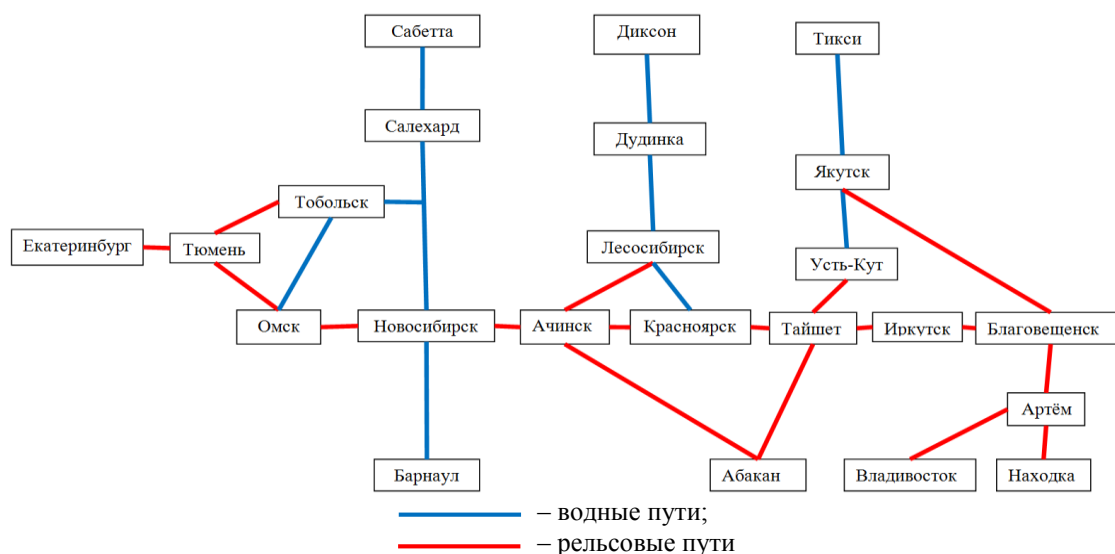


Рис. 2. Схема взаимодействия сухих портов в составе транспортных коридоров с участием речного транспорта на территории восточных регионов России

Заключение

На основе анализа полученных результатов по теме исследования уточнены определение и функции сухого порта, его инфраструктура, выявлены предпосылки развития сухих портов как транспортно-логистических объектов. Термин «сухой порт» в привычном переводе с европейских языков уточнен исходя из российской практики организации и реализации всех аспектов перевозочного процесса. То есть это транспортно-логистический объект с функциями оказания всего комплекса услуг при доставке экспортно-импортных грузов, кроме перегрузочных работ на судах.

Предпосылками для формирования сухого порта служат следующие объективные причины и обстоятельства:

- 1) загруженность морского терминала высека;
- 2) хранение контейнеров (как и иных грузов) в сухом порту значительно дешевле;
- 3) существенна экономия на таможенных платежах (услуги оплачиваются непосред-

ственно перед вывозом груза из сухого порта, где он может храниться долгое время);

- 4) улучшается логистика грузов, т. е. имеется возможность формирования товарных партий.

Предпосылки формирования и развития сухих портов по трассе Транссибирской магистрали обусловлены необходимостью контроля прохождения грузов в отдельных точках. По решению Правительства Российской Федерации в ближайшее время такие объекты будут построены в Екатеринбурге, Новосибирске, Благовещенске и Артеме. Кроме того, имеются предпосылки строительства ТЛЦ разного уровня в Сибири, например: в Салехарде, Красноярске, Иркутске и Якутске (Нижнем Бестяхе). По результатам обоснования рекомендуется в Красноярском крае местоположением выбрать Ачинск, а в Иркутской области – Тайшет. Кроме того, развитие системы сухих портов будет способствовать включению главных сибирских рек в сферу функционирования и развития СМП. Предпочтение отдается енисейским вариантам.

Список источников

1. Nguyen T. C. H., Dang T. N. Dry ports in Vietnam: Challenges for the development // *Journal of Multidisciplinary Research and Development*. 2019. Vol. 5 (12). P. 57–61.
2. Roso V. The dry port concept-application in Sweden // *Logistics Research Network*. 2005. P. 379–382.
3. Rodrigue J. P., Notteboom T. Dry ports in European and North American intermodal rail systems: Two of a kind? // *Research in Transportation Business & Management*. 2012. Vol. 5. P. 4–15.
4. Joint Optimization of a Dry Port with Multilevel Location and Container Transportation: The Case of Northeast China / F. Pian, Q. Shi, X. Yao [et al.] // *Complexity*. 2021. Vol. 2021. P. 1–16.
5. Khaslavskaya A., Roso V. Dry ports: research outcomes, trends, and future implications // *Maritime Economics & Logistics*. 2020. Vol. 22. P. 265–292.
6. Король Р. Г., Дороничев А. В. Обоснование целесообразности создания «сухих портов» для эффективного функционирования дальневосточных транспортных узлов // *Известия Транссиба*. 2018. № 1 (33). С. 130–138.
7. Останин В. А. «Сухой порт»: возможности и институциональные проблемы развития территории // *Столыпинский вестник*. 2020. Т. 2, № 4. С. 272–299.
8. Лахметкина Н. Ю., Щелкунова И. В., Фомичева О. А. Логистические взаимодействия в системе «станция – морской порт» // *Мир транспорта*. 2018. Т. 16, № 2. С. 178–187.
9. Лахметкина Н. Ю., Олейников А. С. Развитие «сухих портов» международного значения // *Железнодорожный транспорт*. 2019. № 3. С. 11–15.
10. Резер С. М., Балтаг М. Н. Логистика взаимодействия железнодорожного и морского транспорта на основе «сухих портов» // *Транспорт: наука, техника, управление : научный информационный сборник*. 2016. № 9. С. 3–6.
11. Система «морской порт – «сухой порт»» / Д. С. Муравьев, А. Н. Рахмангулов, Н. А. Осинцев [и др.]. Москва : Инфра-М, 2022. 176 с.
12. Межправительственное соглашение о «сухих портах» // Министерство транспорта Российской Федерации : [официальный интернет-ресурс]. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/10807> (дата обращения: 05.03.2024).
13. Проблема повышения эффективности деятельности отечественного рынка логистических услуг актуальна для России // *Транспорт России : Всероссийская транспортная еженедельная информационно-аналитическая газета – официальный печатный орган Министерства транспорта РФ*. URL: <https://transportrussia.ru/item/5199-rynok-nuzhdaetsya-v-uslugakh.html> (дата обращения 02.03.2024).

14. Генеральная схема развития сети ТЛЦ // Морские вести России : [сайт]. URL: <https://morvesti.ru/analitika/1685/89782> (дата обращения: 03.03.2024).

15. Инвестор транспортно-логистического комплекса в Новосибирске построит сухой порт // SibRu.com : новости Сибири : [сайт]. URL: <https://sibru.com/2023/03/01/investor-transportno-logisticheskogokompleksa-v-novosibirske-postroit-suhoy-port-v-primore-80%D1%82%D0%B0%D1%85.pdf> (дата обращения: 06.03.2024).

References

1. Nguyen T. C. H., Dang T. N. Dry ports in Vietnam: Challenges for the development. *Journal of Multidisciplinary Research and Development*. 2019;5(12):57–61.
2. Roso V. The dry port concept-application in Sweden. *Logistics Research Network*. 2005. P. 379–382.
3. Rodrigue J. P., Notteboom T. Dry ports in European and North American intermodal rail systems: Two of a kind? *Research in Transportation Business & Management*. 2012;5:4–15.
4. Pian F., Shi Q., Yao X. [et al.]. Joint Optimization of a Dry Port with Multilevel Location and Container Transportation: The Case of Northeast China. *Complexity*. 2021;2021:1–16.
5. Khaslavskaya A., Roso V. Dry ports: research outcomes, trends, and future implications. *Maritime Economics & Logistics*. 2020;22:265–292.
6. Korol R. G., Doronichev A. V. The Rationale for the Creation of Dry Ports for Efficient Functioning of the Far Eastern Transport Hub. *Izvestia Transsiba*. 2018;(33):130–138. (In Russ.).
7. Ostanin V. A. Dry Port: Opportunities and Institutional Problems of Territory Development. *Stolypin Annals*. 2020;2(4):272–299. (In Russ.).
8. Lakhmetkina N. Yu., Shchelkunova I. V., Fomicheva O. A. Logistics Interaction within the System of Rail Station and Sea Port. *World of Transport and Transportation*. 2018;16(2):178–187. (In Russ.).
9. Lakhmetkina N. Yu., Oleinikov A. S. Development of Dry Ports of International Importance. *Railway Transport*. 2019;(3):11–15. (In Russ.).
10. Rezer S. M., Baltag M. N. Logistics Between Rail and Maritime Transport on the Basis of Dry Ports. *Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection*. 2016;(9):36. (In Russ.).
11. Muravyov D. S., Rakhmangulov A. N., Osintsev N. A. [et al.]. System “sea port – dry port”. Moscow: Infra-M; 2022. 176 p. (In Russ.).
12. Intergovernmental Agreement on Dry Ports: [website]. (In Russ.). URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/10807>.
13. The problem of increasing the efficiency of the domestic logistics services market is relevant for Russia: [website]. (In Russ.). URL: <https://transportrussia.ru/item/5199-rynok-nuzhdaetsya-v-uslugakh.html>.
14. The general scheme of Transport and Logistics Centre network development: [website]. (In Russ.). URL: <https://morvesti.ru/analitika/1685/89782>.
15. The investor of the transport and logistics complex in Novosibirsk to build a dry port: [website]. (In Russ.). URL: <https://sibru.com/2023/03/01/investor-transportno-logisticheskogokompleksa-v-novosibirske-postroit-suhoy-port-v-primore-80%D1%82%D0%B0%D1%85.pdf>.

Информация об авторах

В. М. Бунеев – профессор кафедры «Управление работой флота» Сибирского государственного университета водного транспорта, доктор экономических наук.

Н. Б. Попова – профессор кафедры «Экономика транспорта» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор географических наук.

М. Е. Корягин – профессор кафедры «Высшая математика» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

Information about the authors

V. M. Buneev – Professor of the Water Transport Management Department, Siberian State University of Water Transport, Doctor of Economical Sciences.

N. B. Popova – Professor of the Transport Economics Department, Siberian Transport University, Doctor of Geographical Sciences.

M. E. Koryagin – Professor of the Higher Mathematics Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

Статья поступила в редакцию 12.03.2024; одобрена после рецензирования 13.03.2024; принята к публикации 10.04.2024.

The article was submitted 12.03.2024; approved after reviewing 13.03.2024; accepted for publication 10.04.2024.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.027+06
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_63

Геометрическая маршрутизационная модель нахождения рациональных распределений порожних вагонопотоков в припортовой транспортно-технологической системе

Вячеслав Михайлович Задорожний^{1✉}, Виктор Алексеевич Богачев²,
Тарас Викторович Богачев³, Александра Сергеевна Кравец⁴

^{1,2,4} Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

³ Ростовский государственный экономический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ zadorozniy91@mail.ru✉

² bogachev-va@yandex.ru

³ bogachev73@yandex.ru

⁴ kravec_as@mail.ru

Аннотация. В последние годы происходит активное перенаправление основной части грузо- и вагонопотоков, зарождающихся на экономическом пространстве России, в страны Азиатского и Африканского континентов. Указанный транспортно-логистический разворот имеет стратегический характер и, по-видимому, окажется продолжительным. Несомненно, что происходящие изменения способствуют повышению уровня актуальности соответствующих транспортно-логистических исследований. Возрастает значение подходов и методов, разработка которых опирается на новые, обоснованные в математическом отношении, логистические идеи. Не теряют своего значения предложенные ранее подходы при условии их развития, модификации и адаптивирования к экономико-географическим изменениям, происходящим в перевозочном процессе в целом. При этом практически значимыми являются в первую очередь результаты исследований, представляющие собой теоретически обоснованные транспортно-логистические схемы общего характера, реализация которых позволяет активизировать механизм функционирования рынка (для рассматриваемого в статье направления это прежде всего рынок оперирования вагонами). Обращая внимание на мультимодальность подавляющего большинства экономически значимых грузоперевозок, отметим, что в силу особенностей современного перевозочного процесса объектами, особо востребованными в проведении указанных выше исследований, являются припортовые транспортно-технологические системы.

Целью настоящего исследования является разработка обоснованного в математическом отношении и целесообразного с практической точки зрения подхода в транспортно-логистическом моделировании процесса регулирования вагонопотоков на железнодорожном полигоне (или на рассматриваемой его части). В качестве теоретической основы выступает модификация разработанного ранее авторами метода экономико-географического разграничения областей влияния субъектов перевозочного процесса. Главной составляющей новой модели является коэффициент дорожной непрямолинейности, вводимый для рассматриваемых припортовых станций отправления вагонов. Указанный коэффициент позволяет учитывать специфику расположения транспортной сети по отношению к возможным станциям назначения.

Результатом исследования является геометрическая маршрутизационная модель территориального олигополистического рынка услуг по транспортировке порожних вагонов, образованного рассматриваемыми станциями отправления. Модель реализована в полном виде в среде системы компьютерной математики Maxima (Free Ware).

Ключевые слова: порожний вагонопоток, припортовая транспортно-технологическая система, коэффициент дорожной непрямолинейности, геометрическая маршрутизационная модель, области влияния станций, дуополия, олигополия

Для цитирования: Геометрическая маршрутизационная модель нахождения рациональных распределений порожних вагонопотоков в припортовой транспортно-технологической системе / В. М. Задорожний, В. А. Богачев, Т. В. Богачев, А. С. Кравец // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 63–70. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_63.

Geometric routing model in finding rational distributions of empty wagonflows in port transport-technological system

Vyacheslav M. Zadorozhnyi^{1✉}, Victor A. Bogachev², Taras V. Bogachev³, Alexandra S. Kravets⁴

^{1,2,4} Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

³ Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don, Russia

¹ zadorozhnyi91@mail.ru✉

² bogachev-va@yandex.ru

³ bogachev73@yandex.ru

⁴ kravec_as@mail.ru

Abstract. In recent years, there has been an active redirection of the bulk of cargo-and wagon flows originating in the economic space of Russia to the countries of the Asian and African continents. The specified transport and logistics «turn» is of a strategic nature and, apparently, will be long-lasting. There is no doubt that the ongoing changes help to increase the level of relevance of relevant transport and logistics research. The importance of approaches and methods, the development of which is based on new mathematically justified logistics ideas, is increasing. The previously proposed approaches do not lose their significance, subject to their development, modification and adaptation to the ongoing economic and geographical changes occurring in relation to the transportation process as a whole. At the same time, practically significant, first of all, are the results of research, which represent theoretically substantiated transport and logistics schemes of a general nature, the implementation of which makes it possible to activate the mechanism of market functioning (concerning this paper, this is, first of all, the market for operating wagons). Drawing attention to the multimodality of the vast majority of economically significant freight transportation, we note that due to the very design of the modern transportation process, the objects that are especially in demand in conducting the above researches are port-side transport and technological systems.

The purpose of this research is to develop a mathematically sound and practical approach to transport and logistics modeling of the process of regulating wagon flows at a railway loop. The theoretical basis is a modification of the economic-geographical delimitation method of the «influence areas» of transportation process subjects developed by the authors previously. The main component of the new model is the coefficient of road non-straightness, introduced for the considered railway stations for the departure of wagons. The specified coefficient makes it possible to take into account the specific location of the transport network in relation to possible destination stations.

The result of the research is a geometric routing model of the territorial oligopolistic market for services for the transportation of empty wagons, formed by the departure stations under consideration. The model is implemented in the environment of the computer mathematics system Maxima (Free Ware).

Keywords: empty wagonflows, port transport-technological system, road non-straightness coefficient, geometric routing model, departure station influence area, duopoly, oligopoly

For citation: Zadorozhnyi V. M., Bogachev V. A., Bogachev T. V., Kravets A. S. Geometric routing model in finding rational distributions of empty wagonflows in port transport-technological system. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):63–70. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_63.

Введение

При активном экономико-географическом переориентировании вагонопотоков и не сокращающихся при этом объемах грузоперевозок возрастает степень актуальности проблемы управления порожними вагонопотоками. Их рациональное распределение является существенной составляющей эффективной работы всего железнодорожного транспорта (тем более в мультимодальных перевозках). Дадим краткий анализ исследований, выполненных в последнее время в указанной области транспортной логистики, выделив работы [1–8].

В [1, 2] рассматриваются математические модели, позволяющие находить распределение порожних вагонопотоков, при котором снижается трудоемкость и уменьшается общее время

пребывания вагонов в системе. Основное внимание уделяется ограничениям в оптимизационных задачах, рассматриваемых для железнодорожных узлов. В [3] изучается проблема нахождения оптимального распределения порожних вагонов в железнодорожных узлах на основе модели с ограничениями, в которых отражены требования владельцев вагонов, уровень операционной работы железнодорожных станций, графики движения поездов и их формирование. Целью моделирования является минимизация сложности оперативного планирования для диспетчеров и сокращение общего времени обработки вагонов в железнодорожных узлах.

Предложенная в [4] математическая модель имеет теоретико-вероятностное содержание, позволяющее учитывать имеющую на

практике место априорную неопределенность в распределении порожних вагонов. Для решения рассматриваемой задачи случайные ограничения в модели преобразуются в соответствующие детерминированные эквиваленты, что представляет собой новый подход в указанной области исследований. В [5] предлагается модель линейного программирования для нахождения оптимальных распределений порожних вагонов в железнодорожных узлах с использованием при этом алгоритма нахождения минимальных затрат и максимального потока.

В [6] предложены нечеткая модель распределения порожних вагонов и двухэтапный генетический алгоритм для минимизации пробега порожних вагонов. В [7] рассматривается подход к регулированию парка порожних вагонов операторской компании, основанный на идее сбалансированности ресурсных потоков. Разработана математическая модель, позволяющая осуществлять оптимальное регулирование парка порожних вагонов по критерию минимума ресурсных затрат.

Подводя итог выполненному обзору, можно сделать вывод о том, что обращение к математическим моделям (весьма различным в указанных источниках) позволяет находить решения соответствующих оптимизационных задач в отношении распределений порожних вагонопотоков. Не теряет актуальности задача нахождения рациональных распределений вагонопотоков в железнодорожных узлах и припортовых транспортно-технологических системах. Отметим, что в условиях активной реконфигурации

транспортно-логистических потоков возрастает практическая значимость результатов исследований, представляющих собой новые транспортно-логистические схемы, которые обоснованы в математическом отношении и при реализации создадут возможности для повышения эффективности функционирования рынка оперирования вагонопотоками.

Материалы и методы исследования

Отметим, что на протяжении последних лет происходили разного рода колебания на рынке операторов нетягового подвижного состава, хотя в основной своей части игроки оставались прежними. Более всего изменения проявлялись в перераспределении парка вагонов между конкурирующими компаниями, происходящем по причине высокой стоимости новых вагонов и сложности всего организационно-технологического комплекса перевозок, сопровождаемой соответствующей тарифной политикой операторских компаний (рис. 1).

Перейдем к построению *геометрической маршрутизационной модели (ГММ)* олигополистического рынка услуг по транспортировке порожних вагонов на рассматриваемой части железнодорожного полигона. Как и при построении *геометрической евклидовой модели*, обратимся к экономико-географическому методу разграничения областей влияния субъектов перевозочного процесса (см., например, статьи [9, 10]). Основное отличие между указанными моделями состоит в том, что при построении ГММ между станциями отправления и назначения рассматривается не евклидово, а железнодорож-

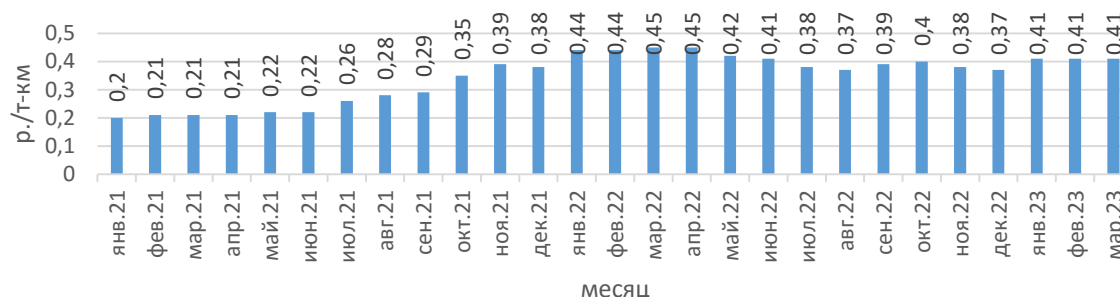


Рис. 1. Динамика изменения ставки предоставления полувагона в 2021–2023 гг., р./т-км*

* Источник – анализ рабочей группы Совета по железнодорожному транспорту государств – участников СНГ.

ное (тарифное) расстояние. Для каждой входящей в модель станции отправления вводится *коэффициент дорожной непрямолинейности*, посредством которого учитывается специфичность расположения дорожной сети по отношению к этой станции. (Считаем уместным заметить, что понятие коэффициента дорожной непрямолинейности не менее актуально для других наземных видов транспорта.) Данный коэффициент, вычисленный для каждой из станций отправления вагонов, дает возможность построить ГММ соответствующего территориального рынка, образуемого совокупностью указанных станций.

Для большей наглядности начнем с рассмотрения дуополистической ситуации. Пусть l_e и l_m – евклидовы и железнодорожные (тарифные) расстояния от рассматриваемого дуополиста (в настоящей статье – станция отправления порожних вагонов, т. е. припортовая станция выгрузки) до станций назначения (исходных станций погрузки) соответственно. Отношение l_m/l_e представляет собой случайную величину ξ , которая, будем полагать, имеет равномерный закон распределения. Для каждого дуополиста определим *коэффициент дорожной непрямолинейности* k как математическое ожидание случайной величины ξ , т. е. (в данном случае) как среднее арифметическое ее значений, вычисленных по отношению ко всем станциям назначения.

Предполагается, что на плоской географической карте рассматриваемой территории введена декартова система координат. Эта система имеет условный характер и необходима для того, чтобы выполнить соответствующие построения в среде системы компьютерной математики, применяя при этом метод аналитической геометрии. Пусть L – расстояние между 1-м и 2-м дуополистами, относительно которых будем предполагать, что они находятся в точках $O(0, 0)$ и $B(L, 0)$. Пусть k_i – коэффициент дорожной непрямолинейности для i -го дуополиста; p_i и q_i – стоимости начально-конечных и движенческих операций (на 1 км пути), затрачиваемых на один вагон ($i = 1, 2$). Положение на плоскости кривой, разграничивающей области влияния дуополистов, и ее геометрическая специфика определяются ра-

венством стоимостей транспортировки вагонов от местонахождений дуополистов (станций отправления) до станций назначения. Таким образом, согласно сделанным предположениям, уравнение указанной кривой имеет вид

$$p_1 + q_1 k_1 \sqrt{x^2 + y^2} = p_2 + q_2 k_2 \sqrt{(x-L)^2 + y^2}.$$

Отметив, что общие и достаточно подробные теоретические построения приведены в [2–4], обратим здесь внимание на два частных случая данного уравнения. Если $q_1 k_1 \neq q_2 k_2$, но $p_1 = p_2$, то уравнением на плоскости задается окружность (кривая 2-го порядка). Если же $q_1 k_1 \neq q_2 k_2$ и при этом $p_1 \neq p_2$, то уравнением (1) задается овал Декарта (кривая 4-го порядка).

Аналитические процедуры и графические построения выполнены в среде Maxima (Free Ware). На рис. 2, а и б приведены найденные указанной системой компьютерной математики овалы Декарта, разделяющие области влияния станций отправления, для дуополий Туапсе-Сортировочная – Новороссийск и Туапсе-Сортировочная – Кавказ.

Отметим, что построение ГММ олигополистического рынка услуг по транспортировке порожних вагонов на рассматриваемой части железнодорожного полигона основывается на соответствующих численных данных в отношении станций отправления и станций назначения (таблица).

В результате вычислений получаем, что коэффициенты дорожной непрямолинейности для станций отправления Туапсе-Сортировочная, Новороссийск, Вышестеблиевская и Кавказ равны $k_1 = 1,338$, $k_2 = 1,332$, $k_3 = 1,384$ и $k_4 = 1,495$.

Результаты исследования

На рис. 3 приведены овалы Декарта (найденные системой Maxima на основании приведенных в таблице стоимостей начально-конечных и движенческих операций, а также коэффициентов дорожной непрямолинейности), разделяющие области влияния четырех станций отправления для дуополистических ситуаций (дуополий). Линии, разграничивающие области влияния станций в дуополистических ситуациях, выделены разным цветом, толщиной и начертанием для улучшения визуального восприятия.

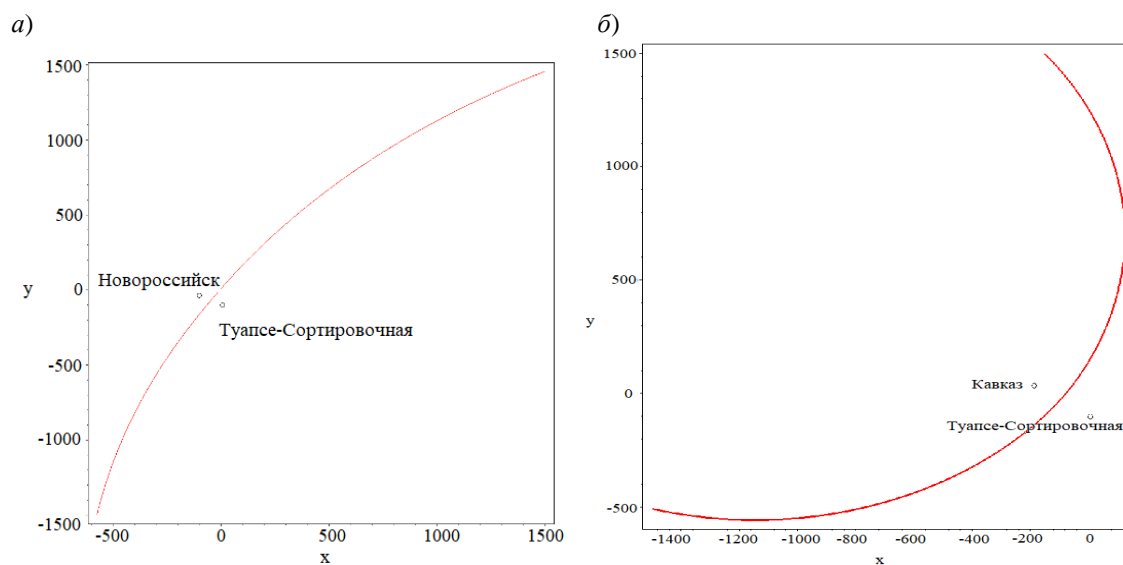


Рис. 2. Изображение территориальной конкуренции для дуополий:
 а – Туапсе-Сортировочная – Новороссийск; б – Туапсе-Сортировочная – Кавказ

Численные данные для станций отправления

Припортовая станция	p_i	q_i	k_i
Туапсе-Сортировочная	1 076,53	25,26	1,338
Новороссийск	1 122,61	24,93	1,332
Вышестеблиевская	1 255,50	24,87	1,384
Кавказ	1 321,57	24,71	1,495

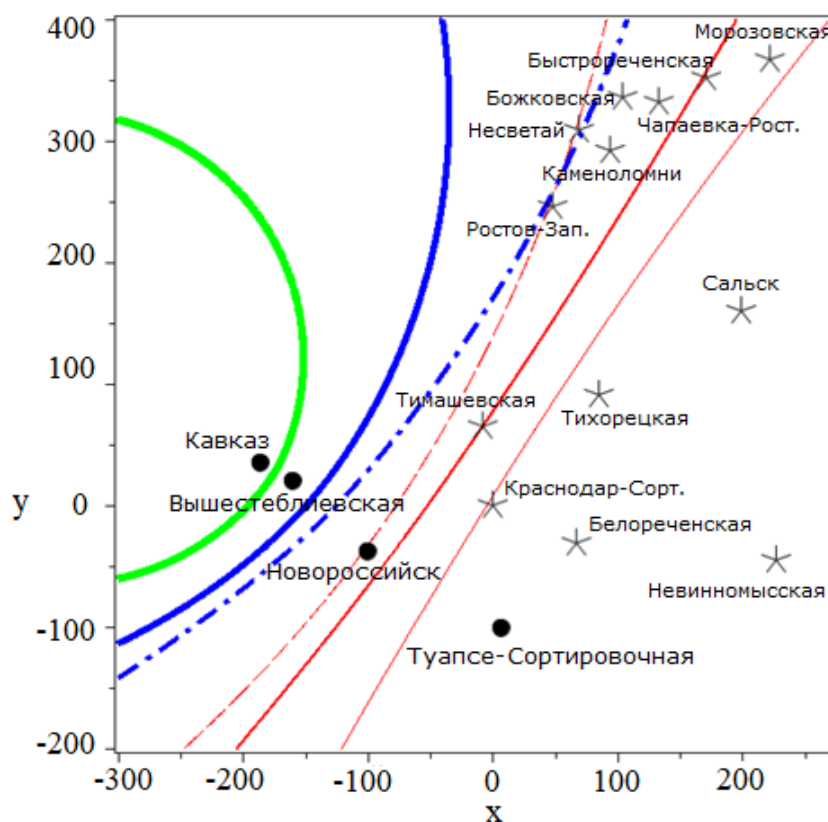


Рис. 3. Разделение части полигона на области влияния станций отправления
 в дуополистических ситуациях

Разбиение рассматриваемой части полигона на области влияния станций осуществляется шестью овалами. Например, овал, изображенный синим пунктиром, разделяет в дуополистической ситуации области влияния станций Новороссийск и Вышестеблиевская.

Отметим, что для каждой дуополии область влияния одной из станций отправления оказывается ограниченным множеством на плоскости. Это особенно наглядно для дуополии Вышестеблиевская – Кавказ в отношении станции Кавказ. В дуополии Туапсе-Сортировочная – Новороссийск ограниченность области влияния станции Туапсе-Сортировочная мало заметна, а с практической точки зрения несущественна по той причине, что стоимости движенических операций и коэффициенты дорожной непрямолинейности для этих двух станций отличаются весьма незначительно (см. таблицу).

На рис. 4 приведена полученная на основании ГММ территориальная картина олигополистического рынка услуг по транспортировке порожних вагонов, образуемого четырьмя станциями отправления на рассматри-

ваемой части полигона. При этом области влияния станций отправления Новороссийск, Вышестеблиевская и Кавказ выделены штриховкой различной степени плотности, а для области влияния станции отправления Туапсе-Сортировочная использован белый фон. Границами областей являются только три кривые из тех шести, которые фигурируют в дуополистических ситуациях (см. рис. 3 и пояснения к нему).

Мы видим, что основная часть рассматриваемых в статье станций назначения попадает в область влияния станции отправления Новороссийск. Отметим, что такое положение вещей проявляется весьма часто в исследованиях, посвященных рациональному распределению грузо- и вагонопотоков, и соответствует происходящему на практике (см., например, статьи [8–10]).

Выводы

Введенный в статью коэффициент путевой непрямолинейности позволяет существенным образом повысить целесообразность и практическую эффективность применения метода экономико-географического разграничения областей влияния станций отправления в транс-

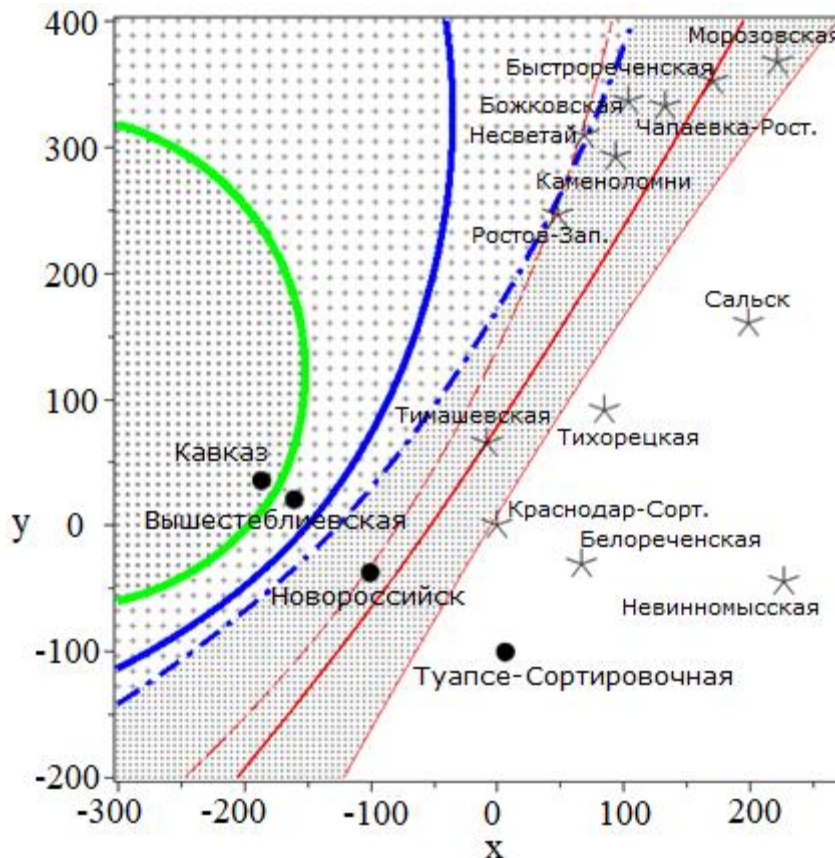


Рис. 4. Изображение областей влияния станций отправления в олигополистической ситуации

портно-логистических исследованиях. Разработанная на основе указанного коэффициента геометрическая маршрутизационная модель дает возможность находить области влияния железнодорожных станций, учитывая при этом специфику конфигурации транспортной сети. В результате получается математически обоснованная и корректная в практическом отношении картина территориального олигополистического рынка перевозок, образуемого на железнодорожном полигоне рассматриваемыми станциями отправления вагонов.

Предложенный подход является общим для наземных видов транспорта и с учетом соответствующей специфики может быть использован при нахождении рациональных схем грузоперевозок, осуществляемых автомобильным транспортом. Системы компьютерной математики представляют собой весьма эффективный и универсальный инструмент, посредством которого, наряду с традиционными функциями, реализуется эвристическая составляющая в транспортно-логистических исследованиях.

Список источников

1. Mathematical model of optimal empty rail car distribution at railway transport nodes / A. Rakhmangulov, A. Kolga, N. Osintsev [et al.] // *Transport Problems*. 2014. No. 9. P. 125.
2. An optimal management model for empty freight railcars in transport nodes / A. Rakhmangulov, N. Osintsev, D. Muravev, A. Legusov // *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*. 2019. Vol. 2, No. 1. P. 51–71.
3. Шенфельд К. П. Задача распределения порожних вагонов под погрузку в современных условиях // *Вестник ВНИИЖТ*. 2012. № 3. С. 3–7.
4. Cheng X., Tang R., Tang Z. Probability model and solution of railway empty car distribution // *International Conference of Logistics Engineering and Management (ICLEM)*. 2010. URL: <https://trid.trb.org/view/1271489> (дата обращения: 14.01.2023).
5. Guo Q., Li C., Chen D. The minimum-cost and maximum-flow algorithm for railway empty cars distribution // *Second International Conference on Transportation Engineering*. 2009. P. 2821–2826.
6. Liu L., Yang X. A model and an algorithm for empty car distribution in railway transportation // *International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. 2019. No. 1074. P. 123–131.
7. Сбалансированное регулирование парка порожних вагонов / Е. К. Аутов, В. В. Багинова, С. Б. Левин, А. Н. Рахмангулов // *Наука и техника транспорта*. 2014. № 3. С. 73–79.
8. Методы прогрессивного распределения порожних вагонопотоков в припортовой транспортно-технологической системе / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. М. Задорожный, Т. В. Богачев // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2015. № 4 (60). С. 92–103.
9. Развитие методов распределения зерновых грузопотоков в припортовой транспортно-технологической системе / О. Н. Числов, В. А. Богачев, А. С. Кравец [и др.] // *Транспорт: наука, техника, управление*. 2019. № 5. С. 29.
10. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system / O. N. Chislov, V. M. Zadorozhnyi, V. A. Bogachev [et al.] // *Transport Problems*. 2021. Vol. 16, No. 2. P. 153–165.

References

1. Rakhmangulov A., Kolga A., Osintsev N. [et al.]. Mathematical model of optimal empty rail car distribution at railway transport nodes. *Transport Problems*. 2014;(9):125.
2. Rakhmangulov A., Osintsev N., Muravev D., Legusov A. An optimal management model for empty freight railcars in transport nodes. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*. 2019;2(1):51–71.
3. Shenfeld K. P. The problem of distributing empty cars for loading in modern conditions. *Russian Railway Science Journal*. 2012;(3):3–7. (In Russ.).
4. Cheng X., Tang R., Tang Z. Probability model and solution of railway empty car distribution. *International Conference of Logistics Engineering and Management (ICLEM)*. 2010. URL: <https://trid.trb.org/view/1271489>.
5. Guo Q., Li C., Chen D. The minimum-cost and maximum-flow algorithm for railway empty cars distribution. *Second International Conference on Transportation Engineering*. 2009. P. 2821–2826.
6. Liu L., Yang X. A model and an algorithm for empty car distribution in railway transportation. *International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. 2019;(1074):123–131.

7. Autov E. K., Baginova V. V., Levin S. B., Rakhmangulov A. N. Balanced regulation of the empty car fleet. *Science and Technology of Transport*. 2014;(3):73–79. (In Russ.).
8. Chislov O. N., Bogachev V. A., Zadorozhniy V. M., Bogachev T. V. Methods of progressive distribution of empty car flows in the port transport and technological system. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2015;(60):92–103. (In Russ.).
9. Chislov O. N., Bogachev V. A., Kravets A. S. [et al.]. Development of methods for distributing grain cargo flows in the port transport and technological system. *Transport: Science, Technology, Management*. 2019;(5):29. (In Russ.).
10. Chislov O. N., Zadorozhniy V. M., Bogachev V. A. [et al.]. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system. *Transport Problems*. 2021;16(2):153–165.

Информация об авторах

В. М. Задорожний – доцент кафедры «Станции и грузовая работа» Ростовского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

В. А. Богачев – доцент кафедры «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения, кандидат физико-математических наук.

Т. В. Богачев – доцент кафедры фундаментальной и прикладной математики Ростовского государственного экономического университета, кандидат физико-математических наук.

А. С. Кравец – доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Ростовского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

V. M. Zadorozhniy – Associate Professor of the Stations and Cargo Work Department, Rostov State Transport University, Candidate of Engineering.

V. A. Bogachev – Associate Professor of the Higher Mathematics Department, Rostov State Transport University, Candidate of Physical and Mathematical Sciences.

T. V. Bogachev – Associate Professor of the Fundamental and Applied Mathematics Department, Rostov State Economic University, Candidate of Physical and Mathematical Sciences.

A. S. Kravets – Associate Professor of the Operational Work Management Department, Rostov State Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 11.12.2023; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 09.04.2024.

The article was submitted 11.12.2023; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 09.04.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.225
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_71

Анализ существующих и предлагаемых способов размещения и крепления крупнотоннажных контейнеров в универсальных железнодорожных полувагонах

Максим Владимирович Корнеев^{1✉}, Павел Станиславович Бурдяк²

^{1,2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ korneevmv@sgups.stu.ru✉

² burdyakps@mail.ru

Аннотация. Перевозка контейнеров в полувагонах по терминальной технологии с востока на запад с перегрузкой на полигонах Западно-Сибирской, Свердловской и Южно-Уральской железных дорог в 2023 г. составила порядка 18–25 тыс. ДФЭ (TEU) в месяц. На сети железных дорог зародилась новая технология – железнодорожный траншипмент. Эта технология позволяет комбинировать перевозку контейнеров в полувагонах на одном участке следования и перевозку на фитинговых платформах на другом. Увеличение объемов отправки контейнеров со станций Дальнего Востока может достигнуть 25 поездов в сутки с контейнерами в полувагонах, что больше существующих объемов в четыре раза. Предлагаемая технология является решением для ликвидации дисбаланса поступления контейнерного потока в морские порты и разгрузки Восточного полигона. При этом в настоящее время следует констатировать факт, что технология не настроена до параметров, удовлетворяющих требованиям грузоотправителей, грузополучателей и других участников рынка такой перевозки. Одним из направлений совершенствования технологии является разработка новых или улучшение существующих устройств для крепления контейнеров в полувагонах. Принятые на сети железных дорог решения требуют дополнительных затрат времени на выполнение операций для размещения контейнеров и реквизита крепления в полувагоне. Проведенная в настоящее время работа по поиску решений не привела к появлению устройств крепления, удовлетворяющих большинству требований участников перевозок. В статье обобщен опыт принятых в ОАО «РЖД» методик крепления контейнеров в полувагонах, основанных на использовании древесины или пневмооболочек, выполнены расчеты продольных и поперечных сил, действующих на крепление, даны рекомендации к вновь разрабатываемым устройствам.

Ключевые слова: полувагон, универсальный крупнотоннажный контейнер, крепление грузов, терминальная технология, перевозка контейнеров

Для цитирования: Корнеев М. В., Бурдяк П. С. Анализ существующих и предлагаемых способов размещения и крепления крупнотоннажных контейнеров в универсальных железнодорожных полувагонах // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 71–79. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_71.

TRANSPORT

Original article

Analysis of existing and proposed methods of arrangement and fastening of large-tonnage containers in universal railway gondola cars

Maksim V. Korneev^{1✉}, Pavel S. Burdyak²

^{1,2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ korneevmv@sgups.stu.ru✉

² burdyakps@mail.ru

Abstract. The transportation of containers in gondola cars using terminal technology from East to West with overloading at the training grounds of the West Siberian, Sverdlovsk and South Ural railways in 2023 amounted to about 18–25 thousand TEU per month. A new technology was born on the railway network – the railway transshipment. This technology allows you to combine the transportation of containers in open wagons in one section of the route and transportation on fitting platforms on another. An increase in the volume of sending containers from stations in the Far East can reach 25 trains per day with containers in gondola cars, which is four times more than the existing volumes. The proposed technology is a solution for eliminating the imbalance in

container flow to seaports and unloading the Eastern landfill. At the same time, it should be stated at present that the technology is not configured to the parameters of shippers, consignees and other market participants in such transportation that meet the requirements. One of the areas of technology improvement is the development of new or improvement of existing devices for fastening containers in open wagons. Decisions made on the railway network require additional time for operations to place containers and fastening props in the gondola car. The work done to find solutions at present has not led to the emergence of fastening devices that satisfy most of the requirements of transportation participants. The article summarizes the experience of the methods adopted by Russian Railways for fastening containers in open wagons based on the use of wood or pneumatic shells, calculates the longitudinal and transverse forces acting on the fastening, and gives recommendations for newly developed devices.

Keywords: gondola car, container, 40-foot containers, securing of cargo, terminal technology, transport of containers

For citation: Korneev M. V., Burdyak P. S. Analysis of existing and proposed methods of arrangement and fastening of large-tonnage containers in universal railway gondola cars. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):71–79. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_71.

Возросший объем импорта с Дальнего Востока вызвал увеличение загрузки портов и железнодорожной инфраструктуры на подходе к ним. Работа по настройке портовой и железнодорожной инфраструктуры в условиях увеличения объемов перевозок сформировала важную задачу для транспорта – организацию вывоза дополнительного объема поступающих с моря контейнеров. Проблема вывоза контейнеров усугублена предельной загрузкой транспортной магистрали Восточного полигона.

Перевозка крупнотоннажных контейнеров в универсальных железнодорожных полувагонах стала эффективным решением для транспортной сети [1] при ряде сложностей для грузоотправителей, грузополучателей, стивидорных компаний и прочих, которые связаны с дополнительными затратами времени на выполнение операций по размещению и креплению грузов.

В настоящее время основной объем погрузки контейнеров в полувагоны обеспечивается за счет использования деревянных элементов крепления: упорных брусков, скоб и распорной рамы (рис. 1) [2]. Обследования мест массовой погрузки контейнеров в полувагоны на станциях Дальнего Востока, проведенные авторами, показали, что время погрузки одного полувагона для рассматриваемой технологии достигает 25 мин. Погрузку осуществляет комплексная бригада, в которую входят водитель грузового механизма, грузчики, мастер погрузки. Комплексная бригада для крепления контейнера в полувагоне в среднем расходует до 0,2–0,3 м³ древесины. Также комплект инвентаря для крепления включает в себя 12 резиновых подкладок для защиты поперечных балок полувагона.

Менее распространен способ размещения и крепления контейнеров в полувагонах с использованием пневмооболочек (рис. 2) [2] ввиду:

- необходимости использования компрессорного оборудования на месте погрузки, а при нарушении целостности пневмооболочек и в пути следования;
- продолжительного времени выполнения операций по размещению и креплению контейнера (около 60 мин на вагон);
- хищения и порыва пневмооболочек в пути следования.

Рассматриваемые способы перевозки предназначены только для 40-футовых контейнеров. Для перевозки в одном полувагоне двух 20-футовых контейнеров [3] необходимо учесть следующие особенности размещения:

- обеспечение максимальной загрузки полувагона с учетом равномерного распределения нагрузки на тележки вагона;
- увеличение поперечных сдвигающих усилий вследствие смещения центра тяжести каждого контейнера в сторону шкворневых опор полувагона;
- изменение материала подкладок с резиновых на деревянные для дополнительного закрепления контейнеров от поперечного сдвига;
- дополнительное использование деревянных элементов крепления между контейнерами.

Для определения усилий, воспринимаемых креплением от вертикальных, поперечных (поперек вагона) инерционных сил и ветровых нагрузок при перевозке крупнотоннажных контейнеров в полувагонах, использована методика расчета, представленная в приложении 3 «Технические условия размещения и крепления грузов» к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении [4]. Эти силы и

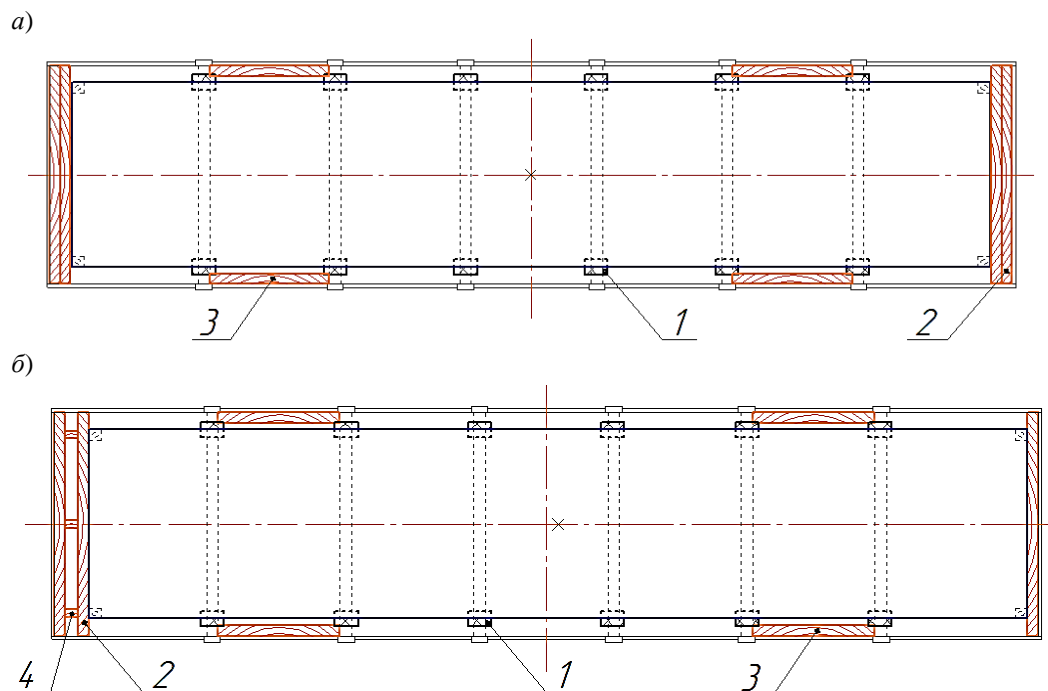


Рис. 1. Схема размещения 40-футового контейнера в полувагоне при использовании деревянных элементов крепления:

а – симметричное размещение контейнера в полувагоне с внутренней длиной кузова 12 324–12 790 мм;

б – размещение контейнера со сдвигом в полувагоне с внутренней длиной кузова более 12 790 мм;

1 – резиновая подкладка – 12 шт.; 2 – упорный брус сечением не менее 100 × 100 мм – 2–4 шт.;

3 – упорный брус сечением не менее 100 × 150 мм – 4 шт.; 4 – распорный брус сечением не менее 100 × 100 мм – 3 шт.

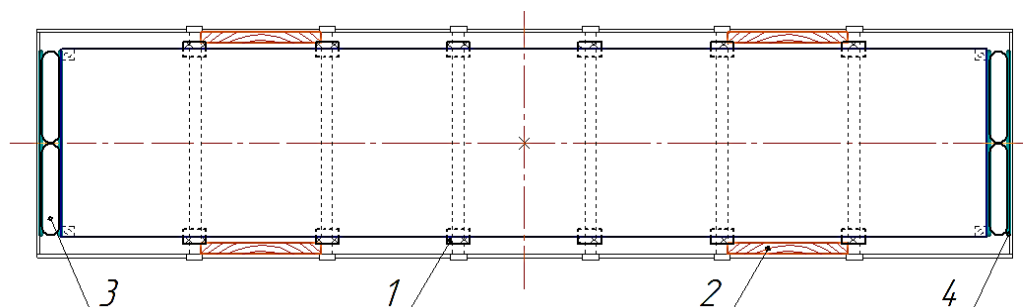


Рис. 2. Схема размещения 40-футового контейнера в полувагоне при использовании деревянных элементов крепления и пневмооболочек:

1 – резиновая подкладка – 12 шт.; 2 – упорный брус сечением не менее 100 × 150 мм – 4 шт.;

3 – пневмооболочка размером 120 × 240 см – 4 шт.; 4 – панель прокладочного материала размером не менее 1 200 × 2 000 мм – 4 шт.

нагрузки действуют (учитываются при расчетах) одновременно. Силы обусловлены колебаниями движущегося вагона: подпрыгиванием, продольной качкой (галопированием), боковым параллельным колебанием (от центробежной силы – поперечный относ), боковой качкой, вилянием [5]. Перечисленные силы в полной мере представлены при следовании полувагона по маршрутам Восточного полигона.

Для грузов с опорой на один вагон силы увеличиваются от центра к торцам вагона. Значения сил не менее чем в два раза ниже значений продольной инерционной силы и при ряде значений массы контейнера на вагоне и больших коэффициентах трения могут полностью гаситься силой трения (рис. 3).

По данным рис. 3 установлено, что применение листовой резины толщиной 10 мм и раз-

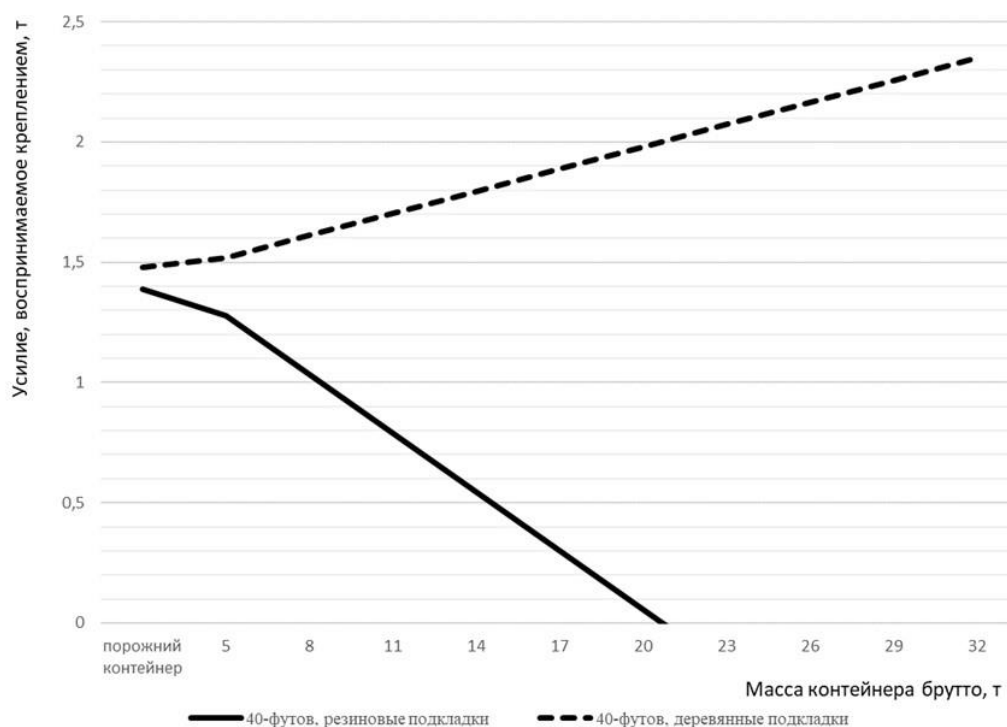


Рис. 3. Зависимость поперечного усилия, воспринимаемого креплением, от материала подкладок и массы 40-футового контейнера

мером 200×300 мм в качестве подкладок исключает поперечное смещение в вагоне контейнера массой свыше 20 т. Это подтверждается анализом выполненных перевозок, проведенным в местах перегрузки контейнеров из полувагонов на фитинговые платформы. В ходе обследования реквизита крепления на местах выгрузки и перегрузки контейнеров в пределах Западно-Сибирской железной дороги установлено, что элементы крепления (упорные бруски), уложенные у продольной стены вагона, не имели повреждений. С целью снижения затрат пиломатериалов авторы рекомендуют рассмотреть возможность укладки вместо двух упорных брусков вдоль вагона одного, что позволит сэкономить более $3,6 \text{ м}^3$ дерева с каждого поезда.

Усилия, воспринимаемые элементами крепления при размещении двух 20-футовых контейнеров, значительно выше (рис. 4) из-за смещения центра тяжести контейнера в сторону торца вагона.

Из-за большого количества кривых малого радиуса на Восточном полигоне [6, 7] удержанию 20-футовых контейнеров в полувагоне следует уделять особое внимание, так как сдвиг контейнера поперек вагона может при-

вести к смещению общего центра тяжести грузов относительно продольной оси симметрии вагона, изменить нагрузки, передаваемые на тележки вагона, и угрожать безопасности движения поездов.

Усилия, передаваемые от контейнера креплению в вагоне, определены для условий расположения крепежного инвентаря на полу вагона. Такое размещение креплений усложняет работу по помещению внутрь вагона древесины и скоб, необходимых для крепления контейнера, а также увеличивает время погрузки.

Для ускорения погрузки за счет исключения погружения в вагон работников и материалов из древесины рассмотрен вариант размещения упорных элементов на верхней обвязке полувагона (рис. 5).

Верхнее размещение элементов крепления связано с рядом ограничений. Одно из ограничений связано с различными значениями внутренних размеров кузовов полувагона. Число полувагонов, эксплуатируемых на сети ОАО «Российские железные дороги», в январе 2024 г. достигло 623 645 ед. [8], из них порядка 28 % инновационные, более 56 % (92 000 ед.) эксплуатируются на Восточном полигоне (рис. 6).

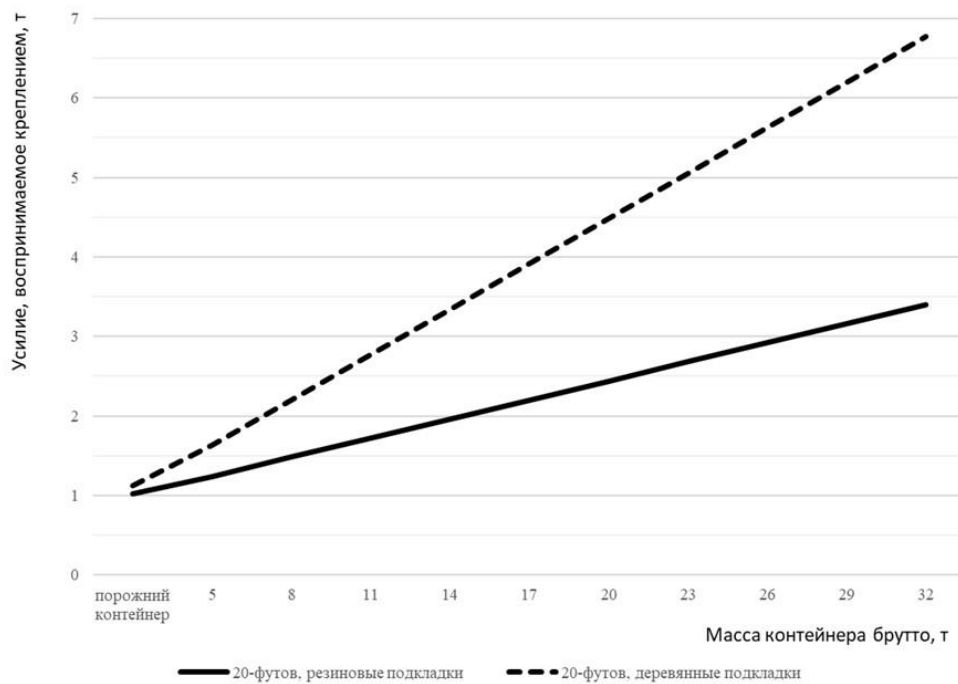


Рис. 4. Зависимость поперечного усилия, воспринимаемого креплением, от материала подкладок и массы 20-футовых контейнеров



Рис. 5. Пример возможного размещения навесного упорного элемента крепления на верхней обвязке полувагона

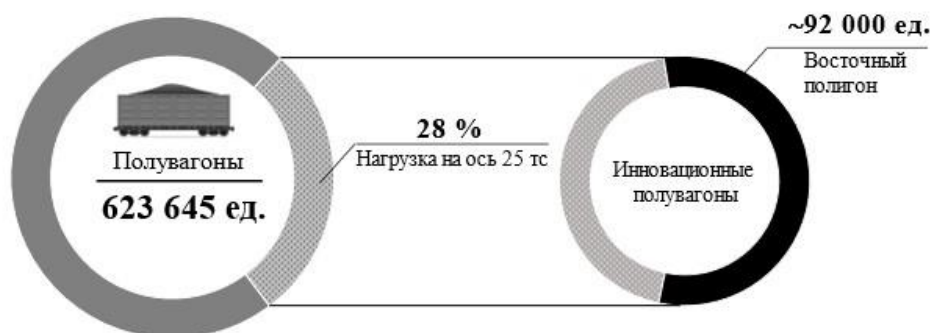


Рис. 6. Парк универсальных железнодорожных полувагонов

Оставшиеся 76 000 ед. преимущественно представлены моделью 12-132 всех модификаций, а значит, большинство вагонов имеют кузов с внутренней длиной 12 700–13 050 мм и с внутренней шириной 2 911–3 014 мм. В ходе осмотра и анализа верхней обвязки полувагонов, изготовленной из металлического профиля квадратного или прямоугольного сечения, установлено, что зачастую она имеет деформированные края, ввиду этого внутренний размер по ширине имеет нестабильные значения.

Различные значения длины кузовов полувагонов не позволяют использовать стандартные размеры креплений. При использовании стандартизированных креплений разместить упоры вплотную к контейнеру не представляется возможным для значительной доли вагонов. Как следствие, для этой доли вагонов возможны продольные и поперечные сдвиги контейнера в пути следования.

Наличие возможности сдвига контейнера и крепления требует установления величины продольного смещения и сравнения его с допустимыми значениями [4]. При этом следует отметить, что наличие смещения усложняет использование упоров для перевозки в одном полувагоне двух 20-футовых контейнеров из-за сложности подбора масс для совместной перевозки.

Максимальная внутренняя длина кузова полувагона в верхней части составляет 13 050 мм (инновационный полувагон модели 12-2142), это означает, что при стандартной длине 40-футового контейнера 12 192 мм расстояние для сдвига, без учета габаритов упора, составит 429 мм. Расстояние продольного смещения центра тяжести груза менее допускаемого значения, установленного для массы груза 32 т [4], – 1 190 мм. Значит, продольный сдвиг контейнера внутри кузова полувагона при погрузке и в пути следования допустим.

Допускаемое поперечное смещение общего центра тяжести груза в 4-осном полувагоне для контейнера массой 32 т составляет менее 340 мм, что значительно больше возможного сдвига – 288 мм (при стандартной ширине контейнера 2 438 мм).

Нормативные документы [4] допускают одновременное смещение груза относительно продольной и поперечной плоскостей симметрии полувагона в пределах указанных значений, значит, при перевозке 40-футового контейнера мас-

сой брутто до 32 т элементы крепления необходимы для исключения непосредственного контакта элементов кузова и контейнера, придания этому взаимодействию упругости.

Важным условием для установки упоров в верхнем уровне является удерживающая способность элементов кузова полувагона. Наибольшие воздействия возникают в результате троганий, торможений, осаживаний, рывков при увеличении скорости движения поезда и толчков при уменьшении его скорости – продольные воздействия. На сортировочных станциях значительные продольные воздействия вагоны испытывают не только во время соударений при роспуске с горок, но и при формировании поездов, особенно при перестановке составов из подгорочных парков в парки отправления и маневровой работы толчками [9].

На рис. 7 представлены результаты расчета усилия, воспринимаемого торцевой стеной (с упором на уровне верхней обвязки) при разных массах контейнера и при разных коэффициентах трения на опорной поверхности. Расчет произведен для «жесткого» крепления, т. е. без использования деревянных брусков.

Допустимое сосредоточенное усилие на каждую угловую стойку на уровне верхней обвязки составляет 4,6 т [4], что исключает использование такого крепления, как и других, с упором только в верхнюю часть торцевой стены железнодорожного полувагона, так как это угрожает сохранности кузова вагона.

ОАО «РЖД», с целью снижения затрат времени и ресурсов на местах погрузки и перегрузки универсальных контейнеров, в декабре 2022 г. объявило открытый запрос по привлечению инновационных решений и технологий, предназначенных для размещения и крепления 20- и 40-футовых крупнотоннажных контейнеров в универсальных железнодорожных полувагонах [10, 11]. Открытый запрос собрал ряд идей, презентованных перед компанией, в том числе и в рамках конкурса молодежных проектов компании «Новое звено».

Ряд предложений был направлен на появление многооборотных креплений – замену упругих деревянных элементов крепления на крепления из композитных материалов, состоящих из вторичного пропилен, наполненного вторичным стекловолокном, или размещение

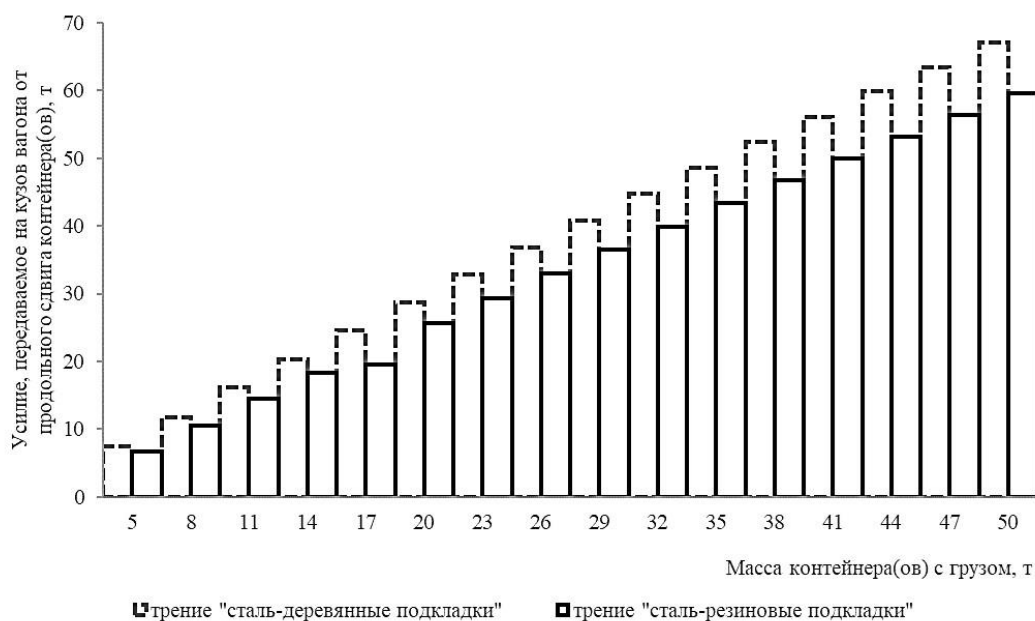


Рис. 7. Значения продольного усилия, передаваемого на кузов вагона, в зависимости от массы контейнера с упором в элементы конструкции вагона

на контейнере жесткого крепления – металлической раздвижной рамы.

Использование многооборотного крепления значительно увеличивает стоимость терминальной технологии перевозки контейнеров (выше начальная стоимость элементов крепления и дополнительные расходы на возврат к местам погрузки) и имеет ряд других ограничений.

Также для заполнения пространства между контейнером и полувагоном рядом авторов предложено применение емкостей с воздухом небольшого объема, или использованных автомобильных покрышек (рис. 8), или даже мешков с песком. Объем заполнения, трудности размещения таких заполнителей свободного пространства внутри вагона не представляют серьезного практического значения.

Патенты, опубликованные по теме данного исследования [12, 13], включают описания устройств, которые закрепляются болтовыми соединениями на элементах кузова полувагона. Предлагаемые устройства сложны в изготовлении, достаточно дороги, требуют много времени и специальный инструмент для установки.

Проволочные растяжки и обвязки, стяжные крепежные элементы, которые широко используются на транспорте для удержания грузов на открытом подвижном составе, не рассматривались ввиду неудобства крепления их за увязочные устройства полувагона и фитинг контейнера.

На основе выполненного анализа средств крепления контейнеров в полувагоне сделаны выводы о направлении поиска возможных вариантов крепления, а именно требования к ним:

- предлагаемое крепление должно быть упругим для равномерного распределения воспринимаемых нагрузок и обеспечения сохранности подвижного состава;

- материал подкладок под контейнер должен обладать хорошими фрикционными свойствами;

- элементы крепления должны быть разовыми, легко утилизироваться и быть экологичными;

- время, затрачиваемое на установку крепления, должно обеспечивать максимальную перерабатывающую способность мест погрузки на железнодорожных станциях Дальнего Востока;

- стоимость комплекта крепления на один вагон не должна превышать существующего уровня затрат и расходов;

- использование пружин, магнитов, баллонов, емкостей с песком и прочего не следует рассматривать ввиду сложности установки, очистки и обслуживания;

- позиционирование устройства следует рассматривать первоочередно внизу вагона, где обеспечивается лучшая геометрия и условия восприятия нагрузок.

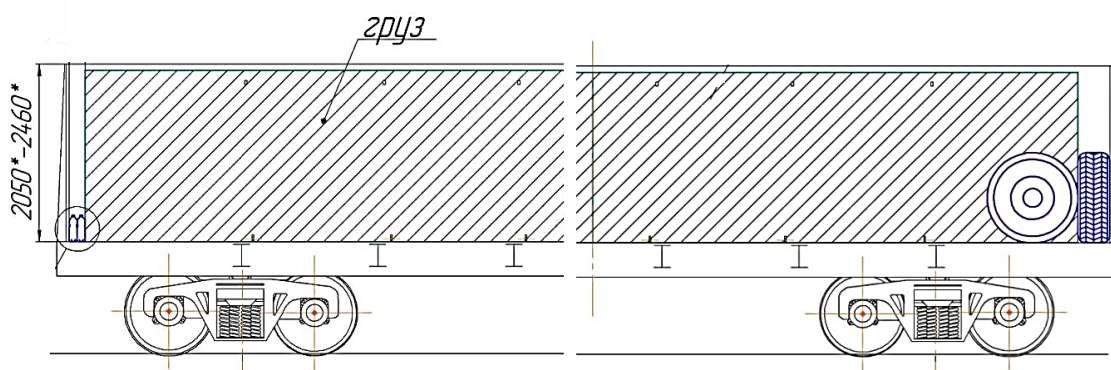


Рис. 8. Использование пластиковых бутылок и отработанных шин для крепления контейнера в полувагоне

Приведенный выше перечень требований к креплению контейнеров в полувагонах учитывает в первую очередь интересы государства по вывозу контейнеров с Дальнего Востока. Для ОАО «РЖД» достигается эффект от снижения порожнего пробега полувагонов и необходимости подсыла порожних фитинговых платформ.

Отдельно следует отметить, что, несмотря на дополнительную работу на местах погрузки по закреплению контейнеров в полувагонах, намеченные направления и требования к средствам крепления позволят снизить время выполнения этих операций и повысить перерабатывающую способность путей необщего пользования.

Список источников

1. РЖД ищут новые способы погрузки контейнеров в полувагоны // Vgudok : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3ADakY> (дата обращения: 22.04.2024).
2. Местные технические условия размещения и крепления контейнеров типоразмеров 1А, 1АА, 1ААА в универсальных полувагонах // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3ADb7B> (дата обращения: 22.04.2024).
3. Местные технические условия размещения и крепления крупнотоннажных контейнеров в универсальных полувагонах // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3ADb7p> (дата обращения: 22.04.2024).
4. Соглашение о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) : с изменениями и дополнениями на 01.07.2023 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1901924> (дата обращения: 22.04.2024).
5. Егоров С. А. Пособие по разработке и расчету схем размещения и крепления грузов в вагонах. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2018. 230 с.
6. Дмитренко А. В., Корнеев М. В. Перспективы обеспечения безопасности пропуска поездов на железнодорожном транспорте в условиях неравномерности движения // Вклад транспорта в национальную экономическую безопасность : труды VII Международной научно-практической конференции. Москва, 2022. С. 66–68.
7. Трансшиб попал в петлю // Vgudok : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3ADaxF> (дата обращения: 22.04.2024).
8. Грузовые вагоны в РФ в январе // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3ADaxu> (дата обращения: 22.04.2024).
9. Бурдяк П. С. Сокращение времени расформирования составов одиночными изолированными толчками на вытяжных путях железнодорожных станций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2016. № 2 (37). С. 5–9.
10. Размещение и крепление универсальных крупнотоннажных контейнеров, соответствующих ГОСТ Р 53350-2009 (ИСО 668: 1995) «Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса», в универсальных четырехосных полувагонах // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://eoi.rzd.ru/Ex/Claim/View/373> (дата обращения: 22.04.2024).
11. Перевозка контейнеров в полувагонах станет вызовом для стартапов // Vgudok : [сайт]. URL: <https://clck.ru/3ADb4A> (дата обращения: 22.04.2024).

12. Патент № 2788217 Российская Федерация, МПК B61D 3/20, B60P 7/13, B61D 45/00 (2022.08). Устройство для перевозки контейнеров в полувагонах и способ монтажа в полувагоне и подготовки к эксплуатации устройства для перевозки контейнеров : № 2022122506 : заявл. 19.08.2022 : опубл. 17.01.2023 / Иншаков В. А., Баншиков А. В. ; патентообладатель ООО «СКЦ».

13. Патент № 203169 U1 Российская Федерация. Устройство для перевозки крупнотоннажных контейнеров в полувагонах и ином открытом подвижном составе : заявл. 21.08.2020 : опубл. 24.03.2021 / Квитко В. В.

References

1. Russian Railways are looking for new ways to load containers into gondola cars. *Vgudok: [site]*. (In Russ.). URL: <https://clck.ru/3ADakY>.

2. Local technical conditions for placement and fastening of containers of standard sizes 1A, 1AA, 1AAA in universal gondola cars. *Russian Railways: [site]*. (In Russ.). URL: <https://clck.ru/3ADb7B>.

3. Local technical conditions for placement and fastening of large-tonnage containers in universal gondola cars. *Russian Railways: [site]*. (In Russ.). URL: <https://eoi.rzd.ru/Claim/DownloadFile/84784256>.

4. Agreement on the International Goods Transport by Rail (SMGS). As amended and supplemented as of 01.07.2023. *Electronic Fund of Legal and Normative-technical Documents*. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1901924>.

5. Egorov S. A. A manual for the development and calculation of schemes for placing and securing cargo in cars. Moscow: Training and Methodological Center for Education in Railway Transport; 2018. 230 p. (In Russ.).

6. Dmitrenko A. V., Korneev M. V. Prospects for ensuring the safety of trains on railway transport in conditions of uneven traffic. *Contribution of Transport to National Economic Security. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference*. Moscow; 2022. P. 66–68. (In Russ.).

7. The Trans-Siberian Railway got into a loop. *Vgudok: [site]*. (In Russ.). URL: <https://clck.ru/3ADaxF>.

8. Freight wagons in the Russian Federation in January. *Russian Railways: [site]*. (In Russ.). URL: <https://clck.ru/3ADaxy>.

9. Burdyak P.S. Reducing the time of train disbanding by single isolated shocks on the exhaust tracks of railway stations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2016;(37):5–9. (In Russ.).

10. Placement and fastening of universal large-capacity containers in accordance with GOST R 53350-2009 (ISO 668:1995) “Freight containers of series 1. Classification, dimensions and weight”, in universal four-axle gondola cars. *Russian Railways: [site]*. (In Russ.). URL: <https://eoi.rzd.ru/Ex/Claim/View/373>.

11. Transporting containers in gondola cars will be a challenge for startups. *Vgudok: [site]*. (In Russ.). URL: <https://clck.ru/3ADb4A>.

12. Patent No. 2788217 Russian Federation, MPK B61D 3/20, B60P 7/13, B61D 45/00 (2022.08). Device for transporting containers in gondola cars and method of installation in a gondola car and preparation for operation of the device for transporting containers. No. 2022122506. Application 19.08.2022. Published 17.01.2023. Inshakov V. A., Bانشchikov A. V.; patentee ООО SKTS. (In Russ.).

13. Patent No. 203169 U1 Russian Federation. Device for transporting large-tonnage containers in gondola cars and other open rolling stock. Application 21.08.2020. Published 24.03.2021. Kvitko V. V. (In Russ.).

Информация об авторах

М. В. Корнеев – доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

П. С. Бурдяк – доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

M. V. Korneev – Associate Professor of the Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

P. S. Burdyak – Associate Professor of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 23.04.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 15.05.2024.

The article was submitted 23.04.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 15.05.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.222.6
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_80

Теоретико-игровой подход при выборе оптимальной системы интервального регулирования движения поездов на однопутных железнодорожных линиях

Николай Игоревич Осипов

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, N-I-Osipov@yandex.ru

Аннотация. В современных условиях, ввиду достижения значительного прогресса российскими учеными и специалистами в области уплотнения поездопотоков за счет внедрения передовых систем интервального регулирования движения поездов, вопрос выбора наиболее рациональной из них становится все актуальнее. Целью работы являлась апробация методики технико-экономической оценки эффективности различных систем интервального регулирования на однопутных полигонах. В рамках исследования применена теория игр в сочетании с имитационным моделированием при использовании процессного подхода для симуляции действий дежурного персонала, агентного подхода для выбора режима ведения поезда, системной динамики для тяговых расчетов. Апробация подхода проведена на основе Северного широтного хода, сформированы платежные матрицы для пяти систем. Определены границы эффективности основных систем интервального регулирования в зависимости от путевого развития отдельных пунктов однопутного полигона, типа графика движения поездов, характеристик поездопотока и прочих условий эксплуатационной работы. Для Северного широтного хода при проектных размерах движения оптимальным является использование автоблокировки с «фиксированными» блок-участками при частично-пакетном графике с двумя поездами в пакете, после проведения достаточного количества испытаний по работе в режиме автоблокировки при аналогичных условиях максимальную эффективность может продемонстрировать разработанная АО «НИИАС» система «Анаконда». Предложенный теоретико-игровой подход для выбора наиболее экономически эффективной системы управления движением на однопутном полигоне с учетом местных условий его работы может быть использован для рационализации распределения инвестиций компании ОАО «РЖД». Сформулированные в результате его применения выводы не противоречат основным положениям теории транспортных потоков и дополняют исследования, посвященные оценке эффективности интервального регулирования на однопутных полигонах.

Ключевые слова: интервальное регулирование движения поездов, однопутные железнодорожные линии, имитационное моделирование, теория игр, экономическая эффективность

Для цитирования: Осипов Н. И. Теоретико-игровой подход при выборе оптимальной системы интервального регулирования движения поездов на однопутных железнодорожных линиях // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 80–88. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_80.

TRANSPORT

Original article

Game-theoretic approach to selecting the optimal system of train traffic interval regulation on single-track railway lines

Nikolay I. Osipov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, N-I-Osipov@yandex.ru

Abstract. In modern conditions, due to the significant progress made by Russian scientists and specialists in the field of train flow compaction through the introduction of advanced systems of interval train control, the issue of selecting the most rational of them is becoming more and more relevant. The aim of the work was to approve the methodology of technical and economic evaluation of the efficiency of various systems of interval regulation on single-track polygons. Within the framework of the research the game theory in combination with simulation modelling with the use of process approach for simulation of on-duty personnel actions, agent-based approach for train operation mode selection, system dynamics for traction calculations were applied. The approach was tested on the basis of the Northern Latitudinal Railway, and payoff matrices for five systems were formed. The efficiency

limits of the main interval control systems were determined depending on the track development of operation points of a single-track polygon, type of train timetable, train flow characteristics and other operating conditions. For the Northern Latitudinal Railway at the designed traffic sizes the optimal is the use of autoblocking with «fixed» blocks at partial-platoon timetable with two trains in a platoon, after carrying out a sufficient number of tests on operation in the autoblocking mode under similar conditions the maximum efficiency can be demonstrated by the system *Anaconda* developed by AO NIIAS. The proposed game-theoretic approach to select the most economically efficient traffic control system on a single-track polygon taking into account the local conditions of its operation can be used to rationalize the distribution of Russian Railways investments. The conclusions formulated as a result of its application do not contradict the basic provisions of the theory of traffic flows and complement the studies devoted to the interval regulation efficiency evaluation on single-track polygons.

Keywords: interval train control, single-track railway lines, simulation modelling, game theory, economic efficiency

For citation: Osipov N. I. Game-theoretic approach to selecting the optimal system of train traffic interval regulation on single-track railway lines. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):80–88. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_80.

Введение

Разворот грузопотоков на Восток за последние несколько лет обусловил работу железнодорожного транспорта в условиях дефицита пропускных и провозных способностей (что создает запрос на развитие сети железных дорог с целью наиболее полного обеспечения потребностей экономики РФ [1, с. 25]), в связи с чем работы по внедрению передовых систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП) становятся все более актуальными [2, с. 35].

Установлено, что СИРДП оказывают наиболее выраженное положительное воздействие на пропускную способность двухпутного полигона [3, с. 343], тогда как на однопутных направлениях их внедрение целесообразно лишь в сочетании с изменением типа графика движения (от непакетного к частично-пакетному или пакетному) и инфраструктуры участков (количества и длины приемо-отправочных путей разъездов для скрещения пакетов поездов) [4, с. 22]. Данное обстоятельство определяет специфику выбора СИРДП для однопутных линий и лежит в основе проводимых исследований по данному вопросу.

Вместе с тем надлежит отметить, что большая часть проведенных исследований затрагивает сравнение традиционной автоблокировки с «фиксированными» блок-участками с полуавтоблокировкой, хотя на современном этапе имеет место более широкий спектр систем, применение которых возможно на однопутных линиях (рис. 1), но методика оценки их эффективности в отечественных теории и практике проработана недостаточно [5, с. 112]. Например, в детальном рассмотрении нуждаются системы, предполага-

ющие отказ от рельсовых цепей в пользу оптоволоконных линий как датчика свободности (занятости) пути, которые одной частью специалистов и ученых железнодорожного транспорта воспринимаются как закономерная эволюция систем управления движением [6, с. 40], а другой частью – как решение, после многолетних испытаний способное сократить (но не исключить) наличие напольной аппаратуры [7, с. 31].

Существенную помощь при выборе оптимального варианта режима работы железнодорожного транспорта могут оказать экономико-математические методы, а именно использование ставшей к настоящему времени широко распространенной теории игр – теории математических моделей принятия решений в условиях конфликта [8, с. 242]. Так, в работе [9] теория игр задействована для поиска рациональных управленческих решений в системе поездного диспетчерского управления и в форме корпоративных игр (при конфликтах персонала центра управления перевозками по разрешению сложной поездной ситуации), а также в форме игр с природой, при которых природа, проявляя различную степень агрессивности, пытается противодействовать усилиям поездного диспетчера по предотвращению неплановых остановок.

Теория игр успешно применяется и при совершенствовании эксплуатации систем автоматики и телемеханики с учетом их отказов для эффективного распределения ограниченных финансовых ресурсов. В работе [10] выполнена постановка оптимизационной задачи, а также предложен алгоритм выбора и принятия ориентированного на минимизацию поездно-часов потерь решения на основе теоретико-игрового подхода.

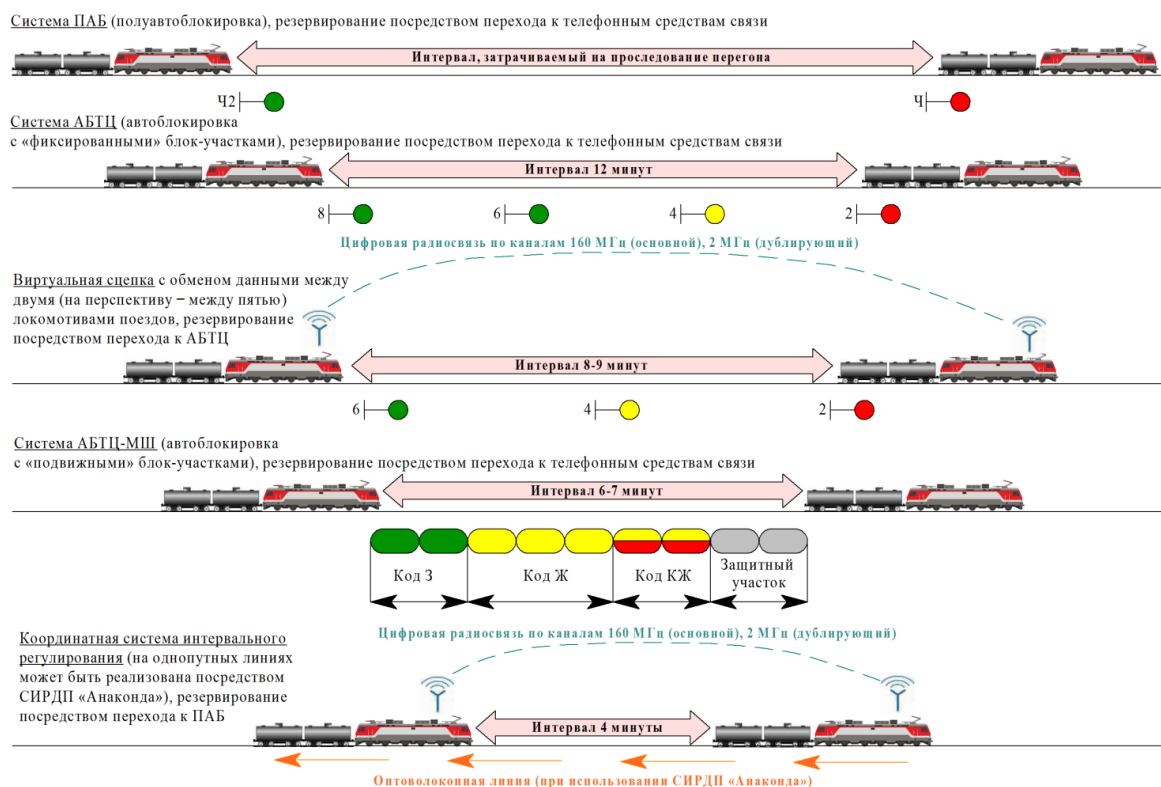


Рис. 1. Возможные варианты СИРДП на однопутных линиях

Целью данного исследования является оценка эффективности применения СИРДП на однопутной линии на основе игр с природой, в роли которой выступает не заинтересованный в исходе игры игрок «Перевозочный процесс», фактически выполняющий функцию генератора случайных чисел (например, количества поездов, интервалов между моментами их поступления на полигон, количества сбоев СИРДП и прочих факторов поездной обстановки), а игрок «Компания» выступает в качестве лица, стратегия которого формирует управленческие решения по совершенствованию и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры полигона. Для достижения данной цели требуется решить перечень задач:

- разработать цифровой двойник однопутного полигона и провести прогоны его функционирования при различных сочетаниях режимов эксплуатации и вариантов поездной обстановки;

- с помощью анализа количественных и качественных показателей эксплуатационной работы данного полигона произвести экономическую оценку применения различных вариантов СИРДП;

- на основе критериев игр с природой выбрать оптимальный вариант для данного полигона с формированием зависимостей, характерных для однопутных полигонов в целом.

Материалы и методы

В рамках исследования была разработана имитационная модель проектируемой части полигона Северного широтного хода (СШХ) протяженностью 375 км (рис. 2). СШХ на современном этапе является примечательным примером железнодорожного направления, проблемы с поиском инвестиций в которое (возникшие в том числе и по причине первоочередной потребности развития БАМа) могут сдвинуть его реализацию на 2027 г. Детальное описание всех возможных инвестиционных стратегий может повысить интерес инвесторов, ускорить возведение полигона, способного разгрузить транспортные маршруты в направлении портов Северо-Запада за счет переключения на себя значительной части грузопотока и обеспечить освоение нефтегазовых месторождений Тюменской области и Западной Сибири [11, с. 15].

Основополагающей особенностью перевозочного процесса на СШХ станут сложней-



Рис. 2. Схема рассматриваемой части СШХ

шие условия его предстоящей эксплуатации, выраженные в необходимости внедрения малолюдных технологий (диспетчерской централизации, телеуправления стрелками и сигналами с соседних станций), совмещения профессий, ограничения скорости движения поездов (как и на всех полигонах, расположенных в близких к СШХ климатических условиях [12, с. 27]). Доход от эксплуатации СШХ определяется в первую очередь доходом от перевозки высоко rentабельных нефтяных грузов (в работе принимается плановый грузооборот в груженом направлении 8 662,5 млн т-км нетто [13, с. 41]). Эксплуатационные расходы СШХ определяются методом расходных ставок.

Цифровой двойник СШХ разработан в среде AnyLogic с применением дискретно-событийного подхода для задания логики следования поездов по участку, агентного подхода для симуляции режимов ведения поезда и системной динамики для выполнения тяговых расчетов.

Принципы функционирования основных модулей модели изложены в работе [4]; моделирование проводилось с имитацией работы полуавтоблокировки (ПАБ), автоблокировки с «фиксированными» блок-участками (АБТЦ), виртуальной сцепки (ВСЦ) двух и трех поездов, СИРДП на основе виброакустического зондирования полотна «Анаконда» (в режиме нескольких поездов на одном перегоне), автоблокировки с «подвижными» блок-участками (АБТЦ-МШ).

Ключевое значение для использования теории игр с целью оценки эффективности интервального регулирования на основе анализа платежной матрицы (табл. 1) имеет наиболее полное описание состояний природы через параметры, варьирование которых определяет степень ее агрессивности по отношению к потоку поездов (при этом вероятность наступления того или иного состояния в рамках данного исследования считается неизвестной). Стратегии игрока «Компания» сводятся в основном к изме-

Таблица 1

Платежная матрица при различных режимах работы однопутных линий

Стратегия игрока «Компания»	Состояние природы «Перевозочный процесс»				
	s_1	s_2	s_3	...	s_n
a_1	$v(a_1, s_1)$	$v(a_1, s_2)$	$v(a_1, s_3)$...	$v(a_1, s_n)$
a_2	$v(a_2, s_1)$	$v(a_2, s_2)$	$v(a_2, s_3)$...	$v(a_2, s_n)$
a_3	$v(a_3, s_1)$	$v(a_3, s_2)$	$v(a_3, s_3)$...	$v(a_3, s_n)$
...
a_m	$v(a_m, s_1)$	$v(a_m, s_2)$	$v(a_m, s_3)$...	$v(a_m, s_n)$

нению инфраструктуры или системы организации движения (табл. 2). Оценка возможных выигрышей проводится для тридцатого года эксплуатации выбранного режима, поскольку стратегические проекты, аналогичные СШХ, демонстрируют экономическую эффективность именно в долгосрочной перспективе.

Результаты и обсуждение

Анализ значений чистого дисконтированного дохода (ЧДД) пяти рассматриваемых вариантов интервального регулирования при наиболее эффективной стратегии игрока и наименьшей агрессии природы (рис. 3) приводит к выводу о том, что обеспечить прибыльность СШХ может применение либо системы АБТЦ либо

системы «Анаконда», следовательно, детального рассмотрения при различных условиях требуют именно данные варианты.

Сравнение экономической эффективности различных сочетаний стратегий игрока и состояний природы при эксплуатации систем АБТЦ и «Анаконда» (рис. 4) позволяет установить превосходство перспективной системы над традиционной и сделать подкрепленный оценкой основных критериев теории игр (табл. 3) вывод о целесообразности применения частично-пакетного графика с двумя поездами в пакете при двух прямо-отправочных путях на каждом разъезде и семи прямо-отправочных путях на каждой участковой станции.

Таблица 2

Параметры стратегий игрока и состояний природы

Параметр	Принимаемые значения
<i>Стратегии игрока</i>	
Система интервального регулирования	ПАБ; АБТЦ; ВСЦ; АБТЦ-МШ; «Анаконда»
Количество поездов в пакете	0; 2; 3
Количество прямо-отправочных путей на разъездах	2; 3; 4
Количество прямо-отправочных путей на участковых станциях	5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12
Тип графика движения поездов	Непакетный; частично-пакетный; пакетный
<i>Состояния природы</i>	
Количество отказов СИРДП от общего времени, %	0; 33; 75
Количество ограничений скорости до 20 км/ч от общего времени в пути, %	0; 25; 50; 75
Степень реализации силы тяги локомотива, %	40, 50, 60
Коэффициент неравномерности поступления грузовых поездов на полигон	1; 1,25; 1,5
Максимальная скорость движения поездов, км/ч	50

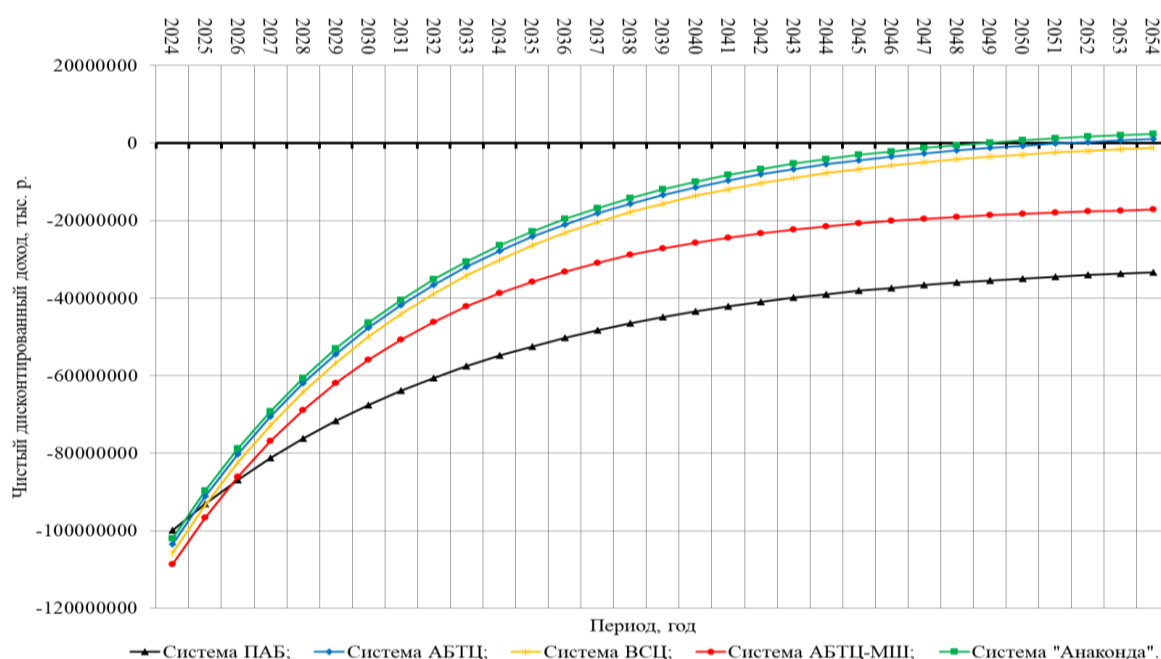


Рис. 3. График наибольшего ЧДД при различных СИРДП на СШХ

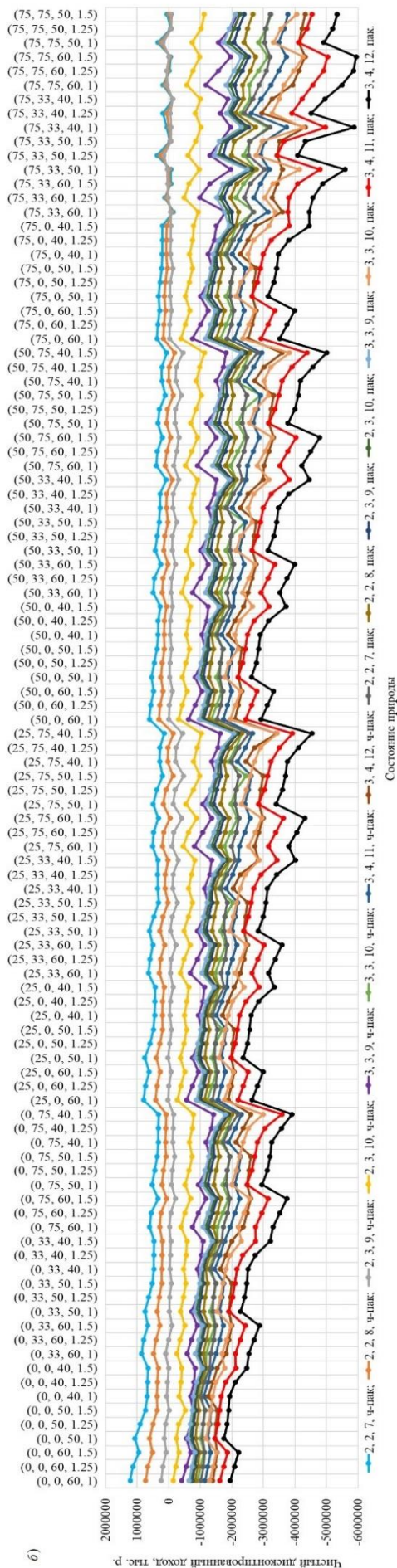
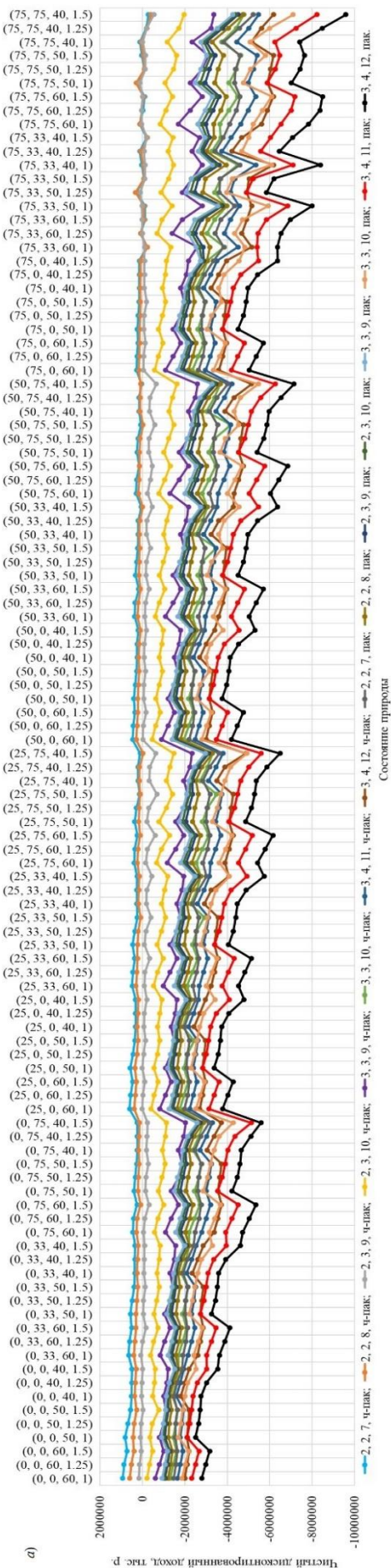


Рис. 4. Зависимость ЧДД от стратегии игрока и состояния природы при системах АБГЦ (а) и «Анаконда» (б):

2,5; 3,3; 4,0; 1,25 – состояние природы при 25 % действия временных ограничений скорости до 25 км/ч, 3,3 % отказов СИРЦ, 40 % использования силы тяги локомотива, 25 % внутрисуточной неравномерности перевозок (коэффициент составляет 1,25); 2, 2, 7, ч.-пак. – стратегия игрока, предполагающая два поезда в пакете, два приемо-отправочных пути на разъезде, семь приемо-отправочных путей на участковой станции, частично-пакетный тип графика движения

Таблица 3

Выбор оптимальной стратегии игрока на основе различных критериев

Критерий	Описание критерия	Оптимальная стратегия при АБТЦ (результат, тыс. р.)	Оптимальная стратегия при «Анаконде» (результат, тыс. р.)
Лапласа	Поиск максимума математического ожидания выигрыша	2, 2, 7, ч.-пак. (290 875,52)	2, 2, 7, ч.-пак. (385 761,37)
Вальда	Поиск максимума гарантированного выигрыша	2, 2, 7, ч.-пак. (–278 398,89)	2, 2, 7, ч.-пак. (–194 879,23)
Гурвица	Поиск максимума выигрыша при различном уровне оптимизма	2, 2, 7, ч.-пак. (от –278 398,89 до 938 137,26)	2, 2, 7, ч.-пак. (от –194 879,23 до 1 219 578,44)
Сэвиджа	Поиск минимума риска	2, 2, 7, ч.-пак. (135 664,72)	2, 2, 7, ч.-пак. (112 965,30)

Примечание. 2, 2, 7, ч.-пак. – стратегия, предполагающая два поезда в пакете при двух прямо-отправочных путях на каждом разъезде и семи прямо-отправочных путях на каждой участковой станции при частично-пакетном графике движения поездов.

Полученные результаты касательно невозможности реализации плановых размеров перевозок при ПАБ (за исключением состояний природы, близких к идеальным) не противоречат проведенному ранее исследованию ученых ВНИИЖТ [14], главным выводом которого явилась нерациональность использования ПАБ на СШХ, и дополняют его в части определения оптимальной стратегии игрока «Компания», выраженной через конкретное количество путей на станциях, тип графика и вариант интервального регулирования. Следует отметить также, что при корректировке размеров грузопотоков в сторону увеличения более капиталоемкие стратегии могут стать актуальнее (вплоть до замещения стратегии, являющейся на данный момент оптимальной).

В то же время одним из ключевых ограничений по внедрению наиболее комплексных (и, как следствие, наиболее дорогостоящих) СИРДП на данном полигоне будет постоянное ограничение скоростного режима движения поездов во избежание заledenения подвижного состава. При ограничении скорости до 50 км/ч становится возможным сокращение количества «фиксированных» блок-участков без потерь в участковой скорости. Именно по данной причине внедрение на СШХ ВСЦ, АБТЦ-МШ или других систем, ориентированных в первую очередь на сокращение межпоездного интервала, с большой степенью вероятности окажется нецелесообразным мероприятием.

С другой стороны, применение автоблокировки с «фиксированными» блок-участками

на СШХ также не является однозначно верным решением ввиду необходимости приоритетного внедрения на нем малолюдных технологий, способных снизить стоимость жизненного цикла СИРДП. Одной из таких технологий, отвечающих данным требованиям, является система «Анаконда», поэтому следует форсировать работы по оценке допустимости нахождения нескольких поездов на перегоне в условиях действия данной системы.

Более детальная оценка эффективности СИРДП на основе теоретико-игрового подхода делает возможным выявление оптимального режима эксплуатации однопутного полигона, при котором, с одной стороны, отсутствует дефицит пропускной способности, с другой стороны, снижается вероятность возникновения необоснованных капитальных вложений в инфраструктуру, что в конечном счете положительно влияет на себестоимость перевозок и качество обслуживания пассажиров и клиентов железнодорожного транспорта.

Вместе с тем недостатком предложенного подхода является потребность проведения значительного количества прогонов модели каждого из сочетаний стратегии игрока и состояния природы, а следовательно и значительная трудоемкость при его применении. Для решения данной проблемы требуется разработка методики определения технической целесообразности использования той или иной стратегии игрока для предварительного отбора вариантов, экономическая оценка которых целесообразна.

Выводы

Результаты исследования позволяют сформулировать выводы:

1. Использование СИРДП не только на двухпутных полигонах, но и на однопутных (в качестве меры по отдалению потребности возведения вторых главных путей) обладает потенциалом для значительного повышения качества эксплуатационной работы железнодорожного транспорта, в связи с чем проблема выбора оптимального варианта интервального регулирования, при котором возможно овладение плановыми размерами движения в полном объеме без чрезмерных капитальных вложений, становится все более актуальной.

2. Решения по развитию СИРДП должны быть подкреплены детальным моделированием рассматриваемого объекта, оно позволяет провести анализ взаимного влияния сгущаемых встречных поездопотоков при воздействии внешних факторов на перевозочный процесс.

3. При проектных размерах движения для СШХ оптимальным является применение

АБТЦ при двух поездах в пакете, двух приемо-отправочных путях на разъезде, семи приемо-отправочных путях на участковых станциях и частично-пакетном графике движения поездов; при функционировании в режиме нескольких поездов на перегоне (что на практике требует проведения испытаний) максимальную эффективность демонстрирует система «Анаконда» при аналогичных конфигурации и способе организации движения на полигоне.

4. Авторская методика может быть применена для любых других однопутных линий, на которых возникла проблема выбора оптимального варианта интервального регулирования, ее достоинством является возможность экономической оценки поездных ситуаций, складывающихся при различных сочетаниях технико-технологических параметров работы полигонов и основных характеристик поездопотоков; вместе с тем она обладает значительной трудоемкостью ввиду необходимости проведения множества прогонов имитационной модели.

Список источников

1. Черняк А. Р., Карасев С. В. Разработка структуры модели специализированной грузовой железнодорожной линии с группировкой функциональных задач // Транспорт: наука, техника, управление : научный информационный сборник. 2024. № 2. С. 24–34. DOI 10.36535/0236-1914-2024-02-4.
2. Бессоненко С. А., Климова Е. В., Осипов Н. И. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов // Транспорт Урала. 2023. № 3 (78). С. 35–45. DOI 10.20291/1815-9400-2023-3-35-45.
3. Бушуев С. В. Пути повышения провозной способности участков железных дорог // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8, № 4. С. 343–353. DOI 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353.
4. Бессоненко С. А., Осипов Н. И., Медведев В. И. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов как альтернативы сооружению вторых главных путей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 21–29. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_21.
5. Осипов Н. И. Многоподходное имитационное моделирование как основа качественной оценки эффективности интервального регулирования на однопутных линиях // Современные тенденции развития транспортной отрасли : материалы Международной научно-практической конференции. Нижний Новгород : Издательство Самарского государственного университета путей сообщения, 2024. С. 112–118.
6. Ефанов Д. В. Интеллектуальный транспорт: естественный отбор // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 38–40.
7. Блескин М. А. Есть ли альтернатива рельсовым цепям? // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 31.
8. Флегонтов А. В., Вилков В. Б., Черных А. К. Моделирование задач принятия решений при нечетких исходных данных : монография. Санкт-Петербург : Лань, 2023. 332 с.
9. Давыдов Б. И. Методы, модели и алгоритмы снижения технических и экономических рисков в процессе текущего управления движением поездов : специальность 2.9.4 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Давыдов Борис Израильевич. Хабаровск, 2022. 258 с.
10. Об использовании теории игр при оптимизации процесса технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, А. В. Истомин, Е. В. Кузьмина, А. Н. Малых // Наука и техника транспорта. 2023. № 1. С. 19–28.
11. Паспорт комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года : утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 06.09.2023 № 2274/р. Москва : ОАО «РЖД», 2023. 41 с.
12. Бушуев С. В., Ковалев И. А., Пермикин В. Ю. Влияние инфраструктурных ограничений железнодорожного транспорта на пространственное развитие региона // Материалы V Всероссийского симпозиума

по региональной экономике : в 2 т. Екатеринбург : Издательство института экономики Уральского отделения РАН, 2019. Т. 2. С. 22–27.

13. Создание железнодорожного Северного широтного хода / Ю. Н. Федоров, М. Б. Фейло, А. Ю. Чурилин, И. А. Поречина // Транспорт Российской Федерации. 2017. № 4 (71). С. 40–44.

14. Корниенко Н. В., Мехедов М. И. Выбор системы интервального регулирования движения поездов в условиях возрастающих потребностей освоения прогнозируемых объемов перевозок // Вестник ВНИИЖТ. 2022. Т. 81, № 1. С. 63–70. DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70.

References

1. Chernyak A. R., Karasev S. V. Development the model structure of a specialized freight railway line with grouping of functional tasks. *Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection*. 2024;(2):24–34. (In Russ.). DOI 10.36535/0236-1914-2024-02-4.

2. Bessonenko S. A., Klimova E. V., Osipov N. I. Evaluating the efficiency of interval train control. *Transport of the Urals*. 2023;(78):35–45. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2023-3-35-45.

3. Bushuyev S. V. Ways to increase the carrying capacity of railway sections. *Automation on Transport*. 2022;8(4):343–353. (In Russ.). DOI 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353.

4. Bessonenko S. A., Osipov N. I., Medvedev V. I. Evaluating the effectiveness of interval train control as an alternative to the constructing second main tracks. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):21–29. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_21.

5. Osipov N. I. Multi-approach simulation modelling as a basis for qualitative assessment of interval regulation efficiency on single-track lines. *Modern Trends in the Development of the Transport Industry. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Nizhny Novgorod: Publishing house of Samara State Transport University; 2024. P. 112–118. (In Russ.).

6. Efanov D. V. Intelligent transport: natural selection. *Automation, Communications, Informatics*. 2019;(2):38–40. (In Russ.).

7. Bleskin M. A. Is there an alternative to rail chains? *Automation, Communications, Informatics*. 2019;(2):31. (In Russ.).

8. Flegontov A. V., Vilkov V. B., Chernykh A. K. Modelling of decision-making problems with fuzzy initial data: monograph. Saint Petersburg: Lan, 2023. 332 p. (In Russ.).

9. Davydov B. I. Methods, models and algorithms for reducing technical and economic risks in the process of current train traffic control. Speciality 2.9.4 Management of transport processes. Dissertation for the degree of Doctor of Engineering. Davydov Boris Israelievich. Khabarovsk, 2022. 258 p. (In Russ.).

10. Gorelik A. V., Istomin A. V., Kuzmina E. V., Malykh A. N. On game theory application in optimizing technical operation process of railway automation and telemechanics systems. *Science and Technology in Transport*. 2023;(1):19–28. (In Russ.).

11. Passport of the comprehensive programme for the innovative development of the Russian Railways Holding Company for the period until 2025. Approved by order of Russian Railways No. 2274r dated 06.09.2023, Moscow; 2023. 41 p. (In Russ.).

12. Bushuev S. V., Kovalev I. A., Permikin V. Yu. Influence of infrastructure restrictions of railway transport on spacial development of a region. *Proceedings of the 5th All-Russian Symposium for Regional Economy*. Ekaterinburg: Publishing House of the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2019. Vol. 2. P. 22–27. (In Russ.).

13. Fedorov Yu. N., Feylo M. B., Churilin A. Yu., Porechina I. A. Building of the Northern Latitudinal Railway. *Transport of the Russian Federation*. 2017;(4):40–45. (In Russ.).

14. Kornienko N. V., Mekhedov M. I. Choice of the interval traffic control system in terms of increasing demands for the coverage of forecast traffic volumes. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):63–70. (In Russ.). DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70.

Информация об авторе

Н. И. Осипов – аспирант, преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

N. I. Osipov – postgraduate, Lecturer of Operations Management Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 02.05.2024; одобрена после рецензирования 16.05.2024; принята к публикации 17.05.2024.

The article was submitted 02.05.2024; approved after reviewing 16.05.2024; accepted for publication 17.05.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 89–97.
The Siberian Transport University Bulletin. 2024. No. 2 (69). P. 89–97.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.21.01/09
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_89

К вопросу об определении крутильной жесткости элементов несущих конструкций мостовых сооружений

Артем Николаевич Иванов^{1✉}, Данил Михайлович Завьялов²

^{1,2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ a.n.ivanov1@mail.ru✉

² zavdaniil2001@mail.ru

Аннотация. Крутильный момент инерции является важной геометрической характеристикой элементов пространственных мостовых конструкций. Крутильная жесткость элементов влияет на характер работы конструкции как напрямую, так и косвенно. При некорректном определении данного параметра теоретическое поведение конструкции под нагрузкой может показать значительное отличие от фактической ее работы. Поэтому значимость корректного вычисления крутильной жесткости элементов в расчетах пространственных конструкций трудно переоценить. Основная проблема в определении крутильного момента инерции – это большая трудоемкость вычислений для сечений общего вида. Строгие математические выражения имеют место только для сечений круглой формы. В данной работе рассмотрены различные методы, которые наиболее часто используются в практике инженерных расчетов мостовых конструкций. Освещены основные математические аспекты данных методов и кратко отмечены их основные достоинства и недостатки. Для балки таврового сечения, характерной для железобетонных пролетных строений мостов, проведены сравнительные вычисления всеми рассмотренными в статье методами. Показано, что результаты вычислений на основе МКЭ, выполненных в зарубежной программе Midas Civil и отечественной программе «Парис», хорошо согласуются друг с другом и показывают минимальное отклонение от результатов, определенных аналитическим методом мембранной аналогии. Частота дискретизации сеток конечных элементов оказывает влияние на погрешность результатов. В программе Midas Civil подбор оптимального размера конечных элементов осуществляется исполнителем путем перебора различных вариантов. В программе «Парис» подбор сетки конечных элементов выполняется автоматически из условия минимизации времени расчета и погрешности результатов. Упрощенные подходы дают большую погрешность и требуют минимальных трудозатрат, поэтому их целесообразно применять только для эскизных расчетов. Увеличение частоты разбиения рассматриваемого сечения на прямоугольные примитивы в упрощенных методах приводит к увеличению погрешности результатов вычислений. Наиболее приемлемые результаты получаются при минимальном количестве разбиений.

Ключевые слова: крутильный момент инерции, Midas Civil, «Парис», мембранная аналогия, теория Сен-Венана

Для цитирования: Иванов А. Н., Завьялов Д. М. К вопросу об определении крутильной жесткости элементов несущих конструкций мостовых сооружений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 89–97. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_89.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

On the issue of determining the torsional stiffness of elements of load-bearing structures of bridge structures

Artyom N. Ivanov^{1✉}, Danil M. Zavyalov²

^{1,2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ a.n.ivanov1@mail.ru✉

² zavdaniil2001@mail.ru

Abstract. The torsional moment of inertia is an important geometric characteristic of the elements of spatial bridge structures. The torsional rigidity of the elements affects the nature of the structure's operation both directly

and indirectly. If this parameter is incorrectly determined, the theoretical behavior of the structure under load may show a significant difference from its actual operation. Therefore, the importance of correct calculation of the torsional stiffness of elements in the calculations of spatial structures cannot be overestimated. The main problem in determining the torsional moment of inertia is the high complexity of calculations for sections of a general type. Strict mathematical expressions only apply to circular sections. This paper discusses various methods that are most often used in the practice of engineering calculations of bridge structures. The main mathematical aspects of these methods are covered and their main advantages and disadvantages are briefly noted. For a T-section beam, typical of reinforced concrete bridge superstructures, comparative calculations were carried out using all the methods discussed in the article. It is shown that the results of calculations based on FEM, performed in the foreign program Midas Civil and the domestic program Paris, are in good agreement with each other, and show minimal deviation from the results calculated by the analytical method of membrane analogy. The sampling frequency of finite element meshes affects the uncertainty of the results. In the Midas Civil program, the selection of the optimal size of the final elements is carried out by the contractor by searching through various options. In the program Paris the selection of a finite element mesh is carried out automatically based on the conditions of minimizing calculation time and ensuring a minimum error in the results. Simplified approaches provide greater error but require minimal labor, therefore, it is advisable to use them only for sketch calculations. An increase in the frequency of dividing the section under consideration into rectangular primitives in simplified methods leads to an increase in the error of the calculation results. The most acceptable results are obtained with a minimum number of partitions.

Keywords: torsional moment of inertia, Midas Civil, Paris, membrane analogy, Saint-Venant theory

For citation: Ivanov A. N., Zavyalov D. M. On the issue of determining the torsional stiffness of elements of load-bearing structures of bridge structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):89–97. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_89.

Введение

Развитие мостостроения идет по пути совершенствования конструкций. На смену примитивным конструктивным формам все чаще приходят пространственные конструкции плавных очертаний [1, 2]. Это влечет за собой усложнение характера работы конструкций и, как результат, необходимость совершенствования способов учета реальной работы в условиях сложных деформаций. Одними из таких сложных напряженно-деформированных состояний, характерных для элементов мостовых конструкций, являются внецентренное сжатие и кручение с изгибом. Крутильная жесткость оказывает значительное влияние на работу пространственных мостовых конструкций, являясь одним из основных параметров, определяющих характер поперечного распределения давления между элементами [3, 4]. При кручении возникают дополнительные напряжения, влияние которых может привести к повреждению конструкции [5]. Ярким примером этого служит Такомский мост, период эксплуатации которого не превысил четырех месяцев. Вследствие экстремальных крутильных колебаний угол закручивания балки жесткости вантового моста достигал 45° , что в итоге привело к ее разрушению.

Большой вклад в теорию пространственного расчета инженерных конструкций внесли ученые Б. Г. Галеркин, С. П. Тимошенко, В. З. Власов, Б. Е. Улицкий, А. А. Потапкин и др. Строгое решение многих задач строительной механики в мостостроении обычно оказывается

весьма сложным и при вычислении вручную вообще не может быть завершено в обозримые сроки. Поэтому методы расчета мостовых конструкций нередко содержат различного рода упрощающие предположения. Расчетные модели пролетных строений, которыми заменялись мостовые конструкции, все более усложнялись, приближаясь к реальным сооружениям. В шестидесятых годах прошлого века были разработаны методы, основанные на замене пролетных строений на балочные ростверки. В настоящее время метод балочного ростверка является одним из основных при моделировании пролетных строений в расчетных комплексах на основе МКЭ [6, 7] и рекомендован к применению для выполнения расчетов грузоподъемности в отраслевых нормативных документах, таких как ОДМ 218.4.026–2016 для сооружений на автомобильных дорогах и Методика по определению предельных состояний пешеходных мостов, находящихся на балансе ОАО «РЖД».

Анализ результатов расчетов и испытаний пролетных строений на вертикальные воздействия от подвижной нагрузки показывает, что во многом на сходимость результатов влияет крутильная жесткость элементов, особенно при сравнении линий влияния давления [8, 9]. Из-за пространственного характера работы элементы мостовых конструкций редко находятся в состоянии «чистого» изгиба, и довольно часто на результаты оказывает косвенное влияние крутильная жесткость элементов, даже при отсутствии прямой работы на кручение. Аналогичная ситу-

ация возникает и при использовании упрощенных методов расчета типовых конструкций, давно применяемых в инженерной практике. Так, например, для определения усилий в расчетных сечениях плиты проезжей части железобетонного пролетного строения применяются коэффициенты α_i , учитывающие степень защемления плиты в зависимости от соотношения цилиндрической жесткости плиты и крутильной жесткости ребра [10, 11]. Все это указывает на то, что момент инерции сечения элемента на кручение I_k является важной геометрической характеристикой, которая, наряду с другими геометрическими параметрами, определяет корректность расчетов элементов, находящихся в сложных напряженно-деформированных состояниях.

В общем виде крутильная жесткость любого сечения определяется формулой

$$C = GI_k, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига, является постоянной величиной для материала, из которого выполнен рассматриваемый элемент; I_k – крутильный момент инерции сечения.

Следовательно, определение крутильной жесткости сечения сводится к нахождению геометрической характеристики сечения на кручение I_k .

Для круглых сплошных или кольцевых сечений, применяемых в опорах мостовых конструкций, нахождение I_k не представляет сложности и вычисляется по табличным формулам. Но элементы такого сечения довольно редко применяются в пролетных строениях. Как правило, сечение балок пролетных строений имеет сложную геометрическую форму (тавр, двутавр, коробка, к тому же с криволинейными вутами), и нахождение их крутильной жесткости связано с большими вычислительными сложностями. Поэтому задача по поиску решения, дающего приемлемые по точности результаты вычисления крутильного момента инерции сечения произвольной формы, но не требующего больших трудозатрат, является весьма актуальной.

Целью работы является анализ способов вычисления крутильной жесткости элементов с сечениями общего вида и определение границ их применимости.

Методы исследования

Впервые значение жесткости получено известным французским инженером Сен-Венаном

с помощью аппарата теории упругости. Определение крутильной жесткости данным способом представляет собой сложную задачу по поиску функции перемещения, так как необходимо учитывать не только взаимный поворот сечений, но и местный перекося – деформацию (перемещение точек сечения на разные величины).

По теории Сен-Венана крутящий момент M_k пропорционален погонному углу закручивания Θ :

$$M_k = C\Theta. \quad (2)$$

Крутильная жесткость C определена по формуле

$$C = G \left\{ I_p - \int \int \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] dF \right\}, \quad (3)$$

где I_p – полярный момент инерции сечения; $\varphi(x, y)$ – функция перемещений при кручении; x, y – координаты точки поперечного сечения; F – площадь поперечного сечения.

Из формул (1) и (3) следует, что крутильный момент инерции сечения можно вычислить следующим образом:

$$I_k = I_p - \int \int \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] dF. \quad (4)$$

Процесс вычисления значения крутильного момента инерции сечения по теории Сен-Венана довольно трудоемкий, если его проводить вручную. Поэтому он нашел широкое применение в программных комплексах, где его можно автоматизировать. Одним из таких программных комплексов, широко применяемых в России для расчетов мостовых конструкций, является Midas Civil, разработанный в Южной Корее. В рамках федерального плана по импортозамещению программного обеспечения в 2023 г. был представлен релиз отечественной программы «Парис» по расчету мостовых конструкций. Данная программа, как и Midas Civil, определяет все необходимые для расчетов геометрические характеристики поперечных сечений любой формы. В обеих программах для определения геометрических характеристик используется МКЭ с разбиением сечений на плосконапряженные треугольные конечные элементы. Все расчеты при этом осуществляются в матричном виде. Матрица реакций для произвольного конечного элемента треугольной формы имеет вид

$$[R_m] = [B_m]^T [B_m] A_m, \quad (5)$$

где B_m – матрица связи перемещений с относительными деформациями; A_m – площадь конечного элемента.

Матрица B_m вычисляется по формуле

$$[B_m] = \frac{1}{2A_m} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где b_i, b_j, b_k – разности координат точек рассматриваемого конечного элемента по оси x ; c_i, c_j, c_k – разности координат точек рассматриваемого конечного элемента по оси y .

Разрешающая система линейных алгебраических уравнений МКЭ имеет вид

$$[\bar{R}]\Phi = \bar{T}, \quad (7)$$

где $[\bar{R}]$ – полная матрица коэффициентов разрешающей системы уравнений; Φ – вектор узловых функций напряжений; \bar{T} – вектор правой части.

Вектор правой части определяется как

$$\bar{T} = \frac{2G\Theta A_m}{3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Приняв $\Theta = 1$, определяют крутящий момент для m -го треугольного конечного элемента по формуле

$$M_m = \frac{2}{3} A_m (\Phi_i + \Phi_j + \Phi_k). \quad (9)$$

Таким образом, момент инерции сечения на кручение составит

$$I_{кр} = \frac{\Sigma M_m}{G}. \quad (10)$$

Внутренняя утилита программы Midas Civil вычисляет значения требуемых для расчетов геометрических характеристик, включая и момент инерции на кручение, в зависимости от величины размера сетки разбиения поперечного сечения на примитивы (конечные элементы). Пользователь самостоятельно должен подбирать дискретизацию этой сетки разбиения. В то время как в программном комплексе «Парис» реализован алгоритм подбора оптимальной частоты дискретизации сетки из условия минимизации времени расчета и погрешности результатов.

Программы на основе численных методов начали активно применяться при расчетах мостовых конструкций в начале XXI в. До этого времени в инженерной практике использовались аналитические методы, где теория Сен-Венана широкого распространения в ее исходном виде не получила. Метод был упрощен для практиче-

ских нужд, и в работе Н. А. Красина [12] получена формула следующего вида:

$$I_{кр} = \Sigma \alpha_i h_i b_i^3, \quad (11)$$

где α_i – коэффициенты Сен-Венана, определяемые в зависимости от соотношения h_i и b_i по табл. 2.1 [13]; i – номер примитива рассматриваемого сечения; h_i и b_i – длина и ширина условных элементов (примитивов), на которые разделено рассматриваемое поперечное сечение, соответственно.

Формула (11) проста в применении, но для вычисления значений момента инерции на кручение необходимо иметь значения коэффициентов α . При этом рассматриваемое сечение должно быть разделено на примитивы прямоугольной формы, которые могут быть разного размера, а потому коэффициенты α могут принимать различные значения. Поэтому в практике инженерных расчетов наибольшее распространение получила еще более упрощенная формула, приведенная в работе [11]:

$$I_{кр} = \frac{\Sigma (h_i - 0,63\delta_i)\delta_i^3}{3}, \quad (12)$$

где h_i, δ_i – больший и меньший размеры прямоугольного примитива, независимо от его ориентации в пространстве, соответственно.

Формулы (11) и (12) удобны для практического использования, но открытым остается вопрос о влиянии количества примитивов на погрешность результатов. Аналогичный вопрос возникает и относительно результатов расчетов в программах Midas Civil и «Парис», которые также зависят от частоты дискретизации сеток конечных элементов.

В 1903 г. немецким физиком-механиком Людвигом Прандтлем был сформулирован метод мембранной аналогии, который в настоящее время является одним из наиболее часто применяемых аналитических методов [13]. Погрешность результатов, получаемых при вычислении крутильного момента инерции элементов различных сечений, была исследована сотрудниками кафедры прикладной механики МГТУ им. Н. Э. Баумана в работе [14]. Суть метода заключается в том, что на контур, повторяющий контур поперечного сечения стрелы, натягивается мембрана. К границам мембраны прикладывают единичное распределенное усилие, вызывающее ее деформацию.

Таким образом, задача о кручении стержня сводится к нахождению формы прогиба мембраны и при этом действительны следующие положения:

1) аналогом функции кручения служат перемещения мембраны h_i ;

2) аналогом крутящего момента является объем между плоскостью контура и поверхностью деформированной мембраны;

3) напряжению соответствует угол между касательной к поверхности мембраны и плоскостью контура.

На рис. 1 приведена иллюстрация данного метода.

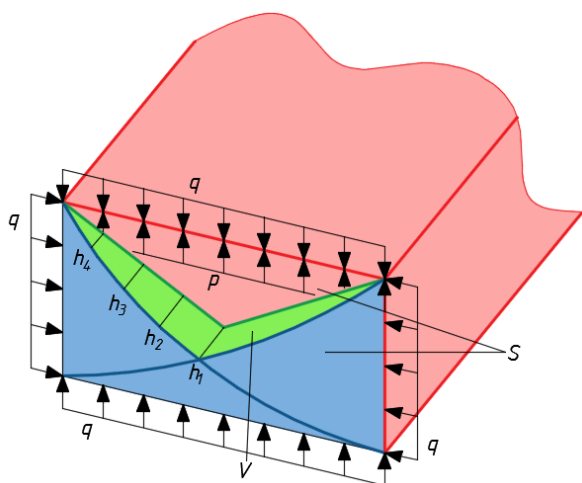


Рис. 1. Деформированная мембрана

Для нахождения перемещений h_i полный потенциал системы Π выражается через параметры деформации мембраны:

$$\Pi = q\Delta S - pV, \quad (13)$$

где q и p – единичные усилия; ΔS – разность площади деформированной мембраны и площади сечения; V – объем, заключенный между плоскостью контура и поверхностью мембраны.

Указанные выше положения позволяют связать крутильный момент инерции I_k с параметрами прогиба мембраны. Подставив найденные значения S и V в выражения потенциала системы Π , можно определить частные производные по каждому перемещению h_i . Затем, решая систему уравнений, вычисляют объем, заключенный между плоскостью поперечного сечения рассматриваемого элемента и поверхностью деформированной мембраны. Конечное выражение в общем виде выглядит следующим образом:

$$V = \frac{rap}{kbq}, \quad (14)$$

где r и k – натуральные числа; a и b – геометрические размеры сечений.

Затем, принимая во внимание выражения $M_k = \frac{4G\theta q}{p}V$ и $M_k = GI_k\theta$, можно получить формулу для вычисления момента инерции сечения элемента на кручение через объем контура деформации мембраны:

$$I_k = \frac{4q}{p}V. \quad (15)$$

Таким образом, решение задачи сводится к нахождению объема, образованного внешним контуром деформированной мембраны и плоскостью поперечного сечения рассматриваемого элемента. Формула (15) позволяет определять значения моментов инерции на кручение стержней любого сечения, но процесс вычисления объема в общем виде представляет собой трудоемкую задачу, а потому широкого применения в инженерной практике не нашел. Однако исследования, проведенные А. А. Кирюхиным и Б. Н. Сульдиным [14], показали, что данный метод имеет хорошую согласованность результатов с аналитическими методами теории упругости, базирующимися на теории Сен-Венана. Расхождение результатов не превышает 5 % даже при грубом разбиении сечения на примитивы.

Результаты исследования

Для анализа результатов вычисления I_k по вышеописанным методам найдем значение крутильного момента инерции для таврового сечения, представленного на рис. 2.

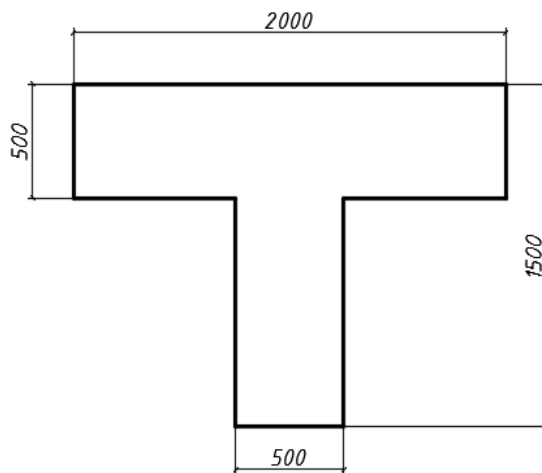


Рис. 2. Расчетное сечение

Результаты расчетов в программе Midas Civil:

- $I_k = 0,133 \text{ м}^4$ – крупная сетка конечных элементов;
- $I_k = 0,130 \text{ м}^4$ – средняя сетка конечных элементов;
- $I_k = 0,126 \text{ м}^4$ – мелкая сетка конечных элементов.

По результатам расчетов в программе «Парис» момент инерции таврового сечения $I_k = 0,131 \text{ м}^4$.

Разброс результатов вычислений в зависимости от частоты дискретизации сетки конечных элементов в программе Midas Civil относительно среднего значения составляет не более 5 %, что для инженерной точности расчета мостовых конструкций является вполне приемлемой величиной. Отличие результата расчета в программе «Парис» от среднего результата расчетов в программе Midas Civil составляет порядка 1 %, что указывает на хорошую согласованность результатов.

Для расчета момента инерции таврового сечения на кручение по формулам (11) и (12) исходное сечение было разбито на прямоугольные примитивы с разной степенью дискретизации: 2, 6, 12 и 24 сектора. Схемы разбивки приведены на рис. 3, результаты расчетов представлены на рис. 4 в виде диаграммы.

Наилучшую согласованность результатов расчета по формулам (11) и (12) с результатами расчетов по МКЭ показала схема с наименьшим количеством разбиений сечения на примитивы. Увеличение частоты дискретизации приводило к существенному изменению результатов, в среднем около 50 % на каждом шаге принятой разбивки, со все большим отклонением от результатов расчета по МКЭ.

Результаты расчетов методом мембранной аналогии для схемы разбивки:

- на 2 примитива: $I_k = 0,128 \text{ м}^4$;
- на 6 примитивов: $I_k = 0,129 \text{ м}^4$;
- на 12 примитивов: $I_k = 0,130 \text{ м}^4$;
- на 24 примитива: $I_k = 0,130 \text{ м}^4$.

Расчет по данному методу показывает, что с увеличением количества разбиений сечения на сектора значение момента инерции на кручение изменяется, но диапазон изменения не превышает 2 % для рассмотренных степеней дискретизации. Это указывает на стабильные результаты, которые к тому же хорошо согласуются с результатами расчетов сечения по МКЭ.

Сравнение значений момента инерции таврового сечения на кручение, определенного разными методами, представлено в таблице. По упрощенным формулам (11) и (12) теории Сен-Венана приняты значения для минимального количества примитивов разбиения

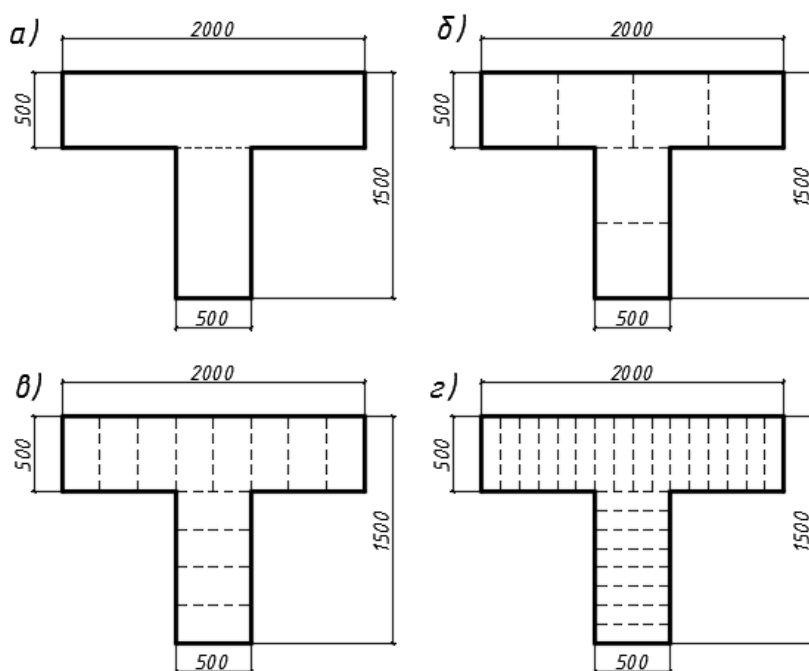


Рис. 3. Схемы разбивки сечения на примитивы:
а – на 2; б – на 6; в – на 12; г – на 24

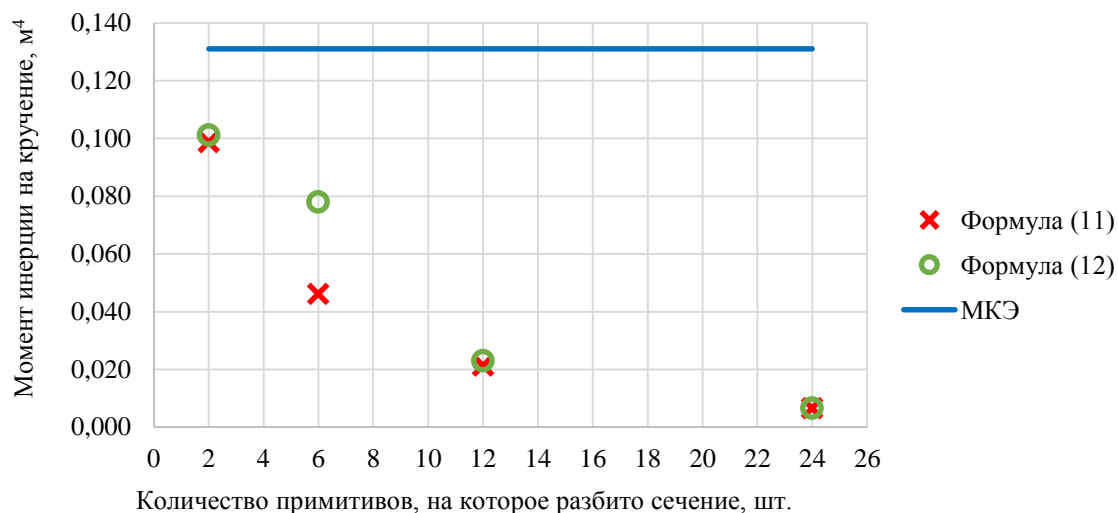


Рис. 4. Диаграмма результатов расчета момента инерции таврового сечения на кручение в зависимости от количества примитивов разбиения

Результаты сравнения

Метод	Момент инерции сечения на кручение, м ⁴	Отклонение от опорного значения, %
Мембранная аналогия	0,129	–
МКЭ (Midas Civil)	0,130	1
МКЭ («Парис»)	0,131	2
Упрощенная теория Сен-Венана: с коэффициентами формы, формула (11)	0,101	–22
формула (12)	0,099	–23

ния. По методу мембранной аналогии и по МКЭ приняты средние результаты расчетов рассмотренных дискретизаций сечений. В качестве опорного значения принят результат расчета по методу мембранной аналогии ввиду его хорошей согласованности с аналитическими методами теории упругости, базирующимися на теории Сен-Венана, подробно рассмотренной в работе [14].

Выводы

По результатам проведенного исследования сформулированы следующие выводы:

1. Зарубежная программа Midas Civil и отечественная программа «Парис» реализуют одинаковый метод расчета крутильного момента инерции сечения произвольной формы на базе теории Сен-Венана, но применяют разные подходы. При использовании программы Midas Civil исполнитель путем перебора различных вариантов дискретизации сетки конечных элементов и анализа результатов определяет приемлемое значение геометрических характеристик. Это требует больших за-

трат времени в сравнении с программой «Парис», в которой подбор сетки осуществляется автоматически из условия минимизации времени расчета и погрешности результатов.

2. Средние значения расчетов, полученные при разной частоте дискретизации сетки конечных элементов в программе Midas Civil, незначительно отличаются от результатов расчета в программе «Парис» и по методу мембранной аналогии. Реализованные в программе «Парис» алгоритмы позволяют получать результаты вычислений геометрических характеристик сечений, включая крутильный момент инерции, с наименьшими трудозатратами при обеспечении минимальных погрешностей от аналитических методов теории упругости, базирующихся на теории Сен-Венана.

3. Упрощенная теория Сен-Венана, реализованная в формулах (11) и (12), имеет большие погрешности, а потому область их применения могут быть только эскизные расчеты. При этом увеличение количества примитивов, на которые разделяется рассматриваемое се-

чение, приводит только к увеличению погрешности результатов. При использовании данных формул сечение следует разделять на минимально возможное количество прямоугольных примитивов.

Таким образом, наиболее целесообразным способом вычисления крутильного момента

инерции сечения произвольной формы является теория Сен-Венана, реализованная МКЭ в отечественном программном продукте «Парис». Упрощенные формулы, наиболее часто применяемые в инженерных расчетах, могут быть применены только в эскизных расчетах ввиду большой погрешности результатов.

Список источников

1. Ефимов П. П. Архитектура мостов. Москва : Информавтодор, 2003. 288 с.
2. Бахтин С. А. Разработка комплексного алгоритма многокритериальной оптимизации на примере проектирования экологических путепроводов (ландшафтных мостов) на автомагистралях // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2 (57). С. 61–69. DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_61.
3. Засухин И. В., Соловьев Л. Ю. Особенности пространственной работы железнодорожных металлических пролетных строений, установленных в кривых участках пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (62). С. 49–56. DOI 10.52170/1815-9265_2022_62_49.
4. Расчет грузоподъемности стоечных опор моста с помощью комплекса MIDAS / С. В. Ефимов, К. О. Жунев, Е. Г. Попова, А. М. Усольцев // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 1. С. 11–13.
5. Гусева О. В. Обзор существующих подходов к расчету железобетонных балок в условиях кручения с изгибом // Молодой ученый. 2020. № 50 (340). С. 77–79.
6. Бобешко А. А. Метод учета пространственной работы // Образование и наука в России и за рубежом. 2014. № 6 (15). С. 31–34.
7. Усилия в элементах металлических пролетных строений с ортотропным балластным корытом / И. В. Засухин, А. М. Усольцев, К. О. Жунев, К. В. Кобелев // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 5. С. 20–22.
8. Ермолич А. Н., Иванов А. Н. Разработка пространственной конечно-элементной расчетной модели сталежелезобетонного пролетного строения // Интеллектуальный потенциал Сибири : 30-я Региональная научная студенческая конференция : сборник научных трудов. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2022. С. 591–594.
9. Ефимов П. П. Экспериментальные методы исследования мостов : учебное пособие. Омск : Омский государственный технический университет, 1994. 195 с.
10. Ефимов П. П. Проектирование мостов. Часть I. Казань : Идел-Пресс, 2011. 136 с.
11. Власов Г. М., Устинов В. П. Расчет железобетонных мостов. Москва : Транспорт, 1992. 256 с.
12. Красин Н. А. Определение крутильной жесткости железобетонных балок // Вопросы надежности и долговечности искусственных сооружений железнодорожного транспорта : межвузовский сборник научных трудов / под редакцией Г. М. Власова. Новосибирск : Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1990. С. 32–38.
13. Феодосьев В. И. Соппротивление материалов. Москва : Издательство Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, 1999. 592 с.
14. Кирюхин А. А., Сульдин Б. Н. Расчет крутильной жесткости стержня на основе пленочной аналогии // Политехнический молодежный журнал. 2018. № 5 (22). С. 9. DOI 10.18698/2541-8009-2018-5-321.

References

1. Efimov P. P. Architecture of bridges. Moscow: Informavtodor; 2003. 288 p. (In Russ.).
2. Bakhtin S. A. Development of a complex multi-criteria optimization algorithm using the example of designing environmental overpasses (landscape bridges) on highways. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(57):61–69. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_61.
3. Zasukhin I. V., Solovyov L. Yu. Features of the spatial work of railway metal spans installed in curved sections of the track. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(62):49–56. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_62_49.
4. Efimov S. V., Zhunev K. O., Popova E. G., Usoltsev A. M. Calculation of the load capacity of bridge rack supports using the MIDAS complex. *Track and Track Management*. 2022;(1):11–13. (In Russ.).
5. Guseva O. V. Review of existing approaches to the calculation of reinforced concrete beams under conditions of torsion with bending. *Young Scientist*. 2020;(340):77–79. (In Russ.).

6. Bobeshko A. A. Method of accounting for spatial work. *Education and Science in Russia and Abroad*. 2014;(15):31–34. (In Russ.).
7. Zasukhin I. V., Usoltsev A. M., Zhunev K. O., Kobelev K. V. Forces in the elements of metal spans with an orthotropic ballast trough. *Path and Track Management*. 2022;(5):20–22. (In Russ.).
8. Ermolich A. N., Ivanov A. N. Development of a spatial finite element calculation model of a steel-reinforced concrete span structure. *Intellectual Potential of Siberia: 30th Regional Scientific Student Conference: collection of Scientific Papers*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2022. P. 591–594. (In Russ.).
9. Efimov P. P. Experimental methods for studying bridges: a textbook. Omsk: Omsk State Technical University; 1994. 195 p. (In Russ.).
10. Efimov P. P. Bridge design. Part I. Kazan: Idel-Press; 2011. 136 p. (In Russ.).
11. Vlasov G. M., Ustinov V. P. Calculation of reinforced concrete bridges. Moscow: Transport; 1992. 256 p. (In Russ.).
12. Krasin N. A. Determination of torsional rigidity of reinforced concrete beams. *Issues of Reliability and Durability of Artificial Structures of Railway Transport: Interuniversity Collection of Scientific Papers*. Ed. G. M. Vlasov. Novosibirsk: Novosibirsk Institute of Railway Transport Engineers; 1990. P. 32–38. (In Russ.).
13. Feodosyev V. I. Resistance of materials. Moscow: Publishing house of MSTU im. N. E. Bauman; 1999. 592 p.
14. Kiryukhin A. A., Suldin B. N. Calculation of torsional stiffness of a rod based on film analogy. *Polytechnic Youth Magazine*. 2018;(22):9. (In Russ.). DOI 10.18698/2541-8009-2018-5-321.

Информация об авторах

А. Н. Иванов – доцент кафедры «Мосты», заведующий отделом «Композиционные материалы и конструкции» СибНИИ мостов Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент.

Д. М. Завьялов – студент факультета «Мосты и тоннели» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. N. Ivanov – Associate Professor of the Bridges Department, Head of the Department of Composite Materials and Structures of the Siberian Research Institute of Bridges, Siberian Transport University, Candidate of Engineering, Associate Professor.

D. M. Zavyalov – student, Bridges and Tunnels Faculty, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 16.02.2024; одобрена после рецензирования 16.04.2024; принята к публикации 02.05.2024.

The article was submitted 16.02.2024; approved after reviewing 16.04.2024; accepted for publication 02.05.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 625.7/.8+625.123
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_98

Двухпараметрический температурный критерий начала криогенного влагопереноса для решения задач регулирования влагонакопления промерзающих грунтов

Денис Алексеевич Разуваев^{1✉}, Александр Леонидович Исаков²,
Михаил Геннадьевич Чахлов³

^{1,2,3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ razdenis@mail.ru✉

² mylab.alex@yandex.ru

³ mik404@mail.ru

Аннотация. В статье введен температурный функционал, аргументами которого являются температура грунта и ее градиент вдоль вертикальной оси промерзания глинистого грунта, с помощью которого сформулирован двухпараметрический критерий начала интенсивного криогенного капиллярно-пленочного влагопереноса применительно к решению задач регулирования влагонакопления в промерзающих грунтах.

Приведен алгоритм решения задачи по определению нижней границы зоны криогенного влагопереноса в грунтовом массиве на любом из этапов его промерзания с использованием специального модуля Freeze-1a в программном комплексе Freeze-1.

Показан пример определения в лабораторных условиях функциональной зависимости, используемой в двухпараметрическом критерии начала интенсивного криогенного влагопереноса, для эксплуатируемого участка земляного полотна, сложенного суглинком с числом пластичности 0,10.

Выполнена верификация расчетного алгоритма определения нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса по двухпараметрическому температурному критерию с использованием результатов мониторинга водно-теплого режима на участке эксплуатируемого земляного полотна. Полученные данные позволили сделать вывод о корректности предложенного подхода к определению уровня нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса. Кроме того, показали достаточную сходимость расчетные и фактические значения глубин промерзания грунтов земляного полотна, что говорит об адекватности модели одномерного температурного поля, определяемого с использованием программного комплекса Freeze-1.

Ключевые слова: земляное полотно, глинистые грунты, морозное пучение, миграция воды в грунтах, пучины, просадки

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке ОАО «РЖД» (грант на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта).

Для цитирования: Разуваев Д. А., Исаков А. Л., Чахлов М. Г. Двухпараметрический температурный критерий начала криогенного влагопереноса для решения задач регулирования влагонакопления промерзающих грунтов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 98–105. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_98.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Two-parameter temperature criterion for the onset of cryogenic moisture transfer for solving problems of regulating moisture accumulation in freezing soils

Denis A. Razuvaev^{1✉}, Alexander L. Isakov², Mikhail G. Chakhlov³

^{1,2,3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ razdenis@mail.ru✉

² mylab.alex@yandex.ru

³ mik404@mail.ru

Abstract. The article introduces a temperature functional, with temperature of the soil and its gradient along the vertical axis in freezing clay soil as its arguments, by which a two-parameter criterion for the onset of intense cryogenic capillary-film water transfer is formulated for addressing moisture regulation tasks in freezing soils.

An algorithm for solving the problem of determining the lower boundary of the cryogenic water transfer zone in the soil mass, at any stage of its freezing, using a special module Freeze-1a within the Freeze-1 software complex, is presented.

An example of determining the functional dependence used in the two-parameter criterion for the onset of intense cryogenic water transfer in laboratory conditions is provided for an operational section of the roadbed composed of clay with a plasticity index of 0.10.

Verification of the calculation algorithm for determining the lower boundary of the intense cryogenic water transfer zone according to the two-parameter temperature criterion using the results of monitoring the water-thermal regime on a section of the operational roadbed has been conducted. The obtained data allowed concluding on the correctness of the proposed approach to determining the level of the lower boundary of the intense cryogenic water transfer zone. Additionally, they demonstrated sufficient convergence between calculated and actual depths of soil freezing in the roadbed, indicating the adequacy of the one-dimensional temperature field model determined using the Freeze-1 software complex.

Keywords: roadbed, clayey soils, frost heaving, water migration in soils, frost boils, settlements

Financing: the research was carried out with the financial support of Russian Railways (grant for the development of research-pedagogical schools in the field of railway transport).

For citation: Razuvaev D. A., Isakov A. L., Chakhlov M. G. Two-parameter temperature criterion for the onset of cryogenic moisture transfer for solving problems of regulating moisture accumulation in freezing soils. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):98–105. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_98.

Введение

Проблема деформирования эксплуатируемого земляного полотна железных и автомобильных дорог вследствие сезонного промерзания и последующего оттаивания глинистых грунтов деятельного слоя является весьма актуальной [1, 2]. В особой степени это относится к районам широкого распространения потенциально пучинистых грунтов в сочетании с близким уровнем грунтовых вод.

Неравномерное морозное пучение промерзающих грунтов земляного полотна нередко приводит к образованию сверхнормативных пучин, препятствующих нормальной эксплуатации вышележащих конструкций верхнего строения пути, а последующее оттаивание – к образованию слабых грунтов, потере несущей способности основной площадки и просадкам (балластным выплескам).

Сверхнормативные пучины и последующие просадки так или иначе связаны с криогенным влагопереносом (миграцией влаги) и влагонакоплением в промерзающих глинистых грунтах и пылеватых песках. Поэтому регулирование влажностного режима грунтов земляного полотна, наряду с их заменой или теплоизоляцией [3, 4], является одним из эффективных направлений борьбы с морозным пучением на железных и автомобильных дорогах. Особенно эффективны способы регулирования влажностного режима грунтов при наличии открытой системы промерзания, предполагающей миграцию близко расположенных грунтовых вод в

зону промерзания при реализации главным образом капиллярно-пленочного механизма влагопереноса.

При этом для корректных расчетов и конструирования тех или иных вариантов регулирования влажностного режима в земляном полотне и его основании необходимо четкое понимание положения зон криогенного влагопереноса в грунте на любом из этапов его промерзания. Имея четкий и обоснованный критерий для позиционирования зоны криогенного влагопереноса, возможно избежать ошибок, допускаемых при решении задач регулирования влагонакопления в промерзающих грунтах. Такие ошибки могут приводить к чрезмерному влагонакоплению как в зоне промерзания, с образованием пучин, так и в зонах с положительными значениями температуры, что сопровождается резким снижением несущей способности грунтов [5].

На любом из этапов промерзания грунтового массива существует зона интенсивного криогенного влагопереноса [6–9], близкая, но не совпадающая по глубине с зоной фазовых переходов. Достаточно часто зону интенсивного криогенного влагопереноса привязывают к эмпирически установленным интервалам отрицательных температур, хотя известно, что на механизм криогенной миграции, как и на интенсивность морозного пучения, влияет также градиент температуры [10, 11].

В настоящей работе приводится алгоритм решения задачи по определению уровня нижней

границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса с использованием двухпараметрического температурного критерия и пример его реализации для конкретного грунта земляного полотна, а также верификация расчетной схемы с помощью проведения натурного мониторинга.

Алгоритм решения задачи

В соответствии с вышесказанным при промерзании (охлаждении) грунтового массива существует зона, в которой происходит интенсивный криогенный капиллярно-плёночный влагоперенос. Для определения уровня нижней границы этой зоны введем в рассмотрение некий функционал $F(t, \nabla t)$, аргументами которого являются температура грунта t и ее градиент вдоль вертикальной оси ∇t . Физическим смыслом данного температурного функционала является выделение зоны возможного криогенного влагопереноса в промерзающих грунтах на поле изменения пары параметров $(t, \nabla t)$. В качестве критерия влагопереноса примем условие $F(t, \nabla t) > 0$. На координатной плоскости аргументов функционала t и ∇t (рис. 1) это условие отождествляется с зоной, расположенной выше кривой некоторой функции $\nabla t = f(t)$, определяемой экспериментально из условия $F(t, \nabla t) = 0$ для каждого вида грунта.

Таким образом, мы приходим к определению двухпараметрического критерия криогенного влагопереноса, связывающего температуру грунта и ее градиент неравенством

$$\nabla t > f(t), \quad (1)$$

где ∇t – расчетный градиент температуры грунтового массива по глубине в зоне промерзания, °C/см; t – расчетная температура промерзающего грунта, °C.

В [12] был экспериментально получен вид функции $f(t)$ для глинистых грунтов в интервале числа пластичности от 0,05 до 0,13:

$$f(t) = ae^{bt}, \quad (2)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от характеристик грунта.

Функция (2) описывает границу зоны начала криогенного влагопереноса для грунтового массива, сложенного глинистыми грунтами.

Соответственно, введенный функционал в рассматриваемом случае будет иметь вид

$$F(t, \nabla t) = \nabla t - ae^{bt}. \quad (3)$$

Как показывают эксперименты, влагоперенос может происходить и при положительных значениях температуры грунта (см. рис. 1) в сочетании с относительно высокими значениями температурного градиента. В этом случае влагоперенос происходит не при промерзании, а при охлаждении грунтового массива.

Решение задачи по определению нижней границы зоны криогенного влагопереноса в грунтовом массиве на любом из этапов его промерзания можно выполнить с использованием специального модуля Freeze-1a в программном комплексе Freeze-1 [13]. Данный программный модуль предназначен для определения одномерного нестационарного температурного поля грунтов земляного полотна с получением оценок глубины сезонного промерзания и температурного градиента по вертикальной оси. При этом программа учитывает основные необходимые климатические и техногенные факторы.

Для решения поставленной задачи в программном модуле Freeze-1a вычисляется температурный функционал (3) для любого фик-

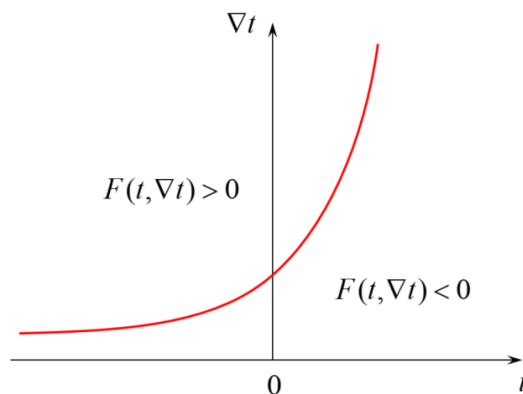


Рис. 1. График нулевых значений температурного функционала на координатной плоскости его аргументов – температуры грунта t и ее градиента ∇t

сированного времени (декады) по всей глубине промерзающего грунтового массива. На рис. 2 приведен пример вывода температурного функционала для земляного полотна, эксплуатируемого в климатических условиях Западной Сибири, с общей мощностью щебеночных и песчаных материалов вышележащих конструкций 0,75 м.

Точка пересечения графиком оси ординат характеризует глубину нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса, где температурный функционал равен нулю.

Вышеописанная схема позволяет с использованием программного модуля Freeze-1a определять положение нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса для решения задач регулирования влагонакопления в промерзающих грунтовых массивах.

Таким образом, алгоритм определения уровня нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса можно представить в следующем виде:

- определение функциональной зависимости (2) для грунтов земляного полотна;
- расчет температурного поля земляного полотна в период промерзания;
- построение графиков значений температурного функционала за расчетный период;
- определение максимальной глубины нулевых значений температурного функционала

($F(t, \nabla t) = 0$), принимаемой за уровень нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса.

Верификация предложенного алгоритма

Для верификации предложенного алгоритма определения уровня нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса с использованием двухпараметрического температурного критерия выполнен мониторинг водно-теплого режима участка эксплуатируемого земляного полотна.

Для мониторинга выбран участок эксплуатируемого земляного полотна в Новосибирском районе, подробное описание которого выполнено авторами в работе [14]. Периодические измерения температуры производились по ГОСТ 25358 [15] с помощью термометрической косы и контроллера цифровых датчиков ПКЦД-1/100 в специально оборудованной термометрической скважине (рис. 3, а). Определение влажности в деятельном слое выполнялось прямыми лабораторными испытаниями по пробам, отобранными при бурении геологических скважин (см. рис. 3, б).

На рассматриваемом участке земляное полотно сложено суглинком с числом пластичности 0,10. Для данного грунта по методике, изложенной в [12], в лабораторных условиях

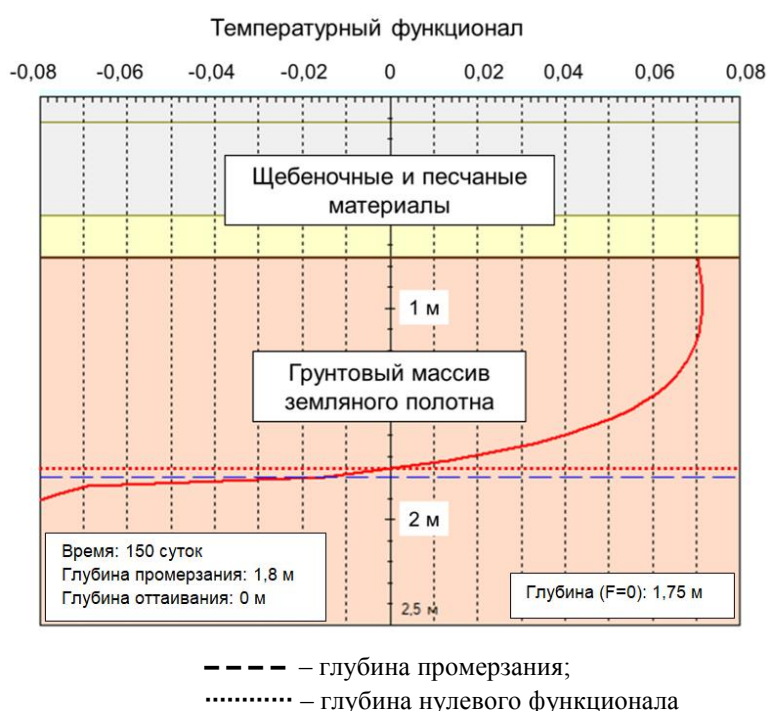


Рис. 2. График температурного функционала на начало марта в программном модуле Freeze-1a

а)



б)



Рис. 3. Элементы системы мониторинга водно-теплового режима участка эксплуатируемого земляного полотна:

а – термометрическая скважина; б – геологическая скважина, пройденная ручным буром

получена функциональная зависимость (2) начала криогенного влагопереноса:

$$f(t) = 0,15e^{0,67t}. \quad (4)$$

Верификация заключалась в сопоставлении расчетных значений уровня нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса в земляном полотне, определенных по описанному выше алгоритму, и натурных измерений глубины начала интенсивного криогенного влагонакопления. Дополнительно сопоставлялись расчетные и фактически полученные температурные поля по глубине промерзания.

Натурные измерения глубины начала интенсивного криогенного влагонакопления и температурного поля в зоне промерзания для выбранного участка эксплуатируемого земляного полотна, а также расчеты в программном комплексе выполнены при начальной стадии промерзания грунта (расчетный период с 11.12.2021 по 20.12.2021), промежуточной (с 12.01.2022 по 30.01.2022) и заключительной (с 01.03.2022 по 10.03.2022).

Примеры результатов расчета изменения температурного поля и температурного функционала по глубине в программном модуле Freeze-1a для периода с 12.01.2022 по 30.01.2022 представлены на рис. 4, а и 5, а соответственно. Результаты натурных измерений температурного поля и относительной влажности (отношение весовой влажности W к влажности на границе текучести W_L) грунтов по глубине представлены в виде графиков на

рис. 4, б и 5, б соответственно. При этом зона начала интенсивного криогенного влагонакопления по результатам натурных измерений соотнесена с зоной начала превышения относительной влажности исходных (осенних) значений.

Для всех рассмотренных периодов расчетные и натурные данные сведены в таблицу. Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет сделать вывод о корректности предложенного подхода к определению уровня нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса. Кроме того, показали достаточную сходимость расчетные и фактические значения глубин промерзания грунтов земляного полотна, что говорит об адекватности модели одномерного температурного поля, определяемого с использованием программного комплекса Freeze-1.

Таким образом, предложенный подход к определению уровня нижней границы зоны криогенного влагопереноса в глинистых грунтах может быть рекомендован к использованию при решении многих инженерных задач, связанных с регулированием влагонакопления в грунтовых массивах, как на стадии эксплуатации, так и на стадии проектирования новых сооружений. В частности, для определения оптимальной глубины расположения водонепроницаемых прослоек (геомембран), защищающих зону промерзания земляного полотна от миграции влаги близко расположенных грунтовых вод.

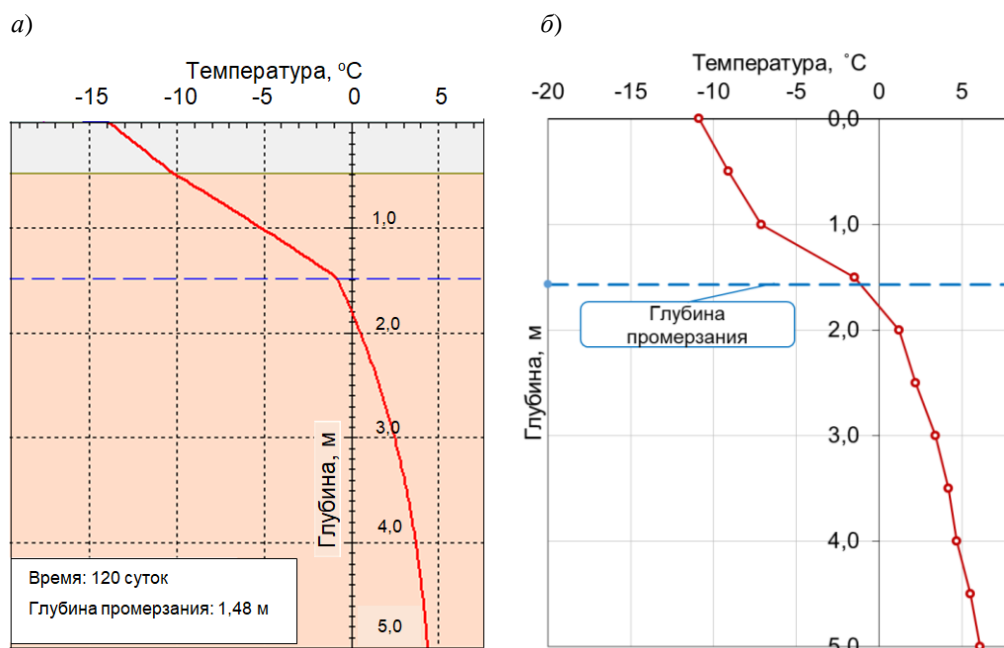


Рис. 4. Изменение температуры грунта по глубине земляного полотна:
 а – по результатам расчета в программном модуле Freeze-1a; б – по результатам натурных измерений

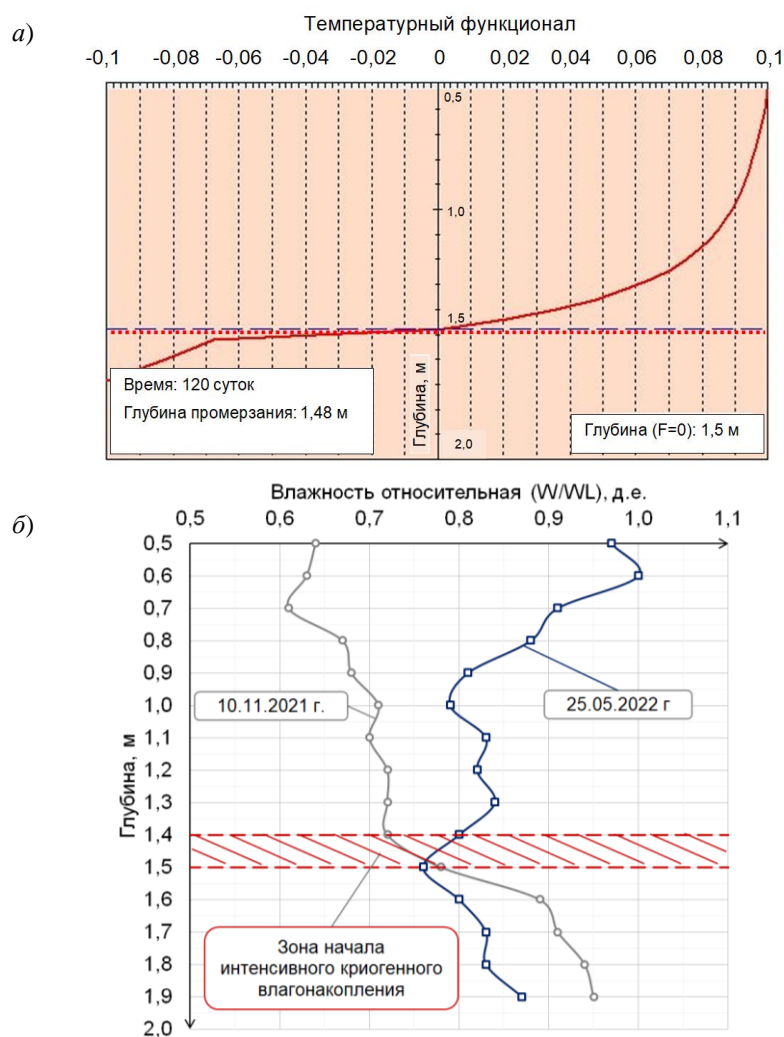


Рис. 5. Расчетные и натурные данные для периода с 12.01.2022 по 30.01.2022:
 а – график температурного функционала (Freeze-1a); б – графики изменения относительной
 влажности грунта в зависимости от глубины

**Результаты расчетов и натурные данные по глубине промерзания грунтов
и глубине начала криогенного влагопереноса в земляном полотне, м**

Период	Результаты расчетов в программном модуле Freeze-1a		Натурные измерения	
	Глубина промерзания грунтов земляного полотна	Уровень нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса	Глубина промерзания грунтов земляного полотна	Глубина начала интенсивного криогенного влагонакопления
С 11.12.2021 по 20.12.2021	0,92	0,94	1,00	0,90–1,00
С 12.01.2022 по 30.01.2022	1,48	1,50	1,55	1,40–1,50
С 01.03.2022 по 10.03.2022	1,88	1,74	1,80	1,70–1,80

Заключение

Сформулирован двухпараметрический критерий криогенного влагопереноса в глинистых грунтах с использованием температурного функционала на поле значений температуры грунта и ее градиента.

Предложен алгоритм определения уровня нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса в промерзающем грунтовом массиве земляного полотна с использованием

двухпараметрического критерия на базе программного комплекса Freeze-1.

Верификация предложенного алгоритма, выполненная путем мониторинга водно-теплого режима на участке эксплуатируемого земляного полотна, показала корректность вышеописанного подхода к определению уровня нижней границы зоны интенсивного криогенного влагопереноса.

Список источников

1. Золотарь И. А., Пузаков Н. А., Сиденко В. М. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. Москва : Транспорт, 1971. 416 с.
2. Орлов В. О., Дубнов Ю. Д., Меренков Н. Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1977. 184 с.
3. ЦПИ-24. Технические указания по устранению пучин и просадок железнодорожного пути : утверждены Департаментом пути и сооружений МПС 29.05.1997. Москва : Транспорт, 1998. 76 с.
4. Исаков А. Л., Лаврова А. Ю. Расчетное обоснование использования пенополистирола в конструкции дорожной одежды автомобильных дорог // Политранспортные системы : материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке», Новосибирск, 20–21 ноября 2014 г. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2015. С. 163–167. EDN TYXJQD.
5. Principles for positioning a capillary barrier made of injected mortar in the earth bed / D. A. Razuvaev, A. L. Lanis, M. G. Chakhlov, E. I. Nagaev // E3S Web of Conf. 2023.0020. Vol. 402. P. 12010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340212010>.
6. Ананян А. А. Исследование процессов перемещения влаги и образование сегрегационного льда в замерзающих и мерзлых горных породах // Труды Гидропроекта. Москва, 1960. Сб. 3. С. 121–148.
7. Чеверев В. Г. Физико-химическая теория формирования массообменных и тепловых свойств криогенных грунтов : специальность 04.00.07 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Чеверев Виктор Григорьевич. Москва, 1999. 373 с.
8. Кудрявцев С. А., Сахаров И. И., Парамонов В. Н. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечно-элементные расчеты). Санкт-Петербург : Георекострукция, 2014. 262 с.
9. Чистотинов Л. В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах. Москва : Наука, 1973. 142 с.
10. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. 536 с.
11. Геворкян С. Г. Влияние температуры замораживания грунта на процесс его морозного пучения // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2018. № 8. С. 23–27. EDN UVJHGQ.
12. Разуваев Д. А., Чахлов М. Г. Экспериментальное определение двухпараметрического температурного критерия начала интенсивного криогенного влагопереноса в различных видах глинистых грунтов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1. С. 35–44. DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_35.
13. Методика назначения противопучинных мероприятий и выбора их параметров на железных и автомобильных дорогах на базе программного комплекса «Freeze-1». URL: <http://freeze-1.stu.ru/index.htm> (дата обращения: 25.03.2024).
14. Modeling the operation of road pavement during the thawing of soil in the subgrade of highways / A. Isakov, D. Razuvaev, I. Gudkova, M. Chakhlov // MATEC : Web of Conferences. Novosibirsk : EDP Sciences, 2018. Vol. 239. P. 05008. DOI 10.1051/matecconf/201823905008. EDN WTVMML.
15. ГОСТ 25358–2020. Грунты. Метод полевого определения температуры : (с поправкой). Москва : Стандартинформ, 2021. 11 с.

References

1. Zolotar I. A., Puzakov N. A., Sidenko V. M. Water-thermal regime of subgrade and pavement. Moscow: Transport; 1971. 416 p. (In Russ.).
2. Orlov V. O., Dubnov Yu. D., Merenkov N. D. Frost heaving of freezing soils and its impact on the foundations of structures. Leningrad: Stroyizdat, Leningrad Branch; 1977. 184 p. (In Russ.).
3. Technical guidelines for eliminating potholes and depressions on railway tracks. (Approved by the Department of Track and Structures of the Ministry of Railways on 29.05.1997). Moscow: Transport; 1998. 76 p. (In Russ.).
4. Isakov A. L., Lavrova A. Yu. Calculation justification for the use of polystyrene foam in the design of road pavement for highways. *Polytransport Systems: Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference within the Year of Science Russia – EU Scientific Problems of Implementing Transport Projects in Siberia and the Far East, Novosibirsk, November 20–21, 2014*. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Transport University; 2015. P. 163–167. (EDN TYXJQD). (In Russ.).
5. Razuvaev D. A., Lanis A. L., Chakhlov M. G., Nagaev E. I. Principles for positioning a capillary barrier made of injected mortar in the earth bed. *E3S Web of Conf.* 2023.0020. Vol. 402. P. 12010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340212010>.
6. Ananyan A. A. Study of moisture migration processes and formation of segregation ice in freezing and frozen mountain rocks. *Proceedings of Hydropower*. Moscow; 1960. Vol. 3. P. 121–148. (In Russ.).
7. Cheverev V. G. Physico-chemical theory of formation of mass exchange and thermal properties of cryogenic soils. Speciality 04.00.07 Engineering Geology, Permafrost and Soil Science. Doctoral dissertation in Geological and Mineralogical Sciences. Cheverev Victor Grigorievich. Moscow; 1999. 305 p. (In Russ.).
8. Kudryavtsev S. A., Sakharov I. I., Paramonov V. N. Freezing and thawing of soils (practical examples and finite element calculations). Saint Petersburg: Georeconstruction; 2014. 262 p. (In Russ.).
9. Chistotinov L. V. Moisture migration in freezing unsaturated soils. Moscow: Nauka; 1973. 142 p. (In Russ.).
10. Lykov A. V., Mikhaylov Yu. A. Theory of heat and mass transfer. Moscow: Leningrad: Gosenergoizdat; 1963. 536 p. (In Russ.).
11. Gevorkyan S. G. The influence of soil freezing temperature on the process of its frost heaving. *Actual Problems of Humanities and Natural Sciences*. 2018;(8):23–27. (EDN UVJHGO). (In Russ.).
12. Razuvaev D. A., Chakhlov M. G. Experimental determination of the two-parameter temperature criterion for the onset of intense cryogenic moisture transfer in clayey soils of the roadbed. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2024;(1):35–44. (In Russ.). DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_35.
13. Methodology for determining anti-heave measures and selecting their parameters for railways and roads based on the Freeze-1 software package. (In Russ.). URL: <http://freeze-1.stu.ru/index.htm>.
14. Isakov A., Razuvaev D., Gudkova I., Chakhlov M. Modeling the operation of road pavement during the thawing of soil in the subgrade of highways. *MATEC Web of Conferences, Novosibirsk, May 16–19, 2018*. Novosibirsk: EDP Sciences; 2018. Vol. 239. P. 05008. DOI 10.1051/matecconf/201823905008. EDN WTVMML.
15. GOST 25358–2020 Soils. Field method for determining temperature (with Amendment). Moscow: Standartinform; 2021. 11 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Д. А. Разуваев – заведующий научно-исследовательской лабораторией «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент.

А. Л. Исаков – заведующий кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.

М. Г. Чахлов – научный сотрудник Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

D. A. Razuvaev – Head of the Quality Control of Pavements and Subgrades Research Laboratory, Siberian Transport University, Candidate of Engineering, Associate Professor.

A. L. Isakov – Head of the Survey, Design and Construction of Railways and Roads Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.

M. G. Chakhlov – researcher, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 26.04.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 16.05.2024.

The article was submitted 26.04.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 16.05.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 625.723:528-18/-79
doi 10.52170/1815-9265_2024_69_106

Совершенствование метода измерения продольной ровности покрытий автомобильных дорог

Владимир Васильевич Щербаков¹, Сергей Сергеевич Акимов²✉

^{1,2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ vvs@stu.ru

² ak_s_s@mail.ru✉

Аннотация. Показатель «ровность» покрытия автомобильных дорог – один из ключевых при оценке технического состояния дорог, обеспечения безопасности, анализе появления дефектов и прогнозе технического состояния. Существуют не менее десяти различных способов определения показателя «ровность». К наиболее высокоточным относится метод амплитуд, в основе которого лежит геометрическое нивелирование с шагом нивелирования 5 м. Метод, при всех достоинствах, имеет недостатки, одним из главных является фиксированная длина отрезка пути (5 м), на котором определяется амплитуда неровности. Все длины неровности менее 5 м оцениваются недостоверно, что приводит к ошибкам в оценке качества покрытия дорог. При уменьшении шага нивелирования многократно увеличивается трудоемкость измерений. Применение лазерных сканеров и других измерительных систем на базе ГНСС не обеспечивает точность измерений. Системы измерений, в основе которых лежит измерение углов наклона подвижного объекта с использованием инклинометров, акселерометров, гироскопических систем, включая инерциальные системы, подвержены влиянию линейных ускорений, что влияет на точность измерений.

Сущность предлагаемых решений заключается в измерении уклонов без использования непрерывной коррекции пространственного положения оси гироскопа относительно горизонта. Усовершенствованный метод, в основе которого лежит измерение продольного угла наклона подвижного объекта (ходовой тележки), пройденного расстояния и вычисление высотных отметок путем интегрирования данных, реализован на базе УДК «Ровность». Данный метод позволяет определять неровности покрытия автомобильных дорог с точностью около 1 мм, повторяемость из различных циклов измерения в пределах 1 мм.

Ключевые слова: автомобильные дороги, покрытие автомобильной дороги, продольная ровность, амплитуды неровности, методы измерения ровности, геометрическое нивелирование, гироскопические системы

Для цитирования: Щербаков В. В., Акимов С. С. Совершенствование метода измерения продольной ровности покрытий автомобильных дорог // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 106–114. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_106.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Improving the method for measuring the longitudinal evenness of road surfaces

Vladimir V. Shcherbakov¹, Sergey S. Akimov²✉

^{1,2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ vvs@stu.ru

² ak_s_s@mail.ru✉

Abstract. The *evenness* indicator of road surfaces is one of the key indicators when assessing the technical condition of roads, ensuring safety, analyzing the occurrence of defects and forecasting the technical condition. At least ten different ways to determine the *evenness* indicator exist. The amplitude method is one of the most highly accurate; it is based on geometric leveling with a leveling step of 5 m. The method, with all its advantages, has disadvantages; one of the main ones is the fixed length of the path segment (5 m) on which the amplitude of the unevenness is determined. All uneven lengths less than 5 m are estimated unreliably, which leads to errors in assessing the quality of road surfaces. The complexity of measurements increases many times as the leveling step decreases. The use of laser scanners and other Global Navigation Satellite System-based measuring systems does not ensure measurement accuracy. Measurement

systems based on measuring the inclination angles of a moving object using inclinometers, accelerometers, gyroscopic systems, including inertial systems, are affected by linear accelerations, which affects the accuracy of measurements.

The essence of the proposed solutions is to measure slopes without using continuous correction of the spatial position of the gyroscope axis relative to the horizon. An improved method, which is based on measuring the longitudinal angle of inclination of a moving object (undercarriage), the distance traveled and calculating elevations by integrating data, is implemented on the basis of the Universal Decimal Classification *Evenness*. This method allows you to determine the unevenness of road surfaces with an accuracy of about 1 mm, repeatability from different measurement cycles is within 1 mm.

Keywords: highways, road surface, longitudinal evenness, unevenness amplitudes, methods for measurement evenness, geometric leveling, gyroscopic systems

For citation: Shcherbakov V. V., Akimov S. S. Improving the method for measuring the longitudinal evenness of road surfaces. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(69):106–114. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_106.

Введение

Показатель «ровность» (здесь и далее под ним понимается продольная ровность) – один из наиболее важных диагностических показателей, которые используются как для оценки безопасности движения, так и для анализа технического состояния дорог, включая причины появления дефектов, прогноза состояния покрытия автомобильных дорог и т. д. [1, 2].

Оценка качества состояния автомобильных дорог, например при реализации национального проекта «Безопасные качественные дороги» [3], выполняется в соответствии с требованиями приказа Федерального дорожного агентства (Росавтодор) № 155 от 30.07.2021 [4]. При формировании официальной статистики для мониторинга достижений целей национального проекта оценка выполняется только по двум важнейшим критериям: продольной ровности и наличию дефектов.

Приемка в эксплуатацию дорог, строительство (ремонт) которых закончено, выполняется путем сравнения нормативных и проектных данных с фактическими параметрами, полученными при приемке. При оценке качества строительства (ремонта) анализируются многие характеристики: расстояние видимости, характеристики кривых, продольная ровность, продольный и поперечный профиль, модуль упругости и десятки других. Поскольку в результаты мониторинга по национальному проекту «Безопасные качественные дороги» [3] включен показатель «ровность», большое значение придается именно ему, влияющему как на безопасность движения, так и на прогноз технического состояния дорог. Поэтому требования к качеству определения данного показателя высокие. Кроме того, ровность определяется при диагностике и оценке состояния автомобильных дорог

для назначения ремонта, в процессе строительства (операционный контроль) и на участках автомобильных дорог, строительство (ремонт) которых закончено.

Материалы и методы исследования

Ровность определяется геодезическими методами и с использованием механических, электронных и оптических датчиков интегрального типа, например толчкомера ТХК, и многих других измерительных систем и методов оценки, в частности профилометров типа Dipstick 2000 и типответчиков (Response type road roughness meters – RTRRMs).

Интегральные методы измерения ровности обеспечивают ее определение на заданном участке дороги, например на 1 км. Единица измерения ровности (см/км) исключает возможность определения и анализа амплитуд и длин неровностей. При этом точность определения ровности значительно ниже точности, которую обеспечивают геодезические методы.

Отличия геодезических методов от интегральных являются принципиальными. Главным преимуществом геодезических методов является то, что это прямые методы, позволяющие определять величину (амплитуду) неровности и ее длину с привязкой к линейной координате [1].

Рассмотрим классический геодезический метод определения показателя «ровность» автомобильных дорог, который десятки лет успешно применяется на приемо-сдаточных объектах при строительстве новых дорог и капитальном ремонте существующих. Сущность метода заключается в определении высотных отметок или превышений с заданным шагом на фиксированном расстоянии от оси дороги или кромки проезжей части и расчете амплитуды неровности. Амплитуды неровно-

сти δ_i для каждого измерительного интервала L рассчитывают по известной формуле [5]:

$$\delta_i = \left| \frac{h_{i-k} + h_{i+k}}{2} - h_i \pm \Delta_i \right|, \quad (1)$$

где i – номер точки, для которой определяется отклонение (амплитуда неровности); h_{i-k} , h_{i+k} – условные превышения начальной и конечной точек заданного измерительного интервала L , м; $i-k$, $i+k$ – порядковые номера предыдущей и последующей точки; h_i – превышение точки, для которой определяют амплитуду неровности, м; Δ_i – поправка, учитывающая кривизну дороги при наличии вертикальной кривой с известным радиусом.

Значение Δ_i определяется по формуле

$$\Delta_i = \frac{L^2}{8R}, \quad (2)$$

где L – длина измерительного интервала пути для расчета поправки, м; R – радиус вертикальной кривой (величина, известная из проекта), м.

В соответствии с ГОСТ Р 56925–2016 [5] расстояние на измерительном интервале от i до $i-1$ составляет 5 м. Нивелирование покрытия автомобильных дорог выполняется с использованием нивелира и рейки нивелирной в соответствии с требованиями [5] (метод амплитуд), что обеспечивает определение амплитуды неровности в широком диапазоне длин от 10 до 40 м. Высотные отметки (превышения) таким образом определяются на коротких интервалах пути 5 м с высокой точностью, а расчет амплитуд неровностей выполняется для трех измерительных баз – 10, 20, 40 м, что обеспечивает определение показателя «ровность» в широком диапазоне, с высокой точностью и привязкой каждого измерения к строительному пикетажу.

Несмотря на все достоинства метода амплитуд, включая высокую точность определения амплитуд неровностей, существуют и недостатки, связанные с ограничениями, налагаемыми нормативными требованиями по обеспечению минимального интервала пути между смежными точками 5 м. В связи с этим неровности длиной менее 5 м не фиксируются и, соответственно, недостоверно оцениваются.

На рис. 1 показана схема определения амплитуды неровности покрытия автомобильной дороги с шагом нивелирования 5 м при наличии коротких длин неровности, менее нормативного шага съемки. Из рисунка видно, что неровность с амплитудой f на длине l (менее 5 м) при измерении может быть не зафиксирована, и, соответственно, при обработке данных и оценке качества покрытия по показателю «ровность» не будет учтена, что ограничивает достоверность оценки качества покрытия [1, 6].

Достоверность данных при использовании метода амплитуд можно значительно повысить при уменьшении шага нивелирования, например до 0,5–1 м. При этом трудозатраты возрастут многократно, а, учитывая большие объемы работ, практическое применение геодезических методов будет минимизировано или не востребовано.

Для создания эффективных методов определения ровности покрытия автомобильных дорог, очевидно, необходимо высотные отметки определять с высокой дискретностью для отображения микропрофиля и достоверного расчета амплитуд и длин неровностей. Современная измерительная техника позволяет это сделать с высокой эффективностью. К таким измерительным системам относятся лазерное сканирование [7], спутниковые приемники ГНСС.

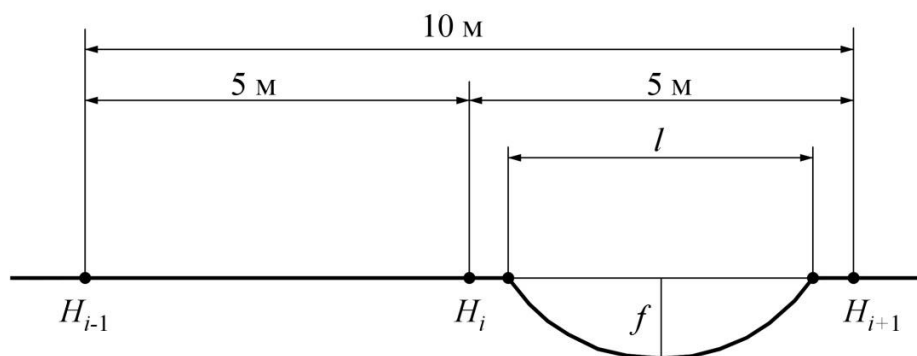


Рис. 1. Функциональные ограничения метода амплитуд в соответствии с ГОСТ Р 56925–2016

Результаты исследований по определению высотных отметок покрытия автомобильных дорог, проведенных авторами с использованием лазерного сканирования и измерительных систем на базе ГНСС, показали невозможность обеспечения приемлемой и соответствующей нормативным требованиям точности [8].

Эффективно применяются для определения микропрофиля, высотных отметок и показателя «ровность» измерительные системы, которые можно классифицировать как системы механического нивелирования [9]. Современные системы, в основе которых лежат принципы механического нивелирования, включающие измерения продольного угла наклона подвижного объекта и приращения пути (расстояния) одометром, их интегрирование и вычисление приращений высотных отметок для определения ровности, созданы на базе инклинометров, акселерометров и инерциальных систем, а также современных компьютеров и микроконтроллеров [10]. Схема реализации таких систем приведена на рис. 2.

Превышение между смежными точками вычисляют по формуле

$$h_j = |h_{j-1} + \sin \gamma_j L|, \quad (3)$$

где h_j – высота отметки рельефа, мм; j – порядковый номер точки микро nivelирования поверхности; h_{j-1} – предшествующая высота отметки рельефа, мм; γ – угол продольного микро nivelирования поверхности, град; L – шаг микро nivelирования поверхности, мм.

Амплитуды неровности по превышениям смежных точек h покрытия автомобильных дорог вычисляются по формуле (1).

Системы измерений, в основе которых лежит измерение углов наклона подвижного объекта с использованием инклинометров, акселерометров, гироскопических систем, включая инерциальные системы, подвержены влиянию

линейных ускорений. В системах пространственной ориентации, навигационных системах точность измерений пространственной ориентации подвижного объекта, например 3 угл. мин, является приемлемой. Для получения более высокой точности измерения углов наклона подвижного объекта минимизируется влияние динамики движения, например за счет равномерного движения и демпфирования в процессе измерений.

Измерительные системы такого типа применяются в настоящее время для контроля ровности на аэродромах. Скорость движения измерительных систем при определении ровности менее 1 км/ч. На аэродромах такие ограничения вполне приемлемы, а измерение на автомобильных дорогах со скоростью 0,5 км/ч при интенсивном движении не выполняется.

Исследования гироскопической техники, инерциальных систем, которые обладают преимуществом по отношению к инклинометрам и измерительным устройствам на базе акселерометров за счет высокой стабильности (свойство стабилизации) показали, что коррекция ухода оси гироскопа обеспечивает положение оси в плоскости горизонта, при этом наблюдаются периодические отклонения оси на определенную величину (например, 3 угл. мин) в процессе коррекции. В то же время волоконно-оптические или лазерные гироскопы, не подверженные влиянию динамических воздействий, позволяют измерять пространственное положение подвижных объектов, при этом на точность измерения влияет уход оси гироскопа с течением времени. Величина ухода зависит от типа гироскопа.

Наиболее высокую точность обеспечивают лазерные гироскопы. Стабильность (изменение скорости) ухода у волоконно-оптических гироскопов высокая. При коррекции ухода через заданные интервалы времени в статике и обра-

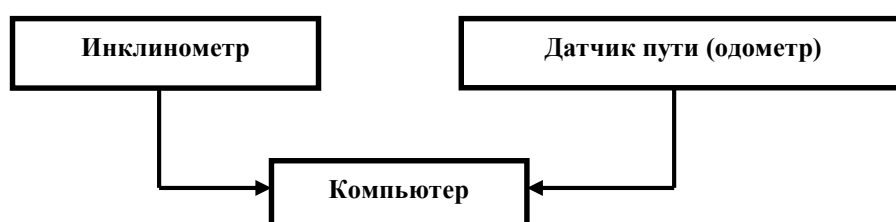


Рис. 2. Структурная схема устройства, созданного по схеме гиropolукомпас для определения показателя «ровность»

ботки данных после выполнения измерений можно исключить влияние динамики движения на точность измерения продольных уклонов подвижного объекта.

Результаты исследования и их обсуждение

Сущность предлагаемых решений по измерению продольных углов наклона подвижного объекта заключается в измерении уклонов без использования непрерывной коррекции пространственного положения оси гироскопа относительно горизонта. В инерциальных и гироскопических системах (гирогоризонт, гировертикаль) в процессе коррекции в силу различных причин, включая вращение Земли и линейные ускорения, в заданных интервалах времени фиксируются периодические отклонения от горизонта. При этом измерение угла наклона подвижного объекта относительно псевдогоризонта (с учетом ухода оси гироскопа) в постобработке, как показали исследования, значительно точнее. На рис. 3 показаны графики ухода оси гироскопа при непрерывной коррекции в реальном времени и коррекции через заданный интервал времени в статическом режиме измерений.

Из рис. 3 видно, что на коротких интервалах времени (интервалах пути) (от $i - k$ до $i + k$) ско-

рость ухода оси гироскопа стабильна, это обеспечивает определение превышений в точке i по отношению к смежным точкам с более высокой точностью чем при непрерывной коррекции.

На рис. 4 показана схема определения неровности на интервале от $i - 1$ до $i + 1$, расчет выполняется по формуле (1).

Интервалы времени для выполнения коррекции зависят от характеристик гироскопов (скорости ухода, изменения скорости ухода). В общем виде уход гироскопа определяется как

$$\Delta\alpha_t = Et, \quad (4)$$

где E – скорость ухода оси гироскопа, угл. мин/с; t – время, с.

Допустимый интервал времени Δt_δ для дискретной коррекции определяется исходя из заданных отклонений от горизонта при измерении продольных уклонов подвижного объекта и скорости ухода оси гироскопа E :

$$\Delta t_\delta = \frac{\Delta\alpha_\delta}{E}, \quad (5)$$

где $\Delta\alpha_\delta$ – допустимая величина отклонения оси гироскопа от горизонта.

С учетом того что по величине ухода оси гироскопа можно вычислить фактическую скорость ухода и, соответственно, поправку на уход для любой i -й точки, основное влия-

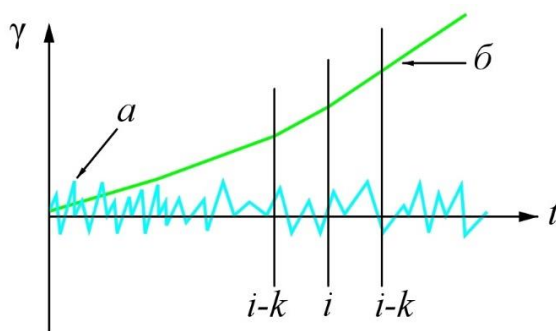


Рис. 3. График ухода оси гироскопа в зависимости от режима коррекции продольного уклона: a – непрерывный, в реальном времени; $б$ – дискретный, с постобработкой

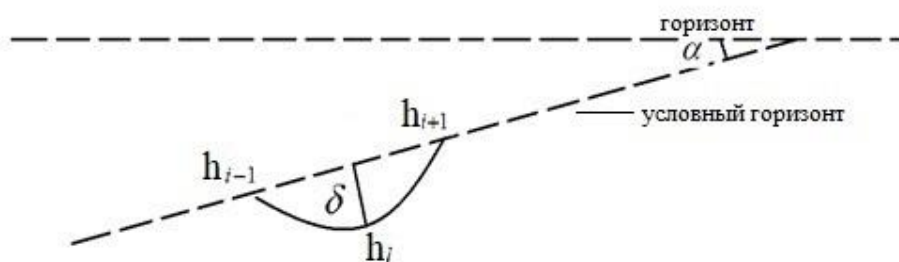


Рис. 4. Схема определения амплитуды неровности относительно условного горизонта

ние на точность будет оказывать для относительных величин, коротких отрезков пути (времени движения) нестабильность (изменение) скорости ухода ΔE , предельная величина которой приводится в паспорте волоконно-оптического гироскопа.

Интервал времени Δt зависит от нормативных требований к точности определения амплитуды неровности и, соответственно, от средней квадратичной ошибки определения превышений, вычисляемой по формуле

$$m_{\Delta h}^2 = \sin^2 \beta m_d^2 + (d \cos \beta)^2 \left(\frac{m_p''}{\rho''} \right)^2, \quad (6)$$

где β – продольный угол наклона ходовой тележки, угл. мин; m_d – средняя квадратичная ошибка измерения расстояния; d – расстояние, м; m_p – средняя квадратичная ошибка измерения продольного угла наклона ходовой тележки; $\rho = 3\,438$ угл. мин.

Показатель «ровность» – величина относительная, определяется для заданных нормативных отрезков пути (10, 20, 40 м), поэтому погрешность можно представить в относительных средних квадратичных ошибках:

$$\left(\frac{m_{\Delta h}}{\Delta h} \right)^2 = \left(\frac{m_d}{d} \right)^2 + (\operatorname{ctg} \beta)^2 \left(\frac{m_p''}{\rho''} \right)^2. \quad (7)$$

Разработанный прибор УДК «Ровность» полностью обеспечивает требования ГОСТ Р 56925–2016. Общий вид устройства с «ручным» перемещением для приемки дорог в эксплуатацию при закрытии движения приведен на рис. 5, а, для диагностики на не закрытых для движения участках дороги – на рис. 5, б.

а)



б)



Рис. 5. Внешний вид УДК «Ровность»:
а – с ручным приводом; б – на базе автомобильного прицепа

Устройство включает подвижный объект (ходовую тележку), расположенные на нем волоконно-оптический гироскоп, систему коррекции, датчик пути и компьютер.

Продольный угол γ и единичные приращения пути ΔL являются исходными для расчета текущего псевдопревышения h_i , определяемого по формуле

$$h_i = \sum_{i=1}^n \sin \gamma \Delta L, \quad (8)$$

где n – количество приращений пути; i – номер точки, для которой определяется превышение; γ – текущий продольный угол наклона тележки угл. мин; ΔL – единичное приращение пути, см.

Программное обеспечение позволяет выполнить расчет показателя «ровность» по высотным отметкам (методом амплитуд) для измерительной базы 10, 20, 40 м в соответствии с п. 5 ГОСТ Р 56925–2016 [5], а также произвести расчет по высотным отметкам значений амплитуд неровностей с учетом требований для измерения рейкой дорожной (п. 4 ГОСТ Р 56925–2016) и в соответствии с алгоритмом [12], определить международный индекс ровности (IRI). Главное окно программы показано на рис. 6.

Точность определения неровностей покрытия автомобильных дорог составляет около 1 мм, повторяемость из различных циклов измерения в пределах 1 мм. Точность измерений не зависит от изменений скорости движения, массы подвижного объекта, продольного профиля и колебаний температуры при выполнении измерений.

?	Шаг определения ровности			5 м	10 м	20 м	Интервал, м	Рейка, %	IRI, м/км
	Всего измерений			38893	38799	38565	0-100	0.0	1.6
	Количество измерений меньше (равно) допустимого			38849	38523	38060	100-200	0.0	1.6
				99.9%	99.3%	98.7%	200-300	0.0	1.6
	Количество измерений превышающих допуск			44	276	505	300-400	1.0	1.7
				0.1%	0.7%	1.3%	400-500	0.0	1.6
							500-600	3.0	1.9
							600-700	3.0	1.9
	Количество измерений не превышающих 1,5 допуск			44	276	490	700-800	1.5	1.8
				0.1%	0.7%	1.3%	800-900	0.0	1.6
	Количество измерений свыше 1,5 допуска			0	0	15	900-1000	0.0	1.6
				0.0%	0.0%	0.0%	1000-1100	3.5	1.9
	Максимальное отклонение в мм.			6мм	10мм	24мм	1100-1200	6.0	2.1
	Вывод:			по методу амплитуд			по рейке		
	(Соответствие проверяемого участка дороги требованиям ГОСТ и СНиП)			НЕТ			ДА		
							ДА		

4. Методика формирования официальной статистической информации, необходимой для мониторинга достижения показателей национального проекта «Безопасные качественные дороги»: утверждена приказом Федерального дорожного агентства от 30.07.2021 № 155. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
5. ГОСТ Р 56925–2016. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерения неровностей оснований и покрытий: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 мая 2016 г. № 370-ст. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
6. Щербаков В. В., Акимов С. С., Ефимов Н. В. Приборы для определения ровности покрытия на автомобильных дорогах // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2023. Т. 1, № 1. С. 184–190. DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-184-190.
7. Середович В. А., Алтынцев М. А., Егоров А. К. Determination of road surface evenness index based on mobile laser scanning // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22, № 3. С. 33–44.
8. Лушников Н. А., Лушников П. А. О точности измерений продольной ровности дорожных покрытий различными методами // Дороги и мосты. 2019. № 2 (42). С. 79–89.
9. Большаков В. Д., Левчук Г. П. Справочник геодезиста. Москва: Недра, 1985. 455 с.
10. Патент № 2373323 С1 Российская Федерация, МПК В01С 23/07. Устройство для оценки ровности поверхности аэродромного покрытия: № 2008113525/03: заявлен 07.04.2008: опубликован 20.11.2009 / Низовой А. В., Луканов Н. И.; патентообладатели Низовой А. В., Луканов Н. И.
11. Щербаков В. В., Барсук М. Н. Диагностика автомобильных дорог по геометрическим параметрам с использованием ГНСС // Геодезия и картография. 2008. № 6. С. 55–57.
12. Руководство по оценке ровности дорожных покрытий толчкометом: утверждено распоряжением Росавтодора от 17.07.2002 № ОС-617-р. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

References

1. Shcherbakov V. V., Konkin A. V., Shcherbakov I. V., Kovaleva O. V. Modern instruments and methods for measuring the evenness of road pavements. *Roads and Bridges*. 2021;1(45):61–74. (In Russ.).
2. Uglov E. V., Tiraturyan A. N., Shamraev L. G. A modern approach to assessing the transport and operational indicators of highways of the state company *Russian Highways. CAD and GIS for Roads*. 2016;1(6):38–51. (In Russ.). DOI 10.17273/CADGIS.2016.1.7.
3. Passport of the national project. National Project *Safe Quality Roads*. (In Russ.). URL: <https://mintrans.gov.ru/file/495234>.
4. Methodology for generating official statistical information necessary for monitoring the achievement of indicators of the national project *Safe Quality Roads*: approved. by order of the Federal Road Agency No. 155 dated 30.07.2021. Access from the reference and legal system ConsultantPlus. (In Russ.).
5. GOST R 56925–2016. Automobile roads and airfields. Methods of measuring the unevenness of bases and coatings. Approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from 23.05.2016 № 370-st. Access from the reference and legal system ConsultantPlus. (In Russ.).
6. Shcherbakov V. V., Akimov S. S., Efimov N. V. Devices for determining the evenness of road surface. *Interexpo Geo-Siberia*. 2023;1(1):184–190. (In Russ.). DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-184-190.
7. Seredovich V. A., Altyntsev M. A., Egorov A. K. Determination of the road surface evenness index based on mobile laser scanning data. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*. 2017;22(3):33–44. (In Russ.).
8. Lushnikov N. A., Lushnikov P. A. About the accuracy of measurements of road pavements longitudinal evenness by various methods. *Roads and Bridges*. 2019;2(42):79–89. (In Russ.).
9. Bolshakov V. D., Levchuk G. P. Surveyor's Handbook. Moscow: Nedra; 1985. 455 p. (In Russ.).
10. Nizovoy A. V., Lukanov N. I. Patent No. 2373323 C1 Russian Federation, MPK B01C 23/07. Device for assessment of aerodrome coat surface evenness: No. 2008113525/03. Applied 07.04.2008. Published 20.11.2009. Applicant Nizovoy A. V., Lukanov N. I. Patent holders A. V. Nizovoy, N. I. Lukanov. 13 p. (In Russ.).
11. Shcherbakov V. V., Barsuk M. N. The diagnostics of roads on the geometric parameters using GNSS. *Geodesy and Cartography*. 2008;6:55–57. (In Russ.).
12. Guide to assessing the evenness of road surfaces using a push meter. Approved by order of Rosavtodor dated 17.07.2002 No. OS-617-r. Access from the reference and legal system ConsultantPlus. (In Russ.).

Информация об авторах

В. В. Щербаков – профессор кафедры «Инженерная геодезия» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

С. С. Акимов – инженер-технолог НИЛ «Диагностика дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. V. Shcherbakov – Professor of the Engineering Geodesy Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

S. S. Akimov – process engineer of the Diagnostics of Road Surfaces and Subgrade Research Laboratory, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 21.05.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 28.05.2024.

The article was submitted 21.05.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 28.05.2024.

Информация для авторов

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

2. Статья предоставляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (гарнитура Times New Roman, кегль 14 pt; поля: верхнее и нижнее – 20, левое – 30, правое – 10 мм). Файл с текстом статьи должен быть назван фамилией автора (например: Иванов.doc).

3. Статья должна содержать:

- тип статьи (например, научная, обзорная, рецензия);
- УДК;
- название статьи;
- фамилию, имя и отчество каждого автора, место его работы/учебы, город, страну, ученую степень, звание, должность;
- аннотацию на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- библиографический список на русском и английском языках.

4. Список источников составляется в порядке упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Список должен содержать не менее 10 источников, из них собственных статей должно быть не более 30 %.

5. Графический материал должен быть выполнен в графических редакторах, поддерживающих векторную и растровую графику. Иллюстрации должны быть четкими, все подписи на рисунке должны хорошо читаться и иметь расшифровку. Если в тексте есть фотография, отсканированный рисунок, то они обязательно должны быть представлены также отдельным файлом в исходном графическом формате (например: jpeg, tiff).

6. Статья для опубликования в журнале и заявка отправляются по адресу: vestniksgups@sibgups.ru.

7. В редакцию предоставляются оригиналы документов: экспертное заключение о возможности опубликования статьи, статья и заявка.

8. Публикация статей в журнале бесплатная.

Более подробную информацию по вопросам опубликования статей и размещения другой информации в журнале можно найти на сайте издания.



www.stu.ru/science



vestniksgups@sibgups.ru



+7 383 328-04-36



630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук,
191, корп. 3, комн. 307



Главный редактор *А. Л. Манаков*
Заместитель главного редактора *А. Д. Абрамов*
Заместитель главного редактора *С. В. Карасев*
Ответственный секретарь *М. С. Галай*
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*
Редактор *Е. Е. Рыжкова*
Корректор *А. А. Игумнов*
Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*
Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Учредитель
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

Адрес редакции
630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, корп. 3, комн. 307.
Телефон/факс: (383) 328-04-36.
E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

Адрес издателя
630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Телефон/факс: (383) 328-03-81.
E-mail: bvu@stu.ru

Подписано в печать 19.06.2024. Дата выхода в свет 21.06.2024
Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 13,6 уч.-изд. л., 14,5 усл.-печ. л. Заказ № 3909

Цена свободная

Отпечатано в издательстве СГУПС.
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
Тел. (383) 328-03-81; e-mail: bvu@stu.ru



Издательство Сибирского государственного
университета путей сообщения

ISSN 1815-9265
Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения
2024. № 2 (69). 1–116