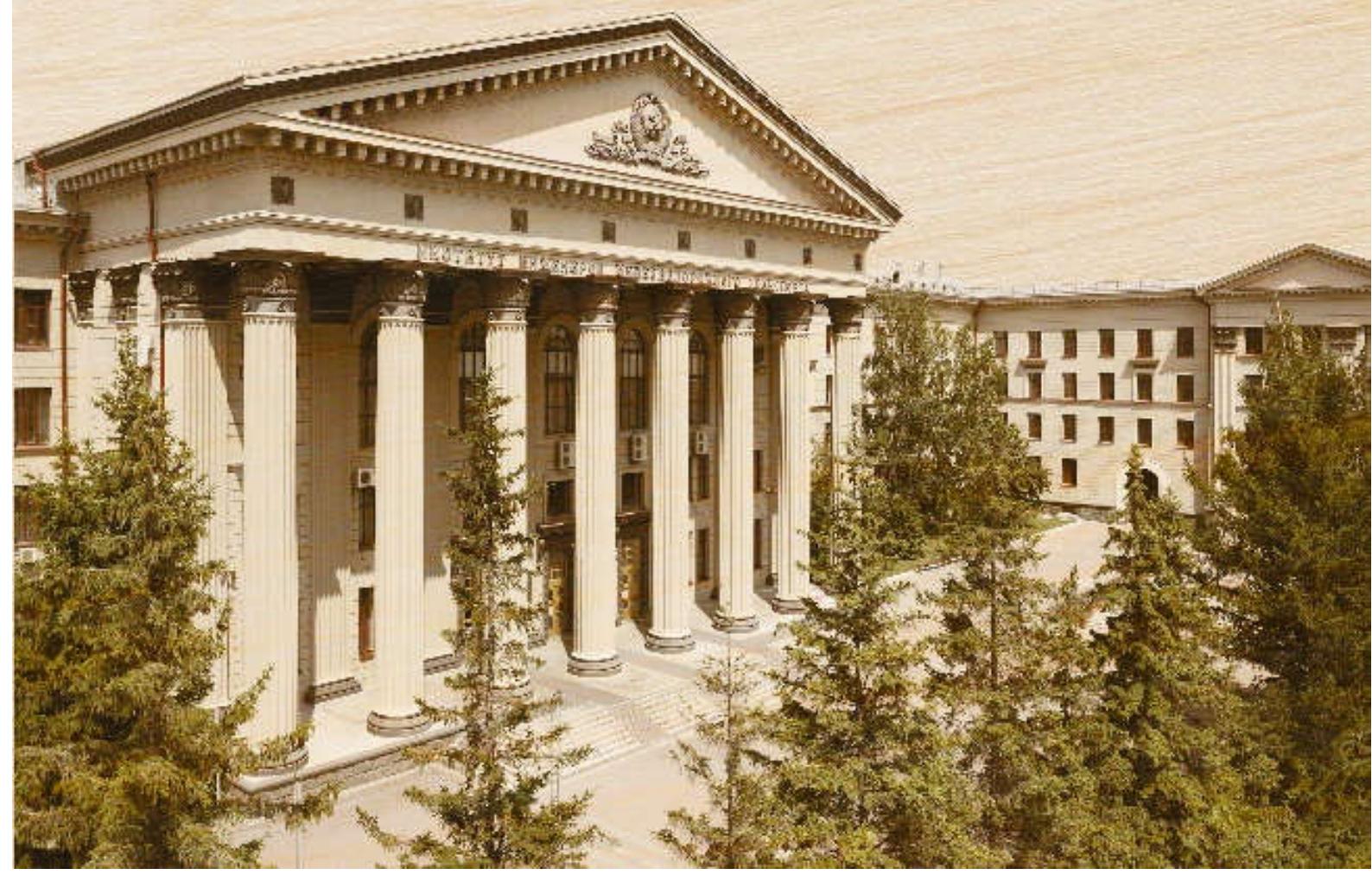


ISSN 1815–9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 1 (64). 2023 161



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

Карпушенко 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

Редакторы: Е. Е. Рыжкова, А. О. Елесина, Ю. В. Печенкина

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. Ilinsky, 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. Shwartsfeld, Doctor of Engineering, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

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

English Text Reviewer

I. I. Stepachkova, Senior Lecturer

Text Reviewers **E. E. Ryzhkova, A. O. Elesina, Yu. V. Pechenkina**

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

Layout Designer **Yu. V. Bortsova**

Cover Desinger **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: vestnik.stu@yandex.ru

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

ISSN: 1815-9265

**Вестник
Сибирского государственного
университета путей сообщения**

Научно-теоретический
журнал

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и на соискание ученой степени доктора наук, по группам научных специальностей 05.22.00 «Транспорт» и 05.23.00 «Строительство и архитектура», а также по специальности 05.02.22 «Организация производства (в отраслях транспорта)»

№ 1 (64) · 2023 · ЯНВАРЬ – МАРТ · 16+

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

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

Карпущенко Н. И., Ардышев И. К. Новые проблемы содержания бесстыкового пути на особогрузонапряженных участках	5
Гладунов В. А., Бондаренко Е. М. Выбор оптимальных логистических схем поставок товаров из Китая в Российскую Федерацию при использовании контейнеров	15
Трушин Н. Н. Кинематическая схема силовой гидропередачи для железнодорожных машин	24
Бурдяк П. С., Калидова А. Д. Определение перерабатывающей способности мест погрузки, оборудованных вагоноопрокидывателями для работы в зимних условиях	35
Гришикова Д. Ю. Определение перерабатывающей способности контейнерного терминала	44
Бессоненко С. А., Гунбин А. А., Климов А. А., Корниенко К. И., Ольгейзер И. А., Суханов А. В. Распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов на сортировочных горках	52
Ковалева Н. А., Хасиев А. И., Мамаев Т. Э. Определение параметров качественной трансформации железнодорожной инфраструктуры в городе	62
Попова Н. Б., Калидова А. Д., Кутень И. А., Швецов П. Г. Оценка эффективности внедрения систем контроля технического состояния железнодорожного переезда	74
Хабаров В. И., Петров С. М., Макаров Р. И. Решение локальных проблем адаптации транспортной инфраструктуры в условиях развития крупного города и его агломерации	85

Строительство и архитектура

Холодов П. Н., Подвербный В. А. Моделирование выправки железнодорожного пути в процессе эксплуатации	93
Величко Д. В., Карюкин М. А. Анализ структуры технико-экономических затрат по видам восстановления целостности плети бесстыкового пути	102
Попов А. М., Самошкин А. С., Тихомиров В. М. Методы исследования взаимодействия арматуры с бетоном. Часть 2. Численное моделирование	109

The Siberian Transport University Bulletin

A scientific journal

Included in the List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of candidate's thesis and doctoral thesis should be published in scientifically oriented groups 05.22.00 "Transport" and 05.23.00 "Construction and Architecture", as well as in the speciality 05.02.22 "Industrial engineering (in transport industry)"

Nº 1 (64) · 2023 · January – March · 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

<i>N. I. Karpuschenko, I. K. Ardynshev.</i> New problems of continuously welded rail track maintenance in high traffic areas	5
<i>V. A. Gladunov, E. M. Bondarenko.</i> The choice of optimal logistics schemes for the supply of goods from China to the Russian Federation using containers.....	15
<i>N. N. Trushin.</i> Hydraulic power transmission kinematic layout for railway vehicles.....	24
<i>P. S. Burdyak, A. D. Kalidova.</i> Determination of the processing capacity of loading sites equipped with car dumpers for operation in winter conditions	35
<i>D. Yu. Grishkova.</i> Determination of the processing capacity of a container terminal	44
<i>S. A. Bessonenko, A. A. Gunbin, A. A. Klimov, K. I. Kornienko, I. A. Olgeyzer, A. V. Sukhanov.</i> Probability distributions of specific resistance to the movement of cuts on gravity humps	52
<i>N. A. Kovaleva, A. I. Khashev, T. E. Mamaev.</i> Determination of qualitative transformation parameters of the railway infrastructure in the city	62
<i>N. B. Popova, A. D. Kalidova, I. A. Kuten, P. G. Svetsov.</i> Evaluating the effectiveness of introducing technical condition monitoring systems for railway crossings	74
<i>V. I. Khabarov, S. M. Petrov, R. I. Makarov.</i> Solving local problems of transport infrastructure adaptation in the development of a large city and its agglomeration	85

Building and Architecture

<i>P. N. Kholodov, V. A. Podverbnyy.</i> Modeling of railway track alignment during operation	93
<i>D. V. Velichko, M. A. Karyukin.</i> Technical and economic costs structure analysis by types of the continuous welded rails length integrity restoration	102
<i>A. M. Popov, A. S. Samoshkin, V. M. Tikhomirov.</i> Research methods of interaction of reinforcement with concrete. Part 2. Numerical models	109

ТРАНСПОРТ

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 5–14.
The Siberian Transport University Bulletin. 2023. No. 1 (64). P. 5–14.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 625.143.482
doi 10.52170/1815-9265_2023_64_5

Новые проблемы содержания бесстыкового пути на особогрузонапряженных участках

Николай Иванович Карпушенко¹, Илья Константинович Ардышев^{2✉}

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

¹ kni@stu.ru

² ardyshev.ilya@ya.ru✉

Аннотация. В статье проанализировано состояние и дана оценка устойчивости бесстыкового железнодорожного пути. Эксплуатация бесстыкового пути на отечественных железных дорогах показала высокую эффективность, чему способствовал ряд конструктивных решений (применение рельсов повышенного качества с дифференцированным термоупрочнением, надежных струнобетонных шпал, щебеночного балласта из твердых горных пород, шурупно-дюбельных скреплений, в том числе подкладочных). Эти факторы создают необходимые условия для обеспечения безопасного движения поездов.

Рассмотрено воздействие двухсекционных электровозов постоянного тока 2ЭС10 «Гранит» на путь в части оценки продольных и поперечных сил. Анализ состояния путевой инфраструктуры на участках обращения новых электровозов выявил еще одну проблему – рост дефектности рельсовых плетей.

Изучена проблема интенсивного роста числа мест временного восстановления плетей бесстыкового пути из-за установления жесткого температурного регламента ликвидации таких мест, что способствовало их интенсивному повсеместному накоплению. Представлен анализ динамики развития мест временного восстановления плетей бесстыкового пути с 2000 по 2020 г.

Оценка состояния балластной призмы на сети железных дорог показала, что при наработке тоннажа от 0 до 250 млн т груза брутто наибольшее количество повреждений призмы вызвано выплесками длиной от 6 до 10 м, что свидетельствует о наличии проблемы устранения локальных грязевых выплесков.

Рассмотрены действующая в настоящее время методика контроля и оценки состояния бесстыкового пути температурно-напряженного типа, а также мероприятия, обеспечивающие устойчивость бесстыкового пути в зависимости от его состояния.

Ключевые слова: бесстыковой путь, комплексная оценка, выброс бесстыкового пути, параметры оценки устойчивости

Для цитирования: Карпушенко 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. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_5.

TRANSPORT

Original article

New problems of continuously welded rail track maintenance in high traffic areas

Nikolay I. Karpuschenko¹, Ilya K. Ardyshев^{2✉}

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

¹ kni@stu.ru

² ardyshev.ilya@ya.ru✉

Abstract. The paper analyzes the state and evaluates the continuously welded rail track stability. The operation of a continuously welded rail track (CWR) on domestic railways has shown highly effective results, which is facilitated by a number of design solutions (the use of high-quality rails with differentiated thermal strengthening, reliable string-concrete sleepers, crushed stone ballast from hard rocks, screw-dowel fastenings, including lining ones). These factors create all necessary conditions for ensuring the safe movement of trains.

The impact of two-section DC electric locomotives 2ES10 Granit on the track in terms of evaluating the longitudinal and transverse forces is considered. An analysis of the state of the track infrastructure in the areas of circulation of new electric locomotives revealed another problem - an increase in the defectiveness of rails.

The problem of intensive growth in the number of places for temporary restoration of CWR due to the establishment of a strict temperature regulation for the elimination of places for temporary restoration of defective rails, which contributed to their intensive widespread accumulation, was studied. An analysis of the development dynamics of places for temporary CWR restoration from 2000 to 2020 is given.

An assessment of the ballast prism state on the railway network showed that when the tonnage is operating from 0 to 250 millions of gross cargo tons, the greatest number of damage to the prism is caused by slashes with a length of 6 to 10 meters that indicates the presence of a problem in eliminating local mud splashes.

The current methods for calculating the CWR stability of a temperature-stressed type, as well as measures that ensure the CWR stability, depending on its state, are considered.

Keywords : continuously welded rail track, complex evaluation, CWR track buckling, stability assessment parameters

For citation: Karpuschenko N. I., Ardynshev I. K. New problems of continuously welded rail track maintenance in high traffic areas. The Siberian Transport University Bulletin. 2023;(64):5–14. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_5.

Введение

Эксплуатация бесстыкового пути на железных дорогах ОАО «РЖД» показала его высокую эффективность. Этому способствует ряд конструктивных решений: применение рельсов повышенного качества с дифференцированным термоупрочнением, надежных струнобетонных шпал, щебеночного балласта из твердых горных пород, шурупно-дюбельных скреплений, в том числе подкладочных, которые создают необходимые условия для того, чтобы обеспечить безопасное движение поездов.

Впрочем, существование в рельсовых панелях температурных сил, сжимающих их в весенне-летний сезон и растягивающих в осенне-зимний, предопределяет ряд требований к устройству бесстыковой конструкции пути и ее техническому обслуживанию. Важнейшим из таких условий является недопущение преимущественно небезопасного отказа – выброса пути.

При отступлении от норм содержания рельсовой колеи, а также балластного слоя и промежуточных рельсовых скреплений крайне вероятно появление участков, на которых вероятность выброса возрастает [1].

Следует отметить, что при монтаже и эксплуатации бесстыкового пути, как отмечают В. Г. Альбрехт и др. [2], напряженно-деформированное состояние рельсовых панелей в значительной степени определяется температурой их закрепления, от которой зависят температурные напряжения в рельсовых панелях, величина зазора при изломе панели и устойчивость пути к выбросу при высоких температурах.

Новые проблемы содержания бесстыкового пути

Исследуя проблемы новых видов локомотивов в сочетании с вопросами содержания бесстыкового пути, С. А. Васильева и другие отмечают, что «с 2010 года Уральским заводом железнодорожного машиностроения выпускается двухсекционный восьмиосный электровоз постоянного тока с асинхронными двигателями 2ЭС10 «Гранит». Он способен вести поезд массой 9 000 т на участках с равнинным профилем и 6 300 т – на участках с горным профилем. Уже выпущено 184 электровоза 2ЭС10 (в том числе 49 снабжены дополнительной бустерной секцией 2ЭС10С, делающей локомотив трехсекционным), которые курсируют на грузонапряженных направлениях с наиболее сложным профилем Свердловской и Западно-Сибирской дорог» [3, с. 9–10].

Необходимо добавить, что научно-исследовательская работа, выполненная экспертами АО «ВНИИЖТ», которая посвящена определению влияния электровозов нового поколения 2ЭС10 на путь в части оценки продольных и поперечных сил, вызывает научный интерес со стороны исследователей в этой области.

По итогам научно-исследовательской работы сделаны выводы:

– обращающиеся грузовые электровозы с асинхронными двигателями в режиме максимальной тяги становятся причиной возникновения в панелях бесстыкового пути продольных сил, которые могут достигать 250 кН. Эта величина составляет 43 % от максимальных температурных сил в рельсовых панелях – 580 кН;

– возникновение поперечных сил в кривых радиусом 400 м величиной 83 кН приводит к повышенному накоплению деформаций и неисправностей пути в плане, при этом исследования проводились в режиме максимальной тяги и рекуперативного торможения исследуемого электровоза [3].

Вышеизложенное указывает на потребность в усилении пути, где обращаются грузовые электровозы с асинхронными двигателями в режимах максимальной тяги и рекуперативного торможения.

Вместе с тем по результатам анализа текущего состояния инфраструктуры на исследуемых участках выявлена немаловажная проблема – рост числа дефектных рельсов, судя по всему, связанный с особенностью механизма эксплуатации этих локомотивов, в виде допускаемого до 0,83 м/с управляемого проскальзывания колес.

Рост мест временного восстановления рельсовых плетей

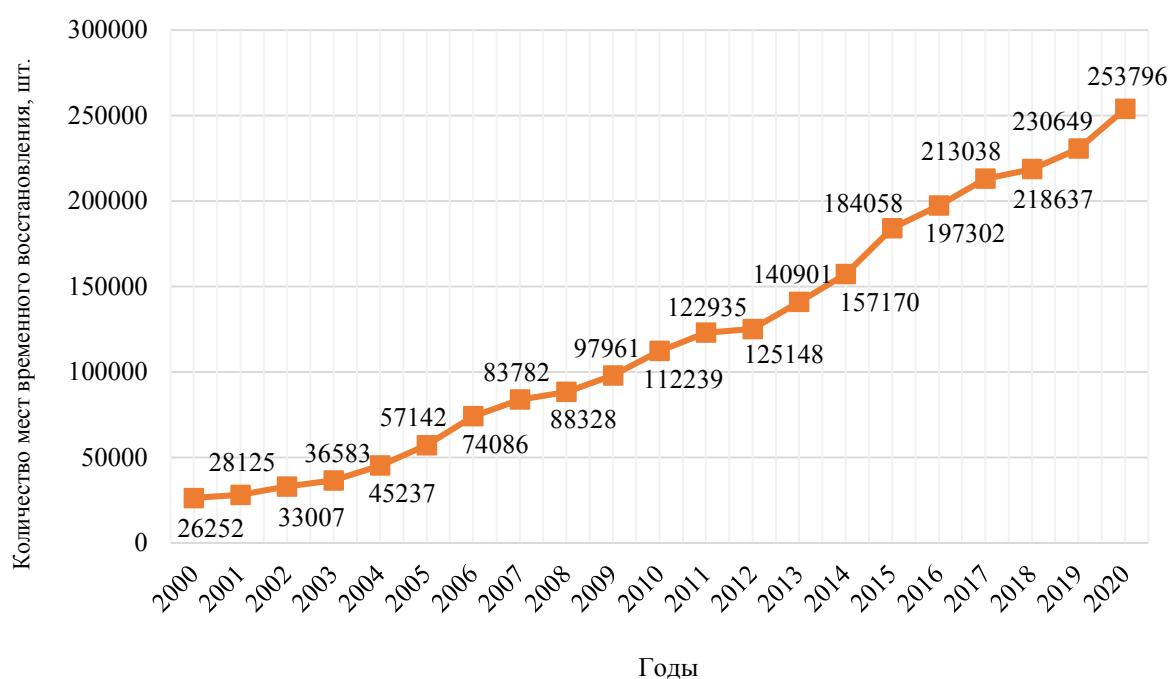
В последние годы одной из проблем бесстыкового пути становится интенсивный рост числа мест временного восстановления плетей (МВВП). Динамика развития МВВП на бесстыковом пути с 2000 по 2020 г. приведена на рис. 1.

Из графика следует, что с 1 января 2000 г. по 1 января 2020 г. число МВВП выросло с 26 252 до 253 796, т. е. увеличилось в 9,7 раз. При этом важно отметить, что в анализируемый период времени происходило восстановление плетей сваркой, во всяком случае, в недостаточном объеме [4].

За двадцатилетний период на сети ОАО «РЖД» активно внедрена в практику алюминиотермитная сварка рельсовых плетей. Уже в 2018 г. этим способом было сварено почти 80 тыс. стыков (ликвидировано 40 тыс. МВВП) [5].

Если рассматривать данные за период с 1 января 2019 г. по 1 января 2020 г., можно увидеть рост МВВП на 23 147 мест, и это несмотря на то, что 1 403 места были ликвидированы электроконтактной сваркой (ПРСМ), 42 717 мест – алюминиотермитной сваркой, при плановых ремонтных работах заменой старогодных плетей устранено 39 740 мест. В сумме в 2019 г. было ликвидировано 83 680 мест временного восстановления.

В соответствии с представленными статистическими данными Н. П. Виногоров и Д. А. Малявин отмечают, что «при минимальной стоимости алюминиотермитной сварки одного стыка (14 000 р.) на эту работу потребу-



Rис. 1. Изменение числа мест временного восстановления плетей на сети железных дорог России

ется затратить около 300 млн р., не считая затрат на материалы. На сварку же всех стыков в МВВП по сети (482 412 шт.) потребуется затратить не менее 6,7 млрд р. только на саму сварку» [4, с. 12].

На основании вышеизложенных положений следует согласиться с авторами статьи в том, что «каждое МВВП вследствие наличия двух стыков, а соответственно, и повышенного динамического воздействия поездов в этой зоне, является местом активного расстройства пути и выхода из строя стыковых и промежуточных рельсовых скреплений. При этом с ростом грузонапряженности и осевых нагрузок динамика расстройства пути на участках МВВП возрастает. Наряду с увеличенным воздействием подвижного состава на путь в зоне МВВП нельзя не учитывать и температурные силы в стыковых соединениях с концами примыкающих плетей» [4, с. 13].

По итогам анализа интенсификации мест временного восстановления рельсовых плетей не исключено, что управлеческие решения по сокращению МВВП наиболее рационально разрабатывать по нескольким направлениям. Вероятный и наиболее правдоподобный в настоящее время принцип – расширение температурного диапазона сварки рельсовых плетей как электроконтактным, так и алюминиотермитным способами.

Проблемы устранения локальных грязевых выплесков

Обращаясь к проблемам устранения грязевых выплесков, С. В. Маркин поясняет, что

«при интенсивной эксплуатации железнодорожного пути происходит постепенное накопление деформаций балластной призмы и подбалластных слоев, вызванное циклической нагрузкой от подвижного состава, а также защорением балласта. В результате образуются такие дефекты пути, как грязевые выплески.

Выплеском называют зону разжижения балласта под шпалами, возникающую под воздействием поездов, вследствие недостаточных дренирующих свойств балластной призмы, а также из-за дробления и загрязнения балласта» [6, с. 18].

Необходимо добавить, что «анализ состояния балластной призмы на сети железных дорог показал, что при наработке тоннажа от 0 до 250 млн т груза брутто наибольшее количество повреждений призмы вызвано выплесками длиной от 6 до 10 м. Очевиден вред, наносимый данным дефектом, – кроме потери общей устойчивости бесстыкового пути, которая угрожает безопасности движения поездов, и снижения скоростей, приводящего к экономическим потерям, локальный выплеск является причиной повреждения элементов верхнего строения пути (шпал и рельсовых скреплений)» [6, с. 20].

Устранение локальных выплесков (рис. 2) является одной из основных задач путевого хозяйства ОАО «РЖД». В настоящее время их устраняют в основном вручную, а также с использованием средств малой механизации, например моторно-гидравлической установки, удаляя балласт из шпальных ящиков и заполняя их чистым балластом.



Rис. 2. Разрушение железобетонных шпал, вызванное локальным выплеском пути

Трудоемкость процесса ликвидации выплеска вручную и при этом малая глубина вырезки балласта, которая варьируется от 100 до 200 мм от подошвы шпалы, – главные недостатки при устраниении выплесков. В конечном итоге образование выплеска многократно повторяется в одном и том же месте.

Материалы и методы исследования

Возможность укладки бесстыкового пути в конкретных условиях эксплуатации устанавливается сравнением допускаемой температурной амплитуды $[T]$ для данной конструкции пути с фактически наблюдавшейся в данной местности амплитудой колебаний температуры рельсов T_A . Если $T_A \leq [T]$, то бесстыковой путь можно укладывать без ограничений.

Для условий Западной Сибири значение фактически наблюдавшейся в данной местности амплитуды колебаний температуры T_A следующее:

$$T_A = t_{\max \max} - t_{\min \min} = 55 - (-54) = 109^{\circ}\text{C}. \quad (1)$$

При этом учитывается, что наибольшая температура рельса на открытых участках превышает на 20°C температуру воздуха.

Амплитуда допускаемых изменений температур рельсов:

$$[T] = [\Delta t_y] + [\Delta t_p] - [\Delta t_3], \quad (2)$$

где $[\Delta t_y]$ – допускаемое повышение температуры рельсовых плетей относительно температуры их закрепления, определяемое из условия обеспечения устойчивости пути к выбросу, градусы Цельсия; $[\Delta t_p]$ – допускаемое понижение температуры рельсовых плетей относительно температуры их закрепления, определяется прочностью при действии растягивающих продольных сил, градусы Цельсия; $[\Delta t_3]$ – минимальный интервал температур, в котором окончательно закрепляются плети, градусы Цельсия (по условию технологии работ).

Для всех элементов плана при $R > 250$ м и $[T] > T_A$ укладка типовой конструкции бесстыкового пути возможна.

Расчетный температурный интервал закрепления рельсовых плетей:

$$\Delta t_3 = [\Delta t_y] + [\Delta t_p] - T_A. \quad (3)$$

Границы расчетного интервала закрепления определяются по формулам

$$\begin{cases} \min t_3 = t_{\max \max} - [\Delta t_y], \\ \max t_3 = t_{\min \min} - [\Delta t_p]. \end{cases} \quad (4)$$

Закрепление плетей любой длины при любой температуре в пределах расчетного интервала гарантирует надежность их работы при условии полного соблюдения требований Инструкции [1], касающихся конструкции и содержания бесстыкового пути. При этом следует учитывать, что закрепление плетей при очень высоких температурах может в отдельных случаях привести к образованию большого зазора при сквозном изломе плети или к разрыву болтов в стыках уравнительных пропилов при низких температурах рельсов.

Согласно Инструкции [1], для всех дирекций инфраструктуры (кроме Северо-Кавказской, Юго-Восточной и Приволжской) оптимальная температура закрепления рельсовых плетей $t_{\text{опт}} = 30 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Методика расчета устойчивости бесстыкового пути

Данные, получаемые с путеизмерителей, оборудованных системами идентификации и измерения параметров рельсовых плетей, – неровностей в плане, продольных сдвигов относительно «маячных» шпал, а также геометрических размеров и состояния балластной призмы, при сплошном скоростном контроле состояния рельсовой колеи являются базой для проведения оценки устойчивости плетей бесстыкового пути температурно-напряженного типа.

«Нормы устройства и эксплуатации бесстыкового пути нацелены на обеспечение прочности плети от разрывов, устойчивости конструкции от температурного выброса и по-перечного сдвига рельсошпальной решетки под поездами. Однако в практике эксплуатации происходят как изломы рельсов, так и потеря устойчивости рельсошпальной решетки. В связи с этим необходимы методики, позволяющие определять предотказные состояния, относящиеся к температурной работе бесстыкового пути. С учетом наличия сигнальных рельсовых цепей и возможности диагностирования изломов, наибольшую опасность представляет собой отказ по причине потери устойчивости, так как происходит мгновенно и приводит путь в состояние, не пригодное для пропуска поездов. Для оценки устойчивости бесстыковых плетей в конкретных местах вводится понятие базового состояния бесстыкового пути» [7, с. 18].

Следует согласиться с необходимостью введения понятия базового состояния бесстыкового пути как состояния верхнего строения пути, при котором определены действующие нормы его устойчивости [7], для оценки устойчивости бесстыковых плетей в конкретных эксплуатационных условиях. На изменение значений норм устойчивости бесстыкового пути непосредственное влияние оказывает потеря несущей способности рельсошпальной решетки в поперечном направлении. При этом изменение фактических значений факторов, влияющих на эти процессы, – неровностей в плане, сил сопротивления рельсов и шпал сдвигу относительно шпал в узлах скреплений и балласту соответственно, в сравнении с базовыми приводит к отклонению от базового состояния и, как следствие, к потере несущей способности.

Значение комплексного показателя предотказного состояния бесстыкового пути зависит от группы факторов, которые характеризуют удерживающие свойства рельсошпальной решетки и наличие в плетях температурных напряжений в виде коэффициентов:

$$K_{\text{к}} = f(K_{\text{уг}}; K_{\text{пл}}; K_{\text{бал.пр}}; K_{\text{неп.шп}}; K_{\text{зап.шп}}), \quad (5)$$

где K_i – коэффициенты предотказного состояния, характеризующие устойчивость бесстыкового пути: $K_{\text{уг}}$ – при наличии угона рельсовых плетей; $K_{\text{пл}}$ – в плане; $K_{\text{бал.пр}}$ – при нарушении ширины плеча балластной призмы; $K_{\text{неп.шп}}$ – при наличии неподбитых шпал; $K_{\text{зап.шп}}$ – при незаполнении шпальных ящиков.

Коэффициент изменения норматива устойчивости рельсошпальной решетки, зависящий от состояния пути в плане

Неровность пути в плане – место изменения кривизны рельсовой нити, которое носит локальный характер. В этом случае происходит резкое изменение радиуса от его паспортного значения, а участки пути с неровностями являются местами концентрации поперечных сдвигающих сил. В соответствии с этой позицией, «величина понижения» характеризуется показателем $k_{\text{пл}}$ – коэффициентом понижения устойчивости пути в плане» [8, с. 49]. Длина неровности L , м, и стрела неровности f , мм, являются исходными данными для определения значения этого коэффициента.

За базовое значение неровностей, при которых значение коэффициента $k_{\text{пл}} = 1$, приняты следующие характеристики неровности: длина $L = 10$ м, стрела $f = 25$ мм.

По результатам работы путеизмерителей осуществляется последующая идентификация неровностей пути в плане со следующими граничными критериями отбора: длина фактически обнаруженной неровности короче базового значения, а стрела неровности больше. Выразить величину изменения нормы устойчивости рельсошпальной решетки относительно ее базового значения можно через коэффициент K_k , который учитывает фактическое состояние эксплуатируемого пути и наличие различных отступлений от норм его устройства и текущего содержания.

На основании результатов моделирования или натурных измерений, применив следующее соотношение, определяется значение K_{ik} :

$$K_{ik} = \frac{N_k}{N_{t \text{ баз}}}, \quad (6)$$

где K_{ik} – коэффициент изменения норматива устойчивости рельсошпальной решетки бесстыкового пути, зависит от величины изменения значения i -го влияющего фактора относительно его базового значения; N_k – критическая продольная сила сжатия, допускается в рельсовых плетях и при этом определяется с учетом влияния величины изменения значения i -го фактора относительно его базового значения; $N_{t \text{ баз}}$ – критическая продольная сила сжатия, также допускаемая в рельсовых плетях и определенная при базовых значениях i -го фактора.

Для практического использования эмпирической зависимости допускаемых продольных сжимающих температурных сил от кривизны пути при разных характеристиках верхнего строения пути принято:

$$[N_k]_R = K_{\text{эн}} [N_k]_\infty - A / R, \quad (7)$$

где $K_{\text{эн}}$ – коэффициент, учитывающий эпюру шпал, для 1 840 шт./км $K_{\text{эн}} = 1$; для 2 000 шт./км $K_{\text{эн}} = 1,085$; $[N_k]_\infty$ – продольная сжимающая сила, допускаемая в прямом участке; A – угловой коэффициент эмпирической зависимости величины $[N_k]_R$ от радиуса кривой R .

Значения $[N_k]_R$ и A для различных конструкций верхнего строения пути приведены в работе [2].

Для конструкции бесстыкового пути с рельсами типа Р65 и эпюорой шпал 2 000 шт./км:

$$[N_k]_R = 1,085 \cdot 2,25 - \frac{396}{R} = 2,44 - \frac{396}{R} \text{ МН.}$$

При эпюре шпал 1 840 шт./км:

$$[N_k]_R = 2,25 - \frac{364}{R} \text{ МН.}$$

Кривизна кривой при паспортной кривизне $\frac{1}{R_0}$ и существующей на ней неровности

в плане $\frac{1}{\rho}$ определяется по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{\rho}. \quad (8)$$

В соответствии с Положением о порядке контроля главных и станционных путей путеизмерительными средствами, утвержденным распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436/р, разность стрел изгиба отступлений от рихтовки длиной до 20 м на участках со скоростями движения пассажирских поездов 101–120 км/ч и грузовых 81–90 км/ч, для четвертой степени $-\Delta f < 35$ мм [9, табл. 6.4].

Разность стрел между вершинами отступлений в плане $\Delta f = f_2 - (-f_1)$ (рис. 3).

Радиус круговой кривой в любой точке i при длине хорды $a = 20$ м определяется по формуле

$$\rho_i = \frac{a^2}{8f_i} = \frac{50}{f_i} = \frac{50}{\Delta f}. \quad (9)$$

Коэффициент изменения норматива устойчивости рельсошпальной решетки, зависящий от состояния элементов верхнего строения пути

Основным элементом верхнего строения пути, состояние которого обеспечивает устойчивость рельсошпальной решетки от поперечного смещения, является балластная призма (формируется сила сопротивления сдвигу шпал, действующая по направлению перпендикулярно оси пути).

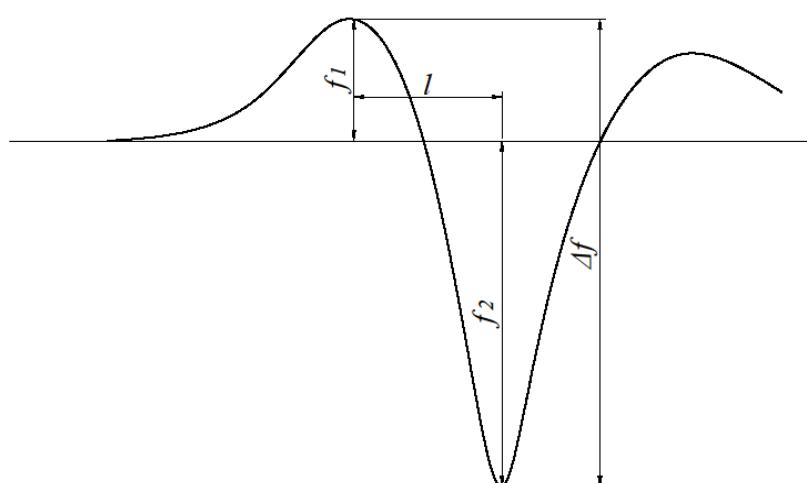
Оценивая состояние элементов верхнего строения пути, первоначально для каждой шпалы определяются фактические параметры: ширина плеча балластной призмы, процент наполненности балластом шпального ящика (как среднее значение между наполненностью правого и левого по оси пути ящиков), наличие неподбитых шпал и грязевых выплесков.

На следующем этапе вычисляется фактическая доля сил сопротивления поперечному сдвигу [10].

Для учета состояния балластной призмы, в пределах границ каждого исследуемого участка, на основе показаний путеизмерительных средств определяется коэффициент вариации доли сил сопротивления поперечному сдвигу шпал относительно базового значения:

$$k_{шп.} = \frac{\hat{\gamma}_{шп.}}{\bar{\gamma}_{шп.}}. \quad (10)$$

где $\hat{\gamma}_{шп.}$ – среднее квадратическое отклонение доли сил сопротивления поперечному сдвигу шпал; $\bar{\gamma}_{шп.}$ – среднее значение доли сил сопротивления поперечному сдвигу шпал.



Rис. 3. Разность измеренных стрел кривизны пути

Коэффициент изменения норматива устойчивости рельсошпальной решетки, зависящий от угона рельсовых плетей

Коэффициент предотказного состояния, характеризующий устойчивость бесстыкового пути при наличии угона рельсовых плетей, определяется по формуле

$$K_{\text{уг}} = \frac{5\Delta l}{\Delta l_{\text{пред}}}, \quad (11)$$

где Δl – измеренное фактическое удлинение или укорочение (в этом случае значение со знаком « $-$ ») рельсовой плети, мм; $\Delta l_{\text{пред}}$ – установленное для условий эксплуатации предельное значение угона рельсовых плетей, требующее закрытия движения поездов, которое зависит от плана линии, мм (принимаются по таблице); 5 – количество состояний, характеризующих показатель безопасности при угоне рельсовых плетей (принимается согласно матрице ранжирования, в которую входят пять состояний оценки).

Значение коэффициента $K_{\text{уг}}$ определяется для правой и левой рельсовой плети. При расчете комплексного показателя предотказного состояния бесстыкового пути принимается максимальное значение [10].

Мероприятия, обеспечивающие устойчивость бесстыкового пути

Таким образом, для бесстыкового пути, установленного на пикетах, находящихся в предотказном состоянии, устанавливаются ограничения скорости движения поездов:

- до 120 км/ч при значении $2,5 \leq K_k \leq 3$ для линий с установленной скоростью движения более 140 км/ч;
- до 60 км/ч при значении $3 \leq K_k \leq 4$;
- до 25 км/ч при значении $4 \leq K_k \leq 5$.

Вместе с тем, необходимо определить потребность в разрядке или регулировке температурных напряжений в рельсовых плетях, определив фактическую температуру закрепления на исследуемых пикетах.

В целях устранения выявленных по результатам осмотров неисправностей необходимо принять следующие меры: выполнить подтяжку болтов и/или шурупов рельсовых скреплений, а также замену их неисправных элементов, пополнить щебеночную балластную призму твердыми горными породами и/или произвести ее уплотнение и другие работы, требуемые для устранения выявленных неисправностей.

С момента выявления неисправностей осмотр нужно назначать не более чем за 24 ч. Работы выполнять – не позднее чем за трое суток с момента выявления неисправностей. По результатам осмотра принимаются решения по действующему ограничению скорости в соответствии с нормативными документами по текущему содержанию пути.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время остается актуальным недопущение крайне небезопасного отказа бесстыковой конструкции железнодорожного пути – выброса пути, возникающего при отступлении от норм его содержания.

2. В сочетании с вытекающими проблемами содержания бесстыкового пути появляются новые проблемы при воздействии на путь инновационных видов локомотивов, которые в режиме максимальной тяги становятся причиной возникновения в плетях продольных сил значительной величины.

3. Наблюдается динамика развития мест временного восстановления плетей бесстыкового пути. За двадцатилетний период число МВВП увеличилось в 9,7 раз. Управленческие решения, направленные на сокращение таких мест, наиболее рационально разрабатывать по нескольким направлениям, одним из которых является расширение температурного диапазона сварки рельсовых плетей.

Предельные значения угона рельсовых плетей $\Delta l_{\text{пред}}$ в зависимости от плана линии (радиуса R , м)

$R > 2\ 000 \text{ м}^*$	$400 \leq R \leq 2\ 000^{**}$	$350 \leq R \leq 399^{**}$	$300 \leq R \leq 349^{**}$	$250 \leq R \leq 299^{**}$
40	35	30	25	20

* Прямые и кривые участки пути.

** Кривые участки пути.

4. Для практического использования выведен показатель допускаемой продольной сжимающей температурной силы в зависимости от кривизны пути при разных характеристиках верхнего строения пути.

5. Предложены мероприятия, обеспечивающие устойчивость бесстыковой конструкции железнодорожного пути, уложенного на пикетах в предотказном состоянии.

Список источников

1. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=STR&n=21464&demo=1> (дата обращения: 14.06.2022).
2. Бесстыковой путь / В. Г. Альбрехт, Н. П. Виноградов, Н. Б. Зверев, А. Я. Коган. Москва : Транспорт, 2000. 408 с.
3. Васильева С. А., Борц А. И. Новые локомотивы – новые проблемы содержания бесстыкового пути // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 6. С. 9–13.
4. Виногоров Н. П., Малевин Д. А. Сокращение мест временного восстановления рельсовых плетей // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 3. С. 11–15.
5. Сварочные и наплавочные технологии на железнодорожном транспорте : сборник научных трудов ВНИИЖТа / под редакцией А. В. Гудкова. Москва : Интекст, 2008. 176 с.
6. Маркин С. В. Решение проблемы устранения локальных выплесков // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 5. С. 18–21.
7. Овчинников Д. В., Суслов О. А. Метод оценки устойчивости бесстыкового пути под поездной нагрузкой // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 6. С. 16–20.
8. Суслов О. А. Методологические основы определения допускаемых значений вероятности возникновения выброса и сдвига рельсошпальной решетки бесстыкового пути // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 6 (60). С. 48–52.
9. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436/р // Обучение и тестирование : [сайт]. URL: <https://tst.studyshark.ru/wp-content/uploads/2021/02/Инструкции-по-оценке-рк-№436р-28.02.2020.pdf> (дата обращения: 14.06.2022).
10. Овчинников Д. В., Покачий В. А. Оценка устойчивости бесстыкового пути при наличии вариативного фактора сил сопротивления перемещениям рельсошпальной решетки // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 1 (43). С. 96–106.

References

1. Instructions for the device, laying, maintenance and repair of a continuously welded rail track: approved by Russian Railways dated December 14, 2016 No. 2544r. *Consultant Plus: [site]*. (In Russ.). URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=STR&n=21464&demo=1>.
2. Albrecht V. G., Vinogradov N. P., Zverev N. B., Kogan A. Ya. Continuously welded rail track. Moscow: Transport; 2000. 408 p.
3. Vasileva S. A., Borts A. I. New locomotives – new problems of continuously welded rail track maintenance. *Track and track facilities*. 2021;(6):9–13. (In Russ.).
4. Vinogradov N. P., Malyavin D. A. Reducing the places of temporary restoration of rail lengths. *Track and track facilities*. 2021;(3):11–15. (In Russ.).
5. Gudkov A. V., ed. Welding and surfacing technologies in railway transport. *Proceedings of the Railway Research Institute*. Moscow: Intekst; 2008. 176 p. (In Russ.).
6. Markin S. V. The solution to the problem of local track splashes removal. *Track and track facilities*. 2021;(5):18–21. (In Russ.).
7. Ovchinnikov D. V., Suslov O. A. Method for assessing the stability of a continuous welded rail track under the influence of a train load. *Track and track facilities*. 2021;(6):16–20. (In Russ.).
8. Suslov O. A. Methodological basis for determining permissible values of the probability of ejection and shear of the rail-sleeper grid of a continuously welded rail track. *The Bulletin of the Volga Region Transport*. 2016;(6):48–52. (In Russ.).
9. Instructions for assessing the rail gauge condition by means of track measuring and measures to ensure the safety of train traffic: approved by Order of Russian Railways dated February 28, 2020 No. 436/r. *Training and*

testing: [site]. (In Russ.). URL: <https://tst.studyshark.ru/wp-content/uploads/2021/02/Инструкции-по-оценке-рк-№436п-28.02.2020.pdf>.

10. Ovchinnikov D. V., Pokatsky V. A. Evaluation of the stability of a continuous welded rail track in the presence of a variable factor of forces of resistance to the movements of the assembled rails and sleepers. *The Bulletin of the Volga Region Transport.* 2014;(43):96–106. (In Russ.).

Информация об авторах

Н. И. Карпушенко – профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

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

Information about the authors

N. I. Karpuschenko – Professor of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University, Doctor of Technical Sciences.

I. K. Ardyshев – Postgraduate Student of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 17.06.2022; одобрена после рецензирования 01.11.2022; принятая к публикации 09.01.2023.

The article was submitted 17.06.2022; approved after reviewing 01.11.2022; accepted for publication 09.01.2023.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.212.7

doi 10.52170/1815-9265_2023_64_15

Выбор оптимальных логистических схем поставок товаров из Китая в Российскую Федерацию при использовании контейнеров

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. Мировой кризис 2022 г. глобально повлиял на логистику грузовых перевозок из Китая в Россию, в результате чего многие устоявшиеся цепочки поставок продукции были разорваны или претерпели существенные изменения. Ранее больше половины грузоперевозок в Российскую Федерацию осуществлялось через северо-запад страны, а именно через балтийские порты, ряд черноморских и другие. В условиях мирового кризиса логистика товародвижения сместилась на восток и юг России. Влияние на логистику грузовых перевозок оказал также и контейнерный кризис. Повышение стоимости морского фрахта, аварийные ситуации в Суэцком канале, недостаток транспортных активов привели к изменению привычных маршрутов доставки, которые отрабатывались и совершенствовались в течение многих лет. В статье определены параметры логистических маршрутов через дальневосточные порты (Влад. и Вост.), пограничные переходы с Китаем и Монголией (Заб. и Науш. соответственно) с учетом действующих ограничений и нормативов, утвержденных законодательством Российской Федерации, и нормативов, указанных в международных документах, принятых Организацией сотрудничества железных дорог: дальность и сроки перевозки 40-футовых контейнеров в Нов., транспортные и общие затраты на доставку. По результатам расчетов выбраны оптимальные цепи поставок 40-футовых контейнеров из Шан. в Нов. с учетом автомобильного, железнодорожного и морского видов транспорта, сделан вывод о продолжительности осуществления перевозки, а также о целесообразности применения того или иного вида транспорта на основных плечах маршрута, дан примерный диапазон общих затрат на доставку по исследуемым цепочкам поставок.

Ключевые слова: транспортная логистика, цепи поставок, товарообмен между Китаем и Россией, мировой кризис, контейнерные перевозки

Для цитирования: 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.

TRANSPORT

Original article

The choice of optimal logistics schemes for the supply of goods from China to the Russian Federation using containers

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

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

¹ gladunov.vadim@mail.ru[✉]

² kuchkinaem@mail.ru

Abstract. The global crisis of 2022 globally affected the logistics of cargo transportation from China to Russia, as a result of which many established product supply chains were broken or underwent significant changes. Previously, more than half of cargo transportation to the Russian Federation was carried out through the north-west of the country, namely through the Baltic ports, a number of Black Sea and others. In the conditions of the global crisis, the logistics of goods movement was reorganized to the east and south of Russia. Also, among other things, the container crisis had an impact on the logistics of freight transportation. The rise in the cost of sea freight, emergency situations in the Suez Canal, the lack of transport assets have led to a change in the usual delivery routes, which have been worked out and improved over the years. The article defines the parameters of logistics routes through the Far Eastern ports (Vlad. and Vost.), border crossings with China and Mongolia (Zab. and Naush., respectively), taking into account the current restrictions and standards approved by the legislation of the Russian

Federation, and the standards specified in international documents adopted by the Organization for Cooperation between Railways: the distance and terms of transportation of 40-foot containers to Nov., transport and general delivery costs. Based on the results of calculations, the optimal supply chains for 40-foot containers from Shang. were selected in Nov. with the participation of road, rail and sea modes of transport, a conclusion was made about the duration of the transportation, as well as the feasibility of using one or another mode of transport on the main shoulders of the route, an approximate range of total delivery costs for the studied supply chains was given.

Keywords: transport logistics, supply chains, trade between China and Russia, global crisis, container transportation

For citation: 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. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_15.

Введение

По данным Федеральной таможенной службы Российской Федерации, за период с января 2020 г. по январь 2021 г. товарооборот между Россией и Китаем составил 8 697,6 млн долл. США. По данным статистики за период с января 2021 г. по январь 2022 г. оборот товаров между странами вырос до 13 009,4 млн долл. США, что составляет 18,8 % от мирового товарооборота. Темпы роста данного показателя за рассматриваемый период являются достаточно высокими и равны 149,6 % [1]. Анализируя статистические данные, можно сделать вывод, что Китай является одним из ключевых торговых партнеров Российской Федерации во многих экономических сферах.

Мировой кризис 2022 г. глобально повлиял на логистику грузовых перевозок из Китая в Россию, в результате чего многие устоявшиеся цепочки поставок продукции были разорваны или претерпели существенные изменения. Ранее больше половины грузоперевозок в Российскую Федерацию осуществлялось через северо-запад страны, а именно через балтийские порты, ряд черноморских и другие. В условиях мирового кризиса логистика товародвижения перестроилась на восток и юг. Наблюдается увеличение грузопотоков продукции и сырья через дальневосточные порты, а также пограничные переходы с Китаем, Монгoliей и Казахстаном. Также, помимо прочего, влияние на переориентацию грузопотоков логистики оказал и контейнерный кризис. Рост стоимости морского фрахта, аварийные ситуации в Суэцком канале, недостаток транспортных активов привели к изменению привычных маршрутов доставки, которые отрабатывались и совершенствовались на протяжении многих лет [2]. Данные факты говорят о том, что вопросы изучения логистических процессов обмена продукцией и торго-

вых отношений между странами являются достаточно актуальными в наши дни.

Материалы и методы исследования

С целью обеспечения бесперебойной перевозки груза в качестве ключевых предлагается рассмотреть четыре технологии поставки контейнеров из Китая в Западную Сибирь [3], описанные ниже.

Технология № 1 (прямая смешанная перевозка: морской транспорт + железнодорожный транспорт): порты Китая – дальневосточные порты России – железнодорожные станции Сибири. По этой технологии контейнеры загружаются в морские суда в портах Китая, на которых они следуют до дальневосточных портов России. На припортовых и крупных станциях рядом с этими портами формируются грузовые и контейнерные поезда, которые следуют до станций назначения в Западную Сибирь по Транссибирской магистрали. На станциях назначения с контейнерами производятся коммерческие операции по одной из двух технологий работы – на самой станции либо же на примыкающих к ней путях необщего пользования.

Технология № 2 (прямая смешанная перевозка: морской транспорт + автомобильный транспорт): порты Китая – дальневосточные порты России – склады в городах Западной Сибири. По данной технологии контейнеры загружаются в морские суда в портах Китая, на которых они следуют до дальневосточных портов России. Далее контейнеры загружаются в полуприцепы-контейнеровозы и в грузовиках следуют на склады в города Западной Сибири.

Технология № 3 (прямая железнодорожная перевозка): железнодорожные станции Китая – пограничные переходы между странами – железнодорожные станции Сибири. На железнодорожных станциях Китая или на примыкающих к ним путях необщего пользования формируются грузовые и контейнерные поезда назна-

чением в города Российской Федерации. Данные поезда следуют через пограничные переходы между различными государствами и далее по Транссибирской магистрали на станции Западной Сибири.

Технология № 4 (прямая автомобильная перевозка): склады в городах Китая – пограничные переходы между странами – склады в городах Западной Сибири. В соответствии с технологией на складах городов Китая контейнеры загружаются в полуприцепы-контейнеровозы назначением в города Российской Федерации. Грузовики следуют через пограничные переходы между различными госу-

дарствами и далее по территории России на склады в города Западной Сибири.

В рамках исследования будут рассмотрены восемь цепей поставок продукции из Шан. в Нов. в соответствии с представленными выше технологиями. Логистические цепи поставок представлены на рис. 1–8.

Расстояния между портами Китая и России определяются с помощью калькулятора морских расстояний SEA-DISTANCES [4], между станциями Российской Федерации – по Тарифному руководству № 4 [5], между станциями Китая, Монголии и России – по Единому транзитному тарифу (ЕТТ) [6], между



Рис. 1. Логистическая цепь поставки № 1 (смешанная перевозка)



Рис. 2. Логистическая цепь поставки № 2 (смешанная перевозка)

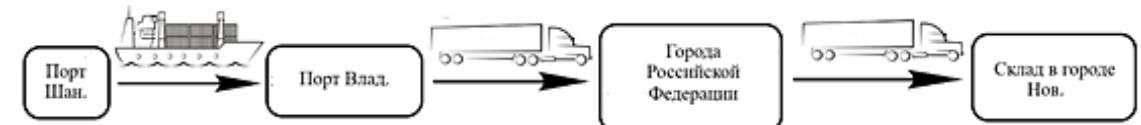


Рис. 3. Логистическая цепь поставки № 3 (смешанная перевозка)

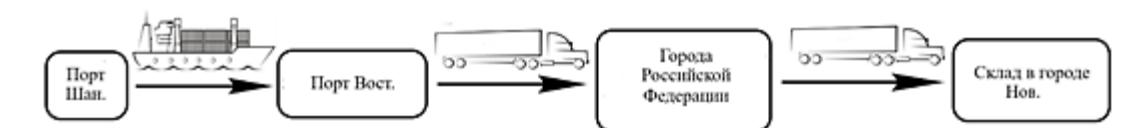


Рис. 4. Логистическая цепь поставки № 4 (смешанная перевозка)

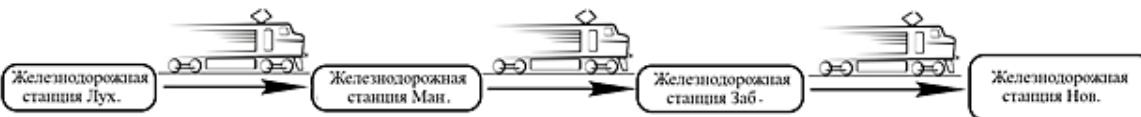


Рис. 5. Логистическая цепь поставки № 5 (прямая железнодорожная перевозка)

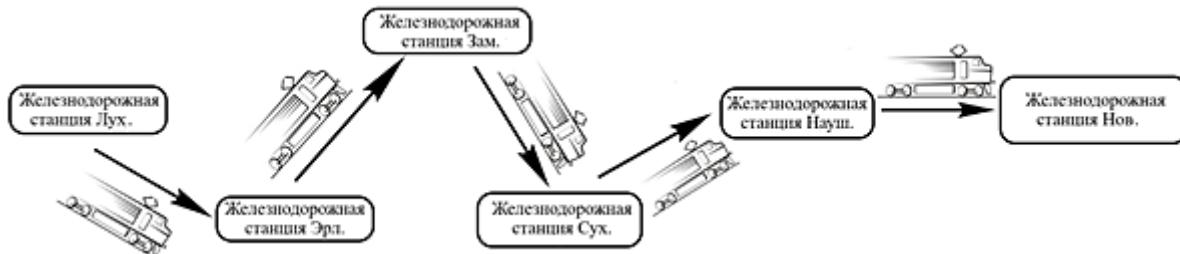


Рис. 6. Логистическая цепь поставки № 6 (прямая железнодорожная перевозка)

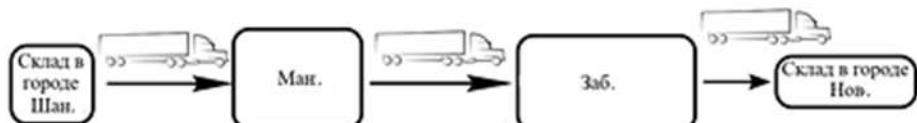


Рис. 7. Логистическая цепь поставки № 7 (прямая автомобильная перевозка)

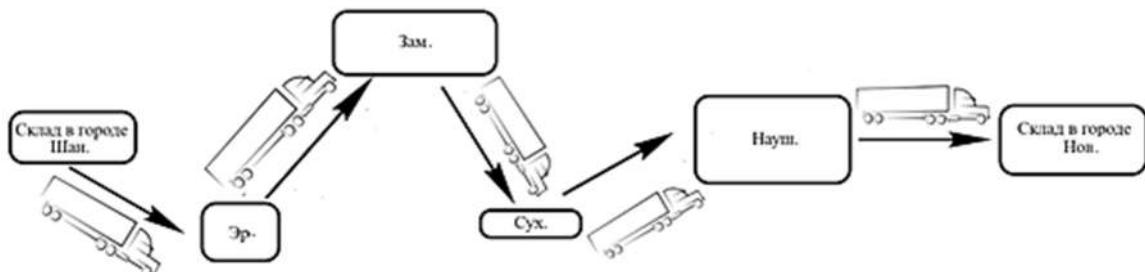


Рис. 8. Логистическая цепь поставки № 8 (прямая автомобильная перевозка)

городами Китая, Монголии и России – при помощи сайта «Автодиспетчер» [7].

В качестве груза для расчета приняты «Изделия макаронные» (код ЕТСНГ: 512002). Перевозка осуществляется в 40-футовом контейнере.

Срок доставки грузов при организации прямой смешанной перевозки (морской транспорт + железнодорожный транспорт + автомобильный транспорт) определяется по формуле

$$T = T_{\text{мор}} + T_{\text{жд}} + T_{\text{авт}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{мор}}$ – срок доставки груза морским транспортом, сут; $T_{\text{жд}}$ – нормативный срок доставки груза железнодорожным транспортом, сут; $T_{\text{авт}}$ – срок доставки груза автомобильным транспортом, сут.

Нормативной срок доставки грузов железнодорожным транспортом по территории России определяется на основании Правил исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом [8] по формуле

$$T_{\text{жд}} = t_{\text{н-к}} + \frac{l_{\text{жд}}}{N} + t_{\text{доп}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{н-к}}$ – время на выполнение начальных и конечных операций, связанных с отправлением и прибытием грузов, сут; $l_{\text{жд}}$ – дальность перевозки груза железнодорожным транспортом по территории России, км; N – норма суточного пробега вагона, км; $t_{\text{доп}}$ – время на осуществление дополнительных операций в пути следования, сут.

Для определения сроков доставки грузов морским транспортом используется методика, связанная с понятием коммерческой скорости. Коммерческая скорость характеризует быст-

роту продвижения груза на морской линии и учитывает время нахождения грузов как в пути, так и в портах отправления и назначения.

Коммерческая скорость определяется по формуле

$$\nu_{\text{ком}} = l_{\text{м}} / \left(\frac{l_{\text{м}}}{v_{\text{суд}}} + \frac{\alpha D}{M_{\text{погр}}} + \frac{\alpha D}{M_{\text{выгр}}} + t_{\text{доп}}^{\text{м}} \right), \quad (3)$$

где $l_{\text{м}}$ – дальность перевозки морским транспортом, миль; $v_{\text{суд}}$ – эксплуатационная скорость судов, работающих на линии, миль/сут; α – коэффициент использования грузоподъемности морского судна; D – грузоподъемность судна, конт.; $M_{\text{погр}}$ и $M_{\text{выгр}}$ – среднесуточная норма грузовых работ в порту отправления и назначения соответственно, конт./сут; $t_{\text{доп}}^{\text{м}}$ – время на осуществление дополнительных операций, сут.

Срок доставки груза морским транспортом определяется по формуле

$$T_{\text{мор}} = \frac{l_{\text{м}}}{\nu_{\text{ком}}}, \quad (4)$$

где $\nu_{\text{ком}}$ – коммерческая скорость перевозки, миль/сут.

Расчетным путем среднесуточная норма грузовых работ в портах отправления и прибытия может быть определена по формуле

$$M_{\text{погр(выгр)}} = \frac{K}{12 \cdot 2 \cdot 30}, \quad (5)$$

где K – годовой контейнерооборот порта, конт./год; 12 – значение, переводящее годовой контейнерооборот к месячному; 2 – значение, учитывающее погрузку и выгрузку контейнеров в портах; 30 – число дней в месяце.

Срок доставки груза автомобильным транспортом определяется по формуле

$$T_{авт} = t_{н-к} + \frac{l_{авт}}{v_{ЭК}} + t_{доп}, \quad (6)$$

где $l_{авт}$ – дальность перевозки автомобильным транспортом, км; $v_{ЭК}$ – эксплуатационная скорость автомобильного транспорта на маршруте, км/сут; $t_{доп}$ – время на дополнительные операции, связанные с пересечением границ различных государств при организации международной перевозки, принято 1 сут на границу.

Эксплуатационная скорость автотранспорта на маршруте определяется по упрощенной формуле

$$v_{ЭК} = \frac{v_{маг} + v_{загор} + v_{гор} + v_{ст}}{4}, \quad (7)$$

где $v_{маг}$ – максимально разрешенная скорость движения грузовиков категорий С и СЕ на автомагистралях в соответствии с Правилами дорожного движения Российской Федерации [9], 90 км/ч; $v_{загор}$ – максимально разрешенная скорость движения грузовиков категорий С и СЕ на загородных дорогах в соответствии с [9], 70 км/ч; $v_{гор}$ – максимально разрешенная скорость движения грузовиков категорий С и СЕ в населенных пунктах в соответствии с [9], 60 км/ч; $v_{ст}$ – скорость при стоянках на отдыхе, при прохождении границ и другого, 0 км/ч.

В соответствии с пунктом 26.2 Правил дорожного движения Российской Федерации [9] в пределах одного рабочего дня время управления грузовым транспортом не должно превышать 9 ч (ограничение на суточный пробег автотранспорта).

Расчет нормативных сроков доставки продукции при организации прямой железнодорожной доставки из Китая в Россию осуществляется с применением Соглашения о международном железнодорожном грузовом сообщении [10]. Нормативный срок доставки продукции в этом случае определяется по формуле

$$T_{жд} = t_{отп} + \frac{l_{жд}^1}{N} + \dots + \frac{l_{жд}^n}{N} + t_{доп}, \quad (8)$$

где $t_{отп}$ – время на операции, связанные с отправлением груза, сут; $l_{жд}^n$ – дальность перевозки груза по территории соответствующей страны, км.

Укрупненно затраты на перевозку 40-футового контейнера из Шанхая в Новосибирск можно определить по формуле

$$P = (P_{п.п} + P_{пер})k_h, \quad (9)$$

где $P_{п.п}$ – провозная плата различными видами транспорта; $P_{пер}$ – расходы на операции в пунктах перевалки; k_h – коэффициент неучтенных затрат, принимаемый равным 1,5 (50 %).

Затраты на перевозку грузов различными видами транспорта $P_{п.п}$ складываются из затрат на перевозку железнодорожным $P_{жд}$ и морским $P_{мор}$ видами транспорта при организации прямой смешанной перевозки; из затрат на перевозку железнодорожным транспортом $P_{жд}$ при организации прямой железнодорожной доставки; из затрат на перевозку автомобильным транспортом $P_{авт}$ при организации прямой автомобильной доставки:

– в случае прямой смешанной перевозки

$$P_{п.п} = P_{жд} + P_{мор}; \quad (10)$$

– в случае прямой железнодорожной доставки

$$P_{п.п} = P_{жд}; \quad (11)$$

– в случае прямой автомобильной доставки

$$P_{п.п} = P_{авт}. \quad (12)$$

Провозная плата по территории Российской Федерации определяется на основании положений Тарифного руководства № 1 (Прейскурант № 10-01). В данной работе провозная плата определена с использованием автоматизированной системы «Электронная транспортная накладная» (АС ЭТРАН). Расчет провозной платы при перевозках из Китая за транзит по территории Монголии производится в соответствии с ЕТТ.

Расчет провозной платы груза железнодорожным транспортом по территории Китая проведен на основании расчета российского интерmodalного контейнерного оператора «ТрансКонтейнер»; автомобильным транспортом по территории России, Китая и Монголии – на основании расчета транспортно-логистической компании «Тайгер-Логистик».

Фрахт (плата) за перевозку груза морским транспортом устанавливается из расчета тайм-чarterного эквивалента (ТЧЭ). Данный показатель определен на основании данных международной транспортной компании FESCO.

Расходы на перевозку 40-футового контейнера морским транспортом определены по формуле

$$P_{мор} = ТЧЭ t_p n_p, \quad (13)$$

где ТЧЭ – тайм-чартерный эквивалент, долл./судо-сут; t_p – время рейса морского судна, сут; n_p – количество выполненных рейсов.

Время рейса морского судна определяется по формуле

$$t_p = (t_x + t_{ct}) \cdot 1,2, \quad (14)$$

где t_x – время хода морского судна с грузом, сут; t_{ct} – время стоянки морского судна в порте отправления и назначения, сут; 1,2 – коэффициент, учитывающий дополнительные простоя судна (20 %).

Время хода морского судна с грузом рассчитывается по формуле (4).

Время стоянки морского судна в порте отправления и назначения определяется по формуле

$$t_{ct} = \frac{\alpha D}{M_{погр}} + \frac{\alpha D}{M_{выгр}}. \quad (15)$$

Стоимости погрузочно-разгрузочных работ в портах назначения определены по постановлениям Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации № 71-т/1 [11] и № 3-т/1 [12] соответствующих портов перевалки груза с одного вида транспорта на другой. Сбор за перегрузку грузов из вагонов одной ширины колеи в вагоны другой ширины колеи определен по ЕТТ.

Результаты исследования

С использованием формул (1)–(15) были рассчитаны показатели доставки груза из Шан. в Нов., которые сведены в диаграммы.

На рис. 9 представлена диаграмма, отражающая сроки доставки контейнера из Шан. в Нов.; на рис. 10 – диаграмма, отражающая затраты на перемещение 40-футового контейнера различными видами транспорта из Шан. в Нов.; на рис. 11 – диаграмма, отражающая общие затраты на доставку 40-футового контейнера из Шан. в Нов.

Анализируя данные рис. 9, можно сделать вывод, что сроки доставки с осуществлением прямой смешанной перевозки при участии железнодорожного транспорта лежат в диапазоне от 23 до 29 сут, при участии автомобильного транспорта – от 17 до 24 сут. Данный факт говорит о том, что железнодорожный транспорт при определенных условиях находится на равных с автотранспортом, но в целом проигрывает ему в скорости, что зачастую является критическим фактором при выборе вида транспорта и способа перевозки. Сроки перевозки в составе контейнерных поездов находятся примерно в одном числовом диапазоне с автомобильной доставкой при условии, что в рейсе работает один водитель (23–25 сут). Разница в скорости заметна при работе автотранспорта с двумя водителями, в этом случае сроки доставки составляют 17–18 сут по схемам № 3 и 4. Использование грузовых поездов на маршрутах существенно увеличивает временные затраты на перевозку контейнера.

Анализируя данные рис. 10, можно сделать вывод, что наиболее затратной с точки

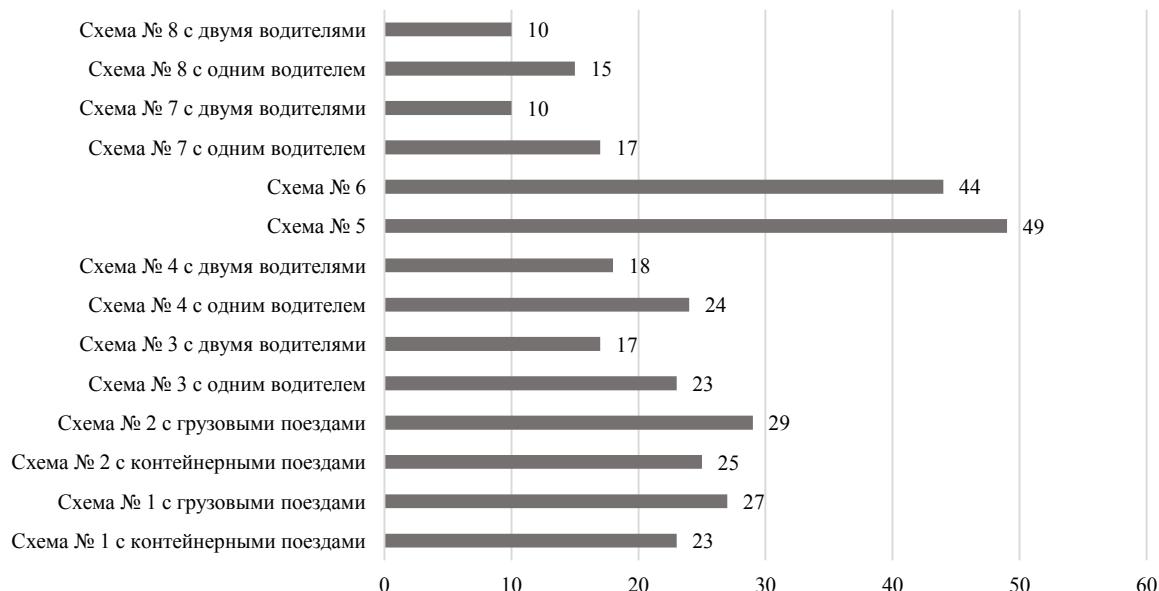


Рис. 9. Сроки доставки контейнера из Шан. в Нов., сут

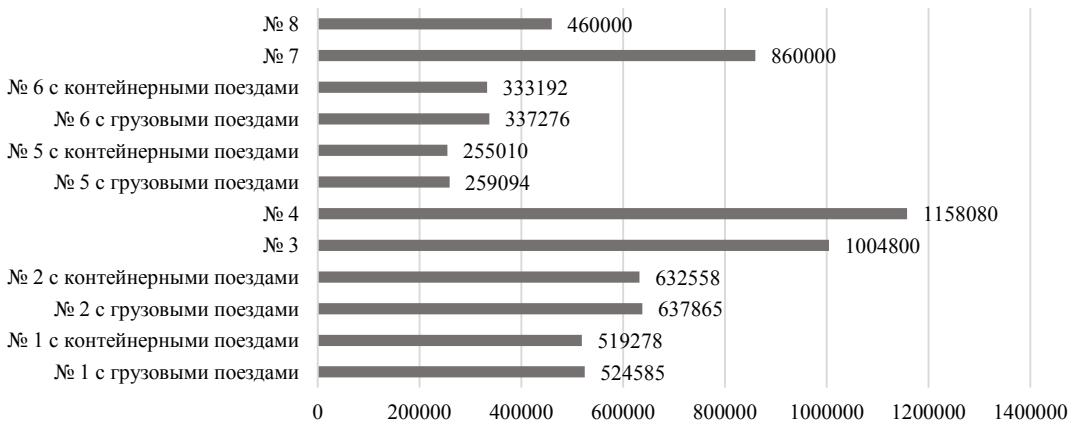


Рис. 10. Затраты на перемещение 40-футового контейнера различными видами транспорта из Шан. в Нов., р.

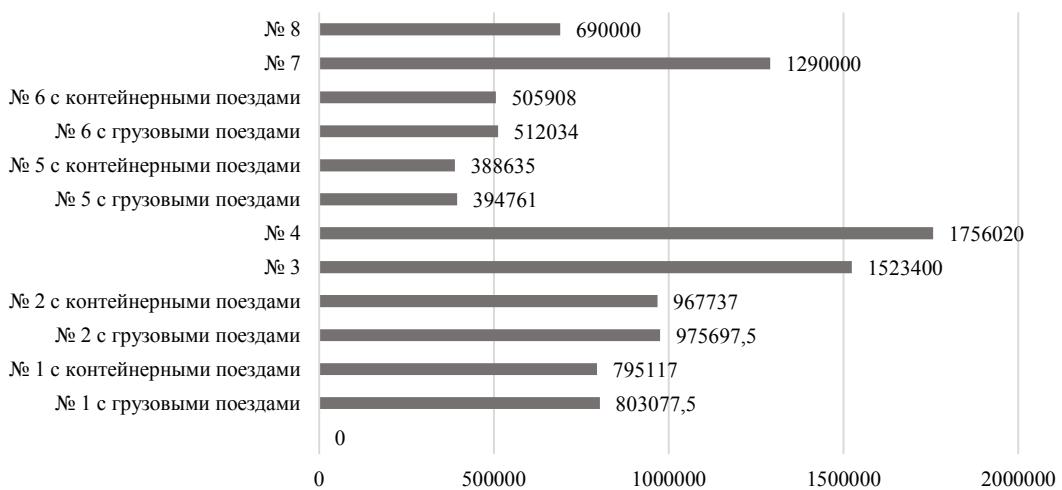


Рис. 11. Общие затраты на доставку 40-футового контейнера из Шан. в Нов., р.

зрения величины транспортных расходов на перемещение 40-футового контейнера из Шан. в Нов. схемой является логистическая цепь № 4 – смешанная перевозка с использованием морского и автомобильного видов транспорта через порт Вост. (1 158 080 р.). Самой дешевой из рассматриваемых схем является логистическая цепь поставки № 5 – прямая железнодорожная перевозка в контейнерных поездах через Заб. (255 010 р.).

При сравнении полученных данных было замечено, что мультимодальные логистические цепи поставок существенно дороже, чем унимодальные. Исключение составляет схема перевозки автотранспортом через Заб. Транспортные затраты по перемещению 40-футового контейнера для прямых железнодорожных схем через Заб. и Науш., а также прямой автомобильной перевозки через Науш. находятся в диапазоне в диапазоне от 259 000 до 460 000 р.

Анализируя данные рис. 11, можно сказать, что общие затраты на доставку 40-футового контейнера из Шан. в Нов. по исследуемым цепям поставок лежат в диапазоне от 388 000 до 1 760 000 р.

Вывод

На основании исследования сделан вывод, что по состоянию на август – сентябрь 2022 г. морской и автомобильный виды транспорта являются лимитирующими в международных цепочках поставок ввиду большой стоимости предоставления услуг по перевозке грузов. Следовательно, необходимо рассмотреть условия увеличения перевозок грузов железной дорогой через сухопутные переходы, что существенно удешевит перевозку, а при должном развитии сократит сроки доставки продукции до потребителей.

Список источников

1. Федеральная таможенная служба Российской Федерации : официальный сайт. URL: <https://customs.gov.ru/> (дата обращения: 03.08.2022).
2. Бондаренко Е. М., Гладунов В. А. «Контейнерный кризис»: причины и пути решения проблемы // Глобальные проблемы научной цивилизации, пути совершенствования : материалы XV Международной научно-практической конференции (Ставрополь, 28 февраля 2022 г.). В 2 частях. Часть 1. Ставрополь : Ставропольское издательство «Параграф», 2022. С. 448–451.
3. Скрицкий А. А. Актуальные изменения тенденций перевозок товаров из Китая в Россию в 2022–2023 гг.: концептуальный подход // Бизнес. Образование. Право. 2022. № 1 (58). С. 137–142. DOI 10.25683/VOLBI.2022.58.158.
4. Калькулятор морских расстояний // SEA-DISTANCES : [сайт]. URL: <https://sea-distances.org> (дата обращения: 04.08.2022).
5. Тарифное руководство № 4. URL: <https://tr4.info/> (дата обращения: 04.08.2022).
6. Единый транзитный тариф (с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 января 2022 г.) // Консорциум Кодекс : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902123714> (дата обращения: 04.08.2022).
7. Автодиспетчер : [сайт]. URL: <https://www.avtodispatcher.ru/> (дата обращения: 05.08.2022).
8. Правила исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом : утверждены приказом Минтранса России от 07.08.2015 № 245 (редакция от 28.12.2017) // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_195371/7e56a5d7bcd2354f625a48f146ddf2d50d752d0f/ (дата обращения: 06.08.2022).
9. Правила дорожного движения Российской Федерации // ПДД Мастер : [сайт]. URL: <https://pddmaster.ru/documents/pdd> (дата обращения: 06.08.2022).
10. Соглашение о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) и Служебная инструкция к СМГС (с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 июля 2022 г.) // ОАО «РЖД» : официальный сайт. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1816> (дата обращения: 06.08.2022).
11. Об утверждении тарифов на погрузочно-разгрузочные работы и связанные с ними услуги, тарифов на услуги буксиров при швартовных операциях в ОАО «Восточный порт» : Постановление Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации от 22 октября 2002 г. № 71-т/1 // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=308509#xPMm7UTURlzc8aT82> (дата обращения: 06.08.2022).
12. Об утверждении тарифов на погрузочно-разгрузочные работы и связанные с ними услуги в ОАО «Владивостокский морской торговый порт» : Постановление Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации от 23 июля 2003 г. № 45-т/3 (с изменениями на 6 апреля 2004 г.) // Консорциум Кодекс : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901826888> (дата обращения: 06.08.2022).

References

1. Official website of the Federal Customs Service of the Russian Federation. (In Russ.). URL: <https://customs.gov.ru/>.
2. Bondarenko E. M., Gladunov V. A. Container crisis: causes and ways of solving the problem. *Global problems of scientific civilization, ways of improvement: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference (Stavropol, February 28, 2022)*. In 2 parts. Part 1. Stavropol: Stavropol Publishing House Paragraph; 2022. P. 448–451. (In Russ.).
3. Skritsky A. A. Actual changes in trends in the transportation of goods from China to Russia in 2022–2023: a conceptual approach. *Business. Education. Right.* 2022;(58):137–142. (In Russ.). DOI 10.25683/VOLBI.2022.58.158.
4. Sea distance calculator. *SEA-DISTANCES*: [site]. (In Russ.). URL: <https://sea-distances.org>.
5. Tariff Guide No. 4. (In Russ.). URL: <https://tr4.info/>.
6. Uniform transit tariff (with amendments and additions 01.01.2022). *Consortium Code*: [site]. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902123714>.
7. Auto dispatcher: [site]. (In Russ.). URL: <https://www.avtodispatcher.ru/>.
8. Rules for calculating the terms of delivery of goods, empty freight cars by rail: approved by order of the Ministry of Transport of Russia dated 07.08.2015 No. 245 (as amended on 28.12.2017). *Consultant Plus*: [site]. (In Russ.). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_195371/7e56a5d7bcd2354f625a48f146ddf2d50d752d0f/.
9. Rules of the road of the Russian Federation. *SDA Master*: [site]. (In Russ.). URL: <https://pddmaster.ru/documents/pdd>.

10. Agreement on International Rail Freight Traffic and Service Instructions to SMGS (as amended and supplemented on 01.07.2022). *Russian Railways: official website.* (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1816>.

11. On approval of tariffs for loading and unloading operations and related services, tariffs for tugboat services during mooring operations at Joint Stock Company Vostochny Port: Decree of the Federal Energy Commission of the Russian Federation dated October 22, 2002 No. 71-t/1. *Consultant Plus: [site].* (In Russ.). URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=308509#xPMm7UTURLzc8aT82>.

12. On approval of tariffs for loading and unloading operations and related services at Commercial Port of Vladivostok: Decree of the Federal Energy Commission of the Russian Federation dated July 23, 2003 No. 45-t/3 (as amended on 06.04.2004). *Consortium Code: [site].* (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901826888>.

Информация об авторах

В. А. Гладунов – студент 4-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 – 4th year Student, Railway Transportation Management 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 16.10.2022; одобрена после рецензирования 07.11.2022; принятая к публикации 09.01.2023.

The article was submitted 16.10.2022; approved after reviewing 07.11.2022; accepted for publication 09.01.2023.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 629.4.02

doi 10.52170/1815-9265_2023_64_24

Кинематическая схема силовой гидропередачи для железнодорожных машин

Николай Николаевич Трушин

Тульский государственный университет, Тула, Россия, trushin@tsu.tula.ru

Аннотация. Цель данной работы – повышение эффективности силовых трансмиссий железнодорожных и других самоходных машин. Проект направлен на расширение функциональных и эксплуатационных возможностей гидромеханических передач на основе гидротрансформаторов. Транспортное машиностроение широко использует гидродинамические передачи – гидромуфты и гидротрансформаторы – в трансмиссиях самоходных машин различного назначения, что обусловлено их положительными свойствами. Анализические отчеты о состоянии мирового рынка гидротрансформаторов и тенденциях его дальнейшего роста в ближайшие годы свидетельствуют об устойчивой востребованности гидротрансформаторов в транспортном машиностроении. Основные их недостатки связаны с недостаточно высоким КПД по сравнению с механическими передачами и ограниченным диапазоном автоматического регулирования вращающего момента. Определенную часть мирового и российского парка локомотивов составляют тепловозы с гидравлической передачей. Это обусловлено тем, что гидропередачи обладают высокой тяговой способностью, относительно низким удельным весом и более низкой стоимостью по сравнению с электропередачами, нетребовательны к дефицитной меди. В российских и зарубежных маневровых и магистральных тепловозах нашли достаточно широкое применение многоциркуляционные гидропередачи, содержащие несколько гидродинамических передач, поочередно переключаемых в процессе движения тепловоза. При этом гидропередачи специализируются и оптимизируются для различных режимов работы и движения локомотива. Однако многоциркуляционные гидропередачи при всех своих достоинствах характеризуются высокой сложностью конструкции, большими габаритными размерами и массой, относительно большими затратами времени на переключение гидроустройств.

С целью преодоления недостатков многоциркуляционных гидропередач предложена принципиальная кинематическая схема однопоточной гидропередачи на основе модифицированного двухступенчатого гидротрансформатора, содержащего турбины осевого и центростремительного типа. Элементы управления гидротрансформатором обеспечивают независимую или совместную работу турбин. В диапазоне передаточных отношений от 0 до 0,6 работает первая турбина осевого типа, а в диапазоне передаточных отношений выше 0,6 и в режиме гидромуфты – турбина центростремительного типа. Конструкция гидротрансформатора предусматривает также два реактора, оптимизируемых для работы с первой или второй турбиной.

Проектирование гидропередачи осуществлялось на основе методов теории машин и механизмов, кинематического синтеза приводов рабочих органов машин по результатам анализа широкого спектра конструкторских разработок, теоретических и экспериментальных исследований в области гидродинамических передач и трансмиссий машин. Предложенное схемотехническое решение, по сравнению с аналогичными конструкциями, позволяет сделать гидропередачи более компактными и менее материалоемкими. Новизна и оригинальность разработанного технического решения защищены патентом РФ.

Ключевые слова: трансмиссия, гидродинамический трансформатор, гидромеханическая передача, кинематическая схема

Для цитирования: Трушин Н. Н. Кинематическая схема силовой гидропередачи для железнодорожных машин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 24–34. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_24.

TRANSPORT

Original article

Hydraulic power transmission kinematic layout for railway vehicles

Nikolay N. Trushin

Tula State University, Tula, Russia, trushin@tsu.tula.ru

Abstract. The purpose of this study is to improve the efficiency of power transmissions used in railroad and other self-propelled vehicles. The project is intended to expand the functionality and improve the performance of torque converter-based hydro-mechanical transmissions. Hydrodynamic transmissions with fluid couplings and torque converters are extensively used in self-propelled vehicles due to their significant advantages. Analytical reports claim the global torque converter market will grow in the years to come. It shows a sustainable demand for torque converters used in vehicles. The key disadvantages of torque converters are insufficient efficiency as compared to mechanical transmissions, and limited auto torque range. There are some diesel locomotives with hydraulic transmissions in service. The reason is that hydraulic transmissions feature high traction, relatively low specific weight, and lower cost compared to electric transmissions, and do not require scarce copper. Shunting and mainline diesel locomotives use multi-loop hydraulic transmissions containing several hydrodynamic transmissions alternately switched as the diesel locomotive runs. The hydraulic transmissions are optimized for specific locomotive driving conditions. Despite all their advantages, multi-loop hydraulic transmissions are complicated, large, and heavy, while the switching is slow.

To overcome the disadvantages of multi-loop hydraulic transmissions we proposed new kinematics of a single-circulation hydraulic transmission using a modified two-stage hydraulic torque converter with axial and inflow turbines. The torque converter controls to support the independent or joint operation of the turbines. The first axial turbine operates in the 0...0.6 gear ratio range, and the inflow turbines operate when the gear ratio exceeds 0.6. The torque converter also includes two reactors optimized for joint operation with the first or second turbine.

To design the hydrodynamic transmission, we applied the theory of machines and mechanisms, and machine drives synthesis principles, and analyzed a wide range of existing designs, and basic and experimental research in hydrodynamic transmissions. The proposed solution makes hydrodynamic transmissions more compact and lighter than other similar designs. The proposed solution is patented in Russia.

Keywords: transmission, hydrodynamic torque converter, hydro-mechanical transmission, kinematic scheme

For citation: Trushin N. N. Hydraulic power transmission kinematic layout for railway vehicles. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):24–34. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_24.

Введение

Тепловозы и электровозы являются основой железнодорожного транспорта. Тепловозы с электропередачей составляют большую часть российского тепловозного парка. На маневровой и поездной работе, на подъездных путях промышленных предприятий работают также тепловозы с гидропередачами. В основном это маневровые тепловозы из семейства ТГМ, серийный выпуск которых начался в середине и конце 1950-х гг. после прекращения производства паровозов [1]. Гидропередачи устанавливаются не только на тепловозы, но и на менее тяжелые железнодорожные машины: дизель-поезда, мотовозы, дрезины, автомотрисы. Каждый тип передачи тепловоза, электрическая или гидравлическая, обладает своими достоинствами и недостатками. К положительным свойствам гидропередач (по сравнению с электрическими передачами) относятся высокая тяговая способность, относительно низкий удельный вес, нетребовательность к дефицитной меди, более низкая стоимость.

Центральными элементами отечественных и зарубежных гидропередач для тепловозов и других железнодорожных машин являются гидродинамические машины – гидромуфты и гидротрансформаторы. Плавность трогания с места и перехода с одного режима на другой, широкий диапазон регулирования

частоты вращения ведомого вала при сохранении постоянной частоты вращения ведущего вала, ограничение крутильных колебаний и защита от толчков, возникающих во всем приводе, практически полное отсутствие износа деталей – все это обусловило широкое распространение гидродинамических передач в приводах широкого спектра мобильных и стационарных машин различного назначения [2, 3].

Конкурирующие с гидродинамическими гидростатические (или гидрообъемные) передачи применяются в силовом приводе тепловозов очень ограниченно. Несмотря на свои положительные свойства, они не получили широкого распространения в тепловозах по причине высокой сложности и стоимости. На отечественных тепловозах гидростатические передачи применяются только для приводов вспомогательных механизмов.

Материалы и методы исследования

Поскольку и маневровые, и магистральные тепловозы работают в широких диапазонах нагрузок и скоростей, то характеристики гидротрансформатора или гидромуфты в отдельности не могут обеспечить необходимой тяговой характеристики. Поэтому гидропередачи тепловозов было принято выполнять с несколькими гидродинамическими передачами: с двумя-четырьмя гидротрансформаторами, с гидротранс-

форматорами и гидромуфтами, с гидротрансформатором или гидромуфтой и с механической коробкой скоростей [4].

Гидропередача, содержащая один универсальный гидротрансформатор, получила наименование одноциркуляционной, а гидропередача, в которой установлены две и более гидродинамические машины, – многоциркуляционных [2]. Кроме гидродинамической передачи, тепловозная гидропередача содержит механические (зубчатые) передачи, устройства управления (сцепные муфты), гидравлическую систему питания гидромашин и смазки.

Первые многоциркуляционные гидропередачи были сконструированы в 1930-х гг. и представляли собой комбинацию гидротрансформатора и гидромуфты. Гидротрансформатор обеспечивал плавное трогание и разгон трансмиссии, а гидромуфта использовалась при установившемся движении. Впоследствии функции таких гидропередач стали выполнять комплексные гидротрансформаторы.

Многоциркуляционные передачи много лет применяются на отечественных и зарубежных тепловозах, обладая очень высокой нагрузочной способностью: в некоторых гидропередачах тепловозов передаваемая мощность достигает 3 600 кВт (~5 000 л. с.). В многоциркуляционных гидропередачах гидродинамические машины специализируются и оптимизируются для различных режимов работы тепловоза: маневрового или поездного, пускового или маршевого. Многоциркуляционные гидропередачи работают с поочередным автоматическим заполнением и опорожнением гидроаппаратов в зависимости от условий движения тепловоза. Как правило, в тепловозных гидропередачах применяются двух- и трехступенчатые гидротрансформаторы типа Lysholm-Smith, первые образцы которых были сконструированы еще в 1920-е гг. в Швеции инженером А. Лисхольмом [5, 6]. Впоследствии многоступенчатые гидротрансформаторы были клонированы в Великобритании, Германии, США, Японии, СССР.

Многоциркуляционные гидропередачи при всех своих достоинствах характеризуются высокой сложностью конструкции, большими габаритными размерами и массой. На заполнение и опорожнение гидромашин затрачивается достаточно большое время. Вследствие этого в наземном транспорте они применя-

ются только в железнодорожных машинах, а также в приводах гребных винтов на речных и морских судах [7, 8]. В настоящее время в российских тепловозах применяются унифицированные гидропередачи типа УГП-750/1200, используемые на маневровых тепловозах семейств ТГМ-4 и ТГМ-6 с номинальной мощностью двигателя 750 и 1 200 л. с. соответственно [9]. Эти гидропередачи, в зависимости от исполнения, содержат один или два двухступенчатых гидротрансформатора и одну гидромуфту с различными параметрами. Масса гидропередачи УГП-750/1200 в различных исполнениях составляет 5 400...5 600 кг, что также свидетельствует о высокой степени сложности и материалоемкости данной передачи. На тепловозах с мощностью двигателя до 500 л. с. применялись также унифицированные гидропередачи семейства УГП-350/500, содержащие один гидротрансформатор и две гидромуфты.

Первые серийные отечественные гидропередачи для тепловозов были спроектированы и запущены в производство в середине 1950-х гг. В процессе серийного выпуска гидропередачи неоднократно модернизировались, но их принципиальная кинематическая схема и конструкция оставались неизменными. Некоторое распространение в отечественном локомотивостроении получили импортные гидропередачи компании Voith Turbo (Германия), которая имеет богатый многолетний опыт в проектировании и производстве гидродинамических машин и гидропередач. Гидропередачи Voith характеризуются высокими технико-экономическими показателями, однако в условиях импортозамещения и локализации производства в России сложной и наукоемкой техники необходима ориентация российской промышленности на создание собственных оригинальных машин. Тем более что Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, принятая еще в 2008 г., предполагает интенсивное количественное и качественное обновление локомотивного парка страны.

Многоциркуляционные гидропередачи для тепловозов обычно содержат многоступенчатые гидротрансформаторы типа Lysholm-Smith, не имеющие режима гидромуфты. Некоторые модели тепловозных гидропередач оснащаются одноступенчатыми (с одной турбиной) комплексными гидротрансформаторами автомо-

бильного типа, способными автоматически переходить в режим гидромуфты. Однако коэффициент трансформации одноступенчатых гидротрансформаторов не превышает $K = 3\dots 4$ [10, 11].

Схема трехступенчатого гидротрансформатора Lysholm-Smith представлена на рис. 1. На схеме обозначены: IS – входной (ведущий) вал; OS – выходной (ведомый) вал; P – насос; T1, T2, T3 – турбины первой, второй и третьей ступени соответственно; S1, S2 – неподвижные реакторы. Стрелками показано направление циркуляции рабочей жидкости. В некоторых исполнениях гидротрансформатора на выходе рабочей жидкости из турбины T3 может устанавливаться третий реактор. Существуют также двухступенчатые варианты данного гидротрансформатора.

Многоступенчатые гидротрансформаторы обладают более высокими преобразующими свойствами ($K = 4,5\dots 5,5$ и более) относительно одноступенчатых конструкций. В многоступенчатых гидротрансформаторах две или три турбины одновременно соединены с выходным валом и врачаются с одинаковой угловой скоростью. Высокие преобразующие свойства многоступенчатых гидротрансформаторов обуслов-

лены наличием в их конструкциях двух или трех турбин разного типа. Турбина центробежного типа показывает наилучшие свойства в диапазоне малых передаточных отношений ($0\dots 0,3$), турбина осевого типа – в зоне средних передаточных отношений ($0,3\dots 0,6$), а турбина центро斯特ремительного типа – в диапазоне высоких передаточных отношений (более 0,6) и в режиме гидромуфты [12]. В области малых передаточных отношений многоступенчатые гидротрансформаторы обладают более высоким КПД по сравнению с одноступенчатыми конструкциями, но в области высоких передаточных отношений КПД снижается. Высокое значение коэффициента трансформации многоступенчатого гидротрансформатора позволяет сократить количество ступеней в механической коробке передач, упростить кинематическую схему трансмиссии и ее систему управления. Многоступенчатые гидротрансформаторы в разные годы применялись в трансмиссиях не только железнодорожных машин, но и тяжелых автомобилей, автобусов, тракторов, танков и др. [3, 4].

Многоступенчатые гидротрансформаторы имеют и определенные ограничения. В таких гидротрансформаторах с каждой турбиной должен быть сопряжен отдельный реактор,

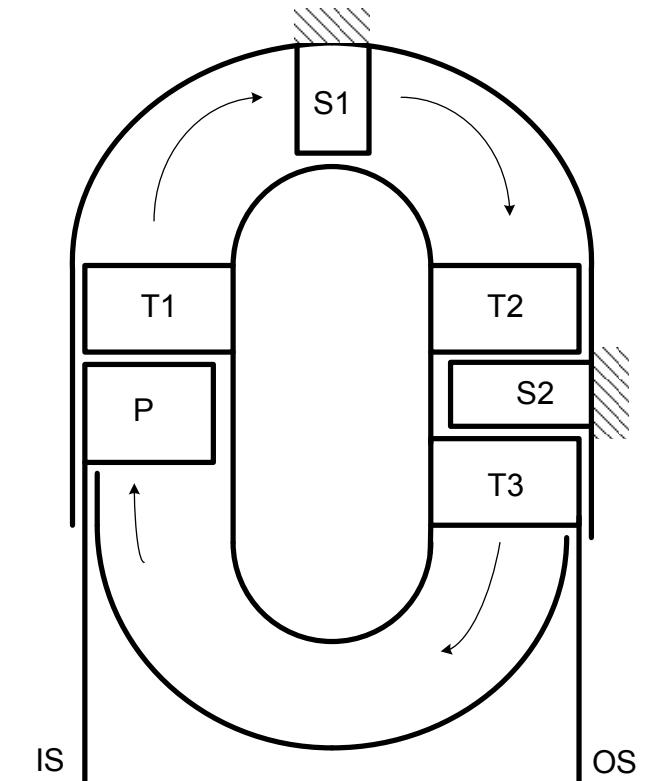


Рис. 1. Схема трехступенчатого гидротрансформатора Lysholm-Smith

чтобы вращающие моменты, возникающие на каждой турбине, имели одинаковое направление. Геометрические параметры и профили лопаток рабочих колес и реакторов многоступенчатого гидротрансформатора выбираются из компромиссных соображений, поскольку все турбинные колеса жестко соединены с выходным валом и вращаются с одинаковой угловой скоростью [13]. Указанные особенности многоступенчатых гидротрансформаторов ограничили их широкое применение в транспортном машиностроении. Поэтому обеспечение энергетической эффективности гидропередач во всем диапазоне трансформации вращающего момента двигателя, в зависимости от величины внешней нагрузки, остается актуальной научно-технической задачей. Также актуальной задачей является снижение материоемкости гидропередач.

Другим направлением повышения энергетической эффективности гидротрансформаторов являются многотурбинные конструкции, в которых две или три турбины разного типа вращаются с разными угловыми скоростями, а суммирование моментов от турбин осуществляется через зубчатые передачи планетарного или непланетарного типов. Некоторое распространение в транспортном машиностроении получили двухтурбинные гидротрансформаторы с турбинами осевого и центробежного типа, сконструированные

в 50–60-е гг. XX в. компаниями General Motors и Allison Transmission [13, 14]. Фактически многотурбинные гидротрансформаторы являются гидромеханическими передачами из-за присутствия в их конструкции зубчатых передач. Если в трансмиссиях легковых автомобилей многоступенчатые и многотурбинные гидротрансформаторы не получили распространения, то в трансмиссиях тяжелых наземных транспортных и транспортно-технологических машин такие гидротрансформаторы продолжают использоваться и в настоящее время.

На рис. 2 приведена кинематическая схема двухтурбинного комплексного гидротрансформатора (с режимом гидромуфты) с непланетарным суммирующим механизмом. На данной схеме и последующей обозначены: IS – входной и выходной валы соответственно; T1 и T2 – осевая и центробежная турбины соответственно; Z1, Z2, Z3, Z4 – зубчатые колеса; M1, M2 – механизмы (муфты) свободного хода. Механизм M2 автоматически отключает турбину T1 от выходного вала в невыгодном для нее режиме работы в области высоких передаточных отношений гидротрансформатора. Передаточное число зубчатой передачи Z1–Z2 близко к единице, а передаточное число зубчатой передачи Z3–Z4 равно примерно 2,2. Вместо механизма свободного хода M2 может применяться управляемая сцепная муфта.

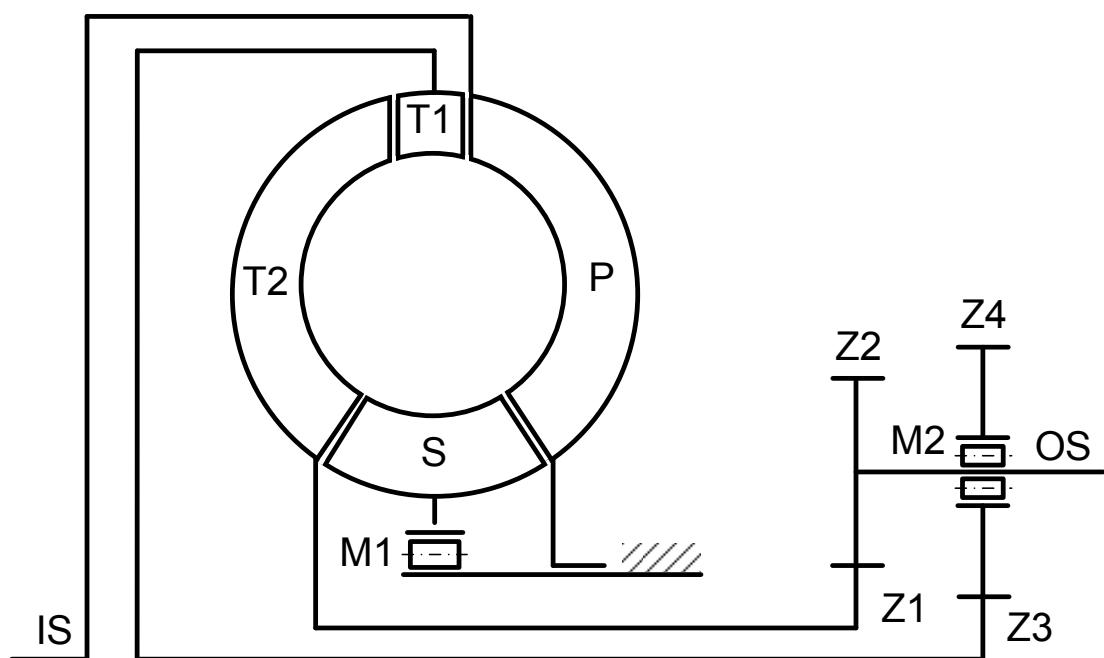


Рис. 2. Схема двухтурбинного гидротрансформатора с непланетарным суммирующим механизмом

На рис. 3 приведена кинематическая схема другого варианта двухтурбинного комплексного гидротрансформатора, оснащенного планетарным суммирующим механизмом с парными сателлитами типа Ravigneaux. Здесь зубчатые колеса Z1 и Z3 – солнечные, колеса Z2 и Z4 – сателлиты, водило планетарного механизма соединено с выходным валом. В этой схеме механизм свободного хода M2 останавливает турбину T2 и солнечную шестерню Z1 в диапазоне малых передаточных отношений. При этом планетарный механизм работает как понижающая передача, передающая врачающий момент от турбины T1 на выходной вал. В режиме гидромуфты обе турбины передают движение через планетарный механизм на выходной вал.

Поскольку турбины в многотурбинных гидротрансформаторах вращаются с разными угловыми скоростями, то профилирование лопаток турбин может выполняться более благоприятным образом в отличие от многоступенчатых гидротрансформаторов.

Аналогичные конструкции гидротрансформаторов были клонированы в СССР и ЧССР. Двухтурбинные гидротрансформаторы были применены в трансмиссиях тяжелых ковшовых погрузочно-транспортных машин ПД-8 и ПД-12 грузоподъемностью 8 и 12 т соответственно, спроектированных в НИПИГОРМАШ (г. Свердловск, ныне Екатеринбург). Двухтурбинный гидротрансформатор здесь был выполнен по

схеме, приведенной на рис. 2 [15]. В ЧССР изготавливались лицензионная автомобильная гидромеханическая передача модели МТ40 с двухтурбинным гидротрансформатором, выполненным по схеме рис. 3 [16]. В данной гидропередаче режим заднего хода осуществлялся путем реверсирования гидротрансформатора за счет изменения порядка соединения рабочих колес с выходным валом. Коллективом специалистов из СССР (НАМИ) и ЧССР (завод «Прага») были сконструированы усовершенствованные двухтурбинные гидротрансформаторы по схеме рис. 3 [17].

В настоящее время двухтурбинные гидротрансформаторы применяются в трансмиссиях ковшовых колесных погрузчиков LW420F, ZL50 и ZL60 компании XCMG (КНР) грузоподъемностью 4, 5 и 6 т соответственно. Гидротрансформаторы здесь выполнены по схеме рис. 2 [18]. Собственные патентные исследования показали, что за последние 20 лет в КНР было получено порядка 30 патентов на изобретения и полезные модели, связанные с конструкциями двухтурбинных гидротрансформаторов и гидромеханическими передачами на их основе.

В таблице приведены конфигурации рабочих элементов и значения коэффициентов трансформации для многоступенчатых и многотурбинных гидротрансформаторов, предназначенных для трансмиссий тяжелых самоходных машин.

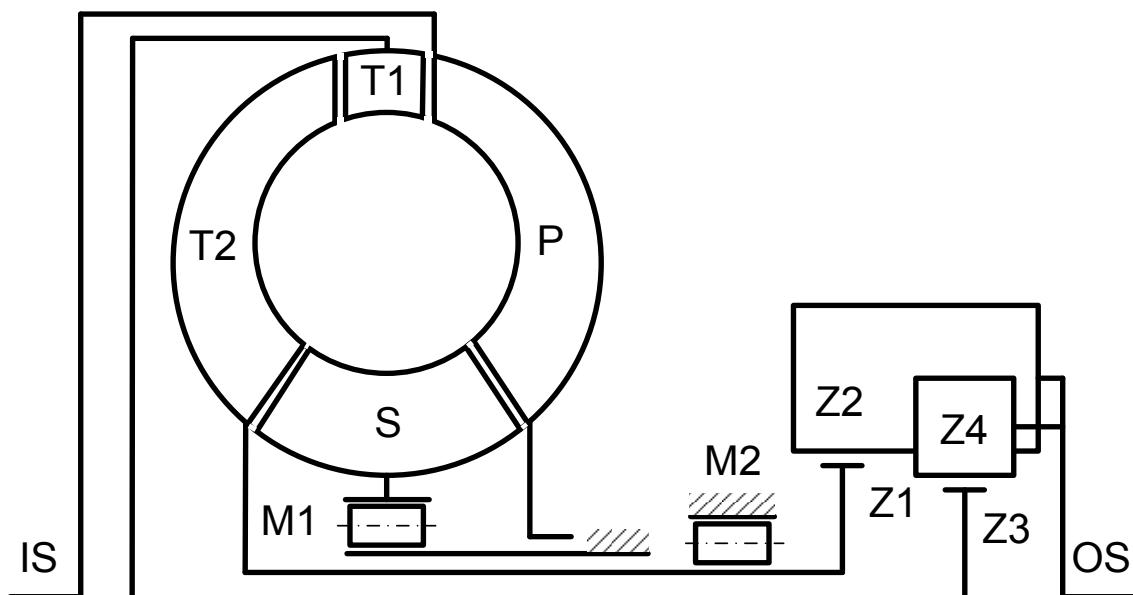


Рис. 3. Схема двухтурбинного гидротрансформатора с планетарным суммирующим механизмом

Коэффициенты трансформации для многоступенчатых и многотурбинных гидротрансформаторов

Тип гидротрансформатора	Конфигурация рабочих элементов гидротрансформатора	Коэффициент трансформации
Двухступенчатый Lysholm-Smith	P-T1-S1-T2 или P-T1-S1-T2-S2	4,2
Трехступенчатый Lysholm-Smith	P-T1-S1-T2-S2-T3 или P-T1-S1-T2-S2-T3-S3	5,5
Двухтурбинный Allison	P-T1-T2-S	5,4
Двухтурбинный MT40 (GM-Drive)	P-T1-T2-S	5,8
Двухтурбинный ПД-8/ПД-12	P-T1-T2-S	5,0
Двухтурбинный НАМИ-Прага	P-T1-T2-S или P-T1-T2-S1-S2	6,2
Двухтурбинный XCMG	P-T1-T2-S	4,2

Примечание. Рабочие элементы гидротрансформатора: P – насос; T1, T2, T3 – первая, вторая, третья турбина; S, S1, S2 – реакторы.

Результаты исследования

С целью совместить в одной конструкции позитивные свойства многоступенчатых и многотурбинных гидротрансформаторов была разработана принципиальная кинематическая схема гидропередачи, защищенная патентом РФ № 2716378 [19]. Спроектированная гидропередача может быть реализована и в силовых трансмиссиях железнодорожных машин.

На рис. 4 представлена кинематическая схема гидропередачи в варианте с двухступенчатым гидротрансформатором, имеющим две турбины осевого и центробежного типов, два переключаемых реактора и четыре устройства управления в виде двух фрикционных муфт и двух тормозов. Зубчатые передачи в

конструкции гидропередачи отсутствуют, а суммирование моментов от турбин происходит непосредственно на выходном валу. Гидротрансформатор имеет симметрично расположенные насос и турбину центробежного типа для обеспечения эффективной работы гидротрансформатора в режиме гидромуфты.

В качестве прототипов для проектирования использовались двухтурбинные гидротрансформаторы компаний General Motors и Allison Transmission, в которых сопряжение первой турбины осевого типа с выходным валом осуществляется через самоуправляемую муфту свободного хода. Кроме этого, прототипы имели сложный механизм поворота лопаток реактора с целью оперативного изменения свой-

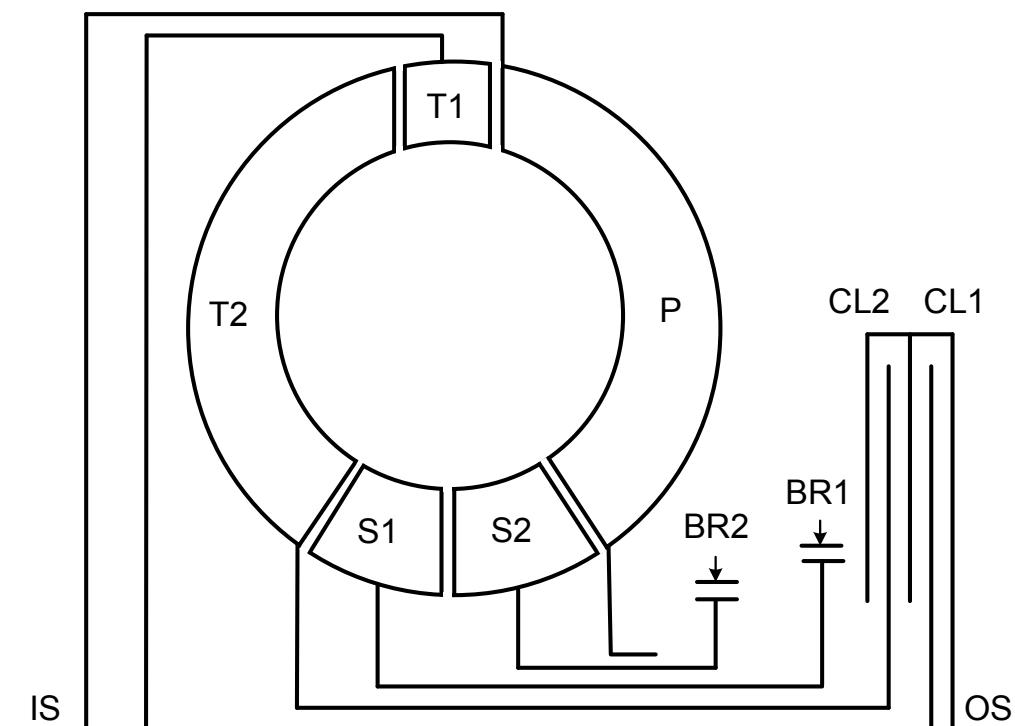


Рис. 4. Кинематическая схема гидропередачи

ства прозрачности и нагрузочной способности гидротрансформатора [13, 14]. Введение в состав гидротрансформатора управляемых муфт и переключаемых реакторов позволяет расширить эксплуатационные возможности трансмиссии самоходной машины относительно прототипов.

Гидропередача содержит двухступенчатый гидротрансформатор, соединенный с входным (ведущим) валом IS. Гидротрансформатор содержит насос Р центробежного типа, турбину T1 первой ступени осевого типа, турбину T2 второй ступени центро斯特ремительного типа. Обе турбины посредством муфт CL1 и CL2 соединяются с выходным (ведомым) валом OS. Ведомый вал далее соединяется с реверс-режимным редуктором.

Реакторная часть гидротрансформатора состоит из двух реакторов S1 и S2. Каждый реактор с помощью тормозов BR1 и BR2 может быть остановлен. Включение одного из тормозов означает активацию одного из реакторов, при этом каждый из реакторов предназначен для совместной оптимальной работы с одной из турбин. В принципе, реактор может быть и один, если его параметры удовлетворяют режимам работы с каждой из турбин.

Работа гидропередачи осуществляется следующим образом. В диапазоне передаточных отношений от 0 до 0,6 работает турбина T1 осевого типа, а в диапазоне передаточных отношений выше 0,6 и в режиме гидромуфты – турбина T2 центро斯特ремительного типа. Система управления одновременно включает, например, муфту CL1 и тормоз BR1 либо муфту CL2 и тормоз BR2. В процессе трогания и разгона тепловоза по мере увеличения передаточного отношения гидротрансформатора происходит последовательное включение турбины T2 и отключение турбины T1 с одновременным переключением соответствующих им реакторов. В диапазоне средних передаточных отношений обе турбины могут работать совместно при одновременном включении муфт CL1 и CL2. Какой реактор (S1 или S2) при этом будет активным, определяется его свойствами. Таким образом, турбина T1 выполняет функцию пускового гидротрансформатора в многоциркуляционной гидропередаче, а турбина T2 – маршевого гидротрансформатора. В случае

малой нагрузки на трансмиссию трогание и разгон тепловоза может производиться только при помощи турбины T2.

График изменения коэффициентов трансформации и, соответственно, вращающих моментов на турбинах гидротрансформатора в зависимости от передаточного отношения i представлен на рис. 5 [20]. На приведенном графике K_1 и K_2 – коэффициенты трансформации турбин T1 и T2 соответственно. Как видно из графика, отключение турбины T2 от выходного вала в диапазоне малых передаточных отношений необходимо, так как угловая скорость и направление момента на турбине T2 не совпадают с аналогичными параметрами на турбине T1. В зоне средних передаточных отношений турбины уже могут работать совместно, а в зоне высоких передаточных отношений и в режиме гидромуфты турбина T1 отключается от выходного вала и свободно вращается в потоке рабочей жидкости.

Для осуществления режима гидромуфты включаются муфты CL1, CL2 и оба тормоза BR1 и BR2 выключены. В этом случае движение на выходной вал передается через турбину T2, а турбина T1 и реакторы свободно вращаются в потоке рабочей жидкости. Согласованное автоматическое включение и выключение муфт и тормозов осуществляется от гидравлической системы питания гидротрансформатора.

Максимальное значение коэффициента трансформации гидротрансформатора при работе только турбины T1 оценивается как $K_1 = 4,5 \dots 6$ в зависимости от геометрических параметров лопаток турбины и соответствующего ей реактора. При работе только второй турбины T2 максимальное значение коэффициента трансформации оценивается как $K_2 = 3,2 \dots 3,6$ так же в зависимости от параметров лопаток. Приведенные значения коэффициентов трансформации соответствуют параметрам серийных одноступенчатых гидротрансформаторов с турбинами осевого и центро斯特ремительного типов [3, 4, 10, 11, 21]. Максимальное значение КПД спроектированного гидротрансформатора в режиме трансформации момента оценивается как 85 %, а в режиме гидромуфты – 95...98 % исходя из свойств известных конструкций гидротрансформаторов.

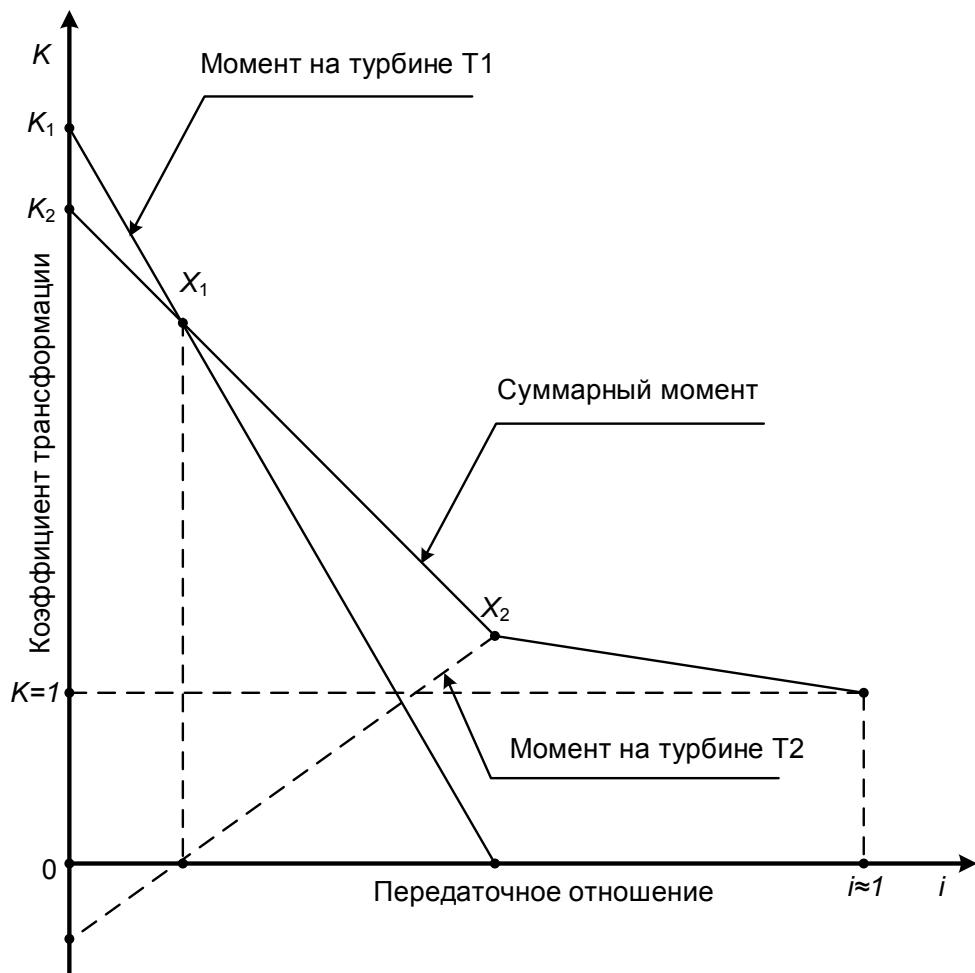


Рис. 5. Примерный график изменения врачающих моментов на турбинах гидротрансформатора

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Спроектированная гидропередача по сравнению с традиционными конструкциями обладает более благоприятными эксплуатационными возможностями, поскольку содержит один гидротрансформатор, который сочетает свойства и одноступенчатых, и многоступенчатых гидротрансформаторов.

2. По сравнению с многоциркуляционными передачами предлагаемое решение при прочих равных условиях характеризуется

уменьшенными габаритными размерами и массой, отсутствием затрат времени на заполнение и опорожнение гидромашин.

3. Независимая работа двух турбин и соответствующих им двух реакторов позволяет оптимальным образом спрофилировать их лопатки и тем самым обеспечить достаточно высокие значения КПД во всем диапазоне передаточных отношений гидротрансформатора.

4. При практической реализации данного проекта возможно использование элементов рабочих колес от серийных гидротрансформаторов.

Список источников

1. Маневровые тепловозы / Г. Я. Белобаев, В. И. Бурьяница, М. К. Гавриленко [и др.] ; под ред. Л. С. Назарова. Москва : Транспорт, 1977. 408 с.
2. Кочкирев А. Я. Гидродинамические передачи : учебное пособие для вузов. Ленинград : Машиностроение, 1971. 336 с.
3. Гавриленко Б. А., Семичастнов И. Ф. Гидродинамические муфты и трансформаторы. Москва : Машиностроение, 1969. 392 с.

4. Семичастнов И. Ф. Гидравлические передачи тепловозов. Москва : Машгиз, 1961. 332 с.
5. Нарбут А. Н. Особенности развития гидродинамических передач самоходных машин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. Москва : Издательство МАДИ, 2015. № 4 (43). С. 17–24.
6. Ломакин Н. Н., Трушин Н. Н. История изобретения и развития гидродинамического трансформатора А. Лисхольма // Проблемы истории и философии науки и техники. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2021. С. 81–86.
7. Хуршудян Г. М. Гидравлические преобразователи крутящего момента. Ленинград : Судпромгиз, 1963. 267 с.
8. Судовые энергетические установки. Судовые дизельные энергетические установки : учебник / В. К. Румб, Г. В. Яковлев, Г. И. Шаров [и др.]. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2007. 622 с.
9. Гидродинамические передачи : Проектирование, изготовление, эксплуатация / Б. А. Гавриленко, И. Ф. Семичастнов, Л. И. Рымаренко [и др.]. Москва : Машиностроение, 1980. 224 с.
10. Лапидус В. И. Автомобильные гидротрансформаторы. Москва : Машиностроение, 1971. 160 с.
11. Трусов С. М. Автомобильные гидротрансформаторы. Москва : Машиностроение, 1977. 271 с.
12. Лапидус В. И., Петров А. В. Гидромеханические передачи автомобилей. Москва : Машгиз, 1961. 495 с.
13. Мазалов Н. Д., Трусов С. М. Гидромеханические коробки передач автомобилей. Москва : Машиностроение, 1971. 290 с.
14. Нарбут А. Н. Гидромеханические передачи автомобилей : учебное пособие. Москва : Гринлайт+, 2010. 192 с.
15. Ковшевые погрузочно-транспортные машины / П. А. Корляков, Г. С. Кордюков, Ю. Н. Павлов [и др.]. Москва : Недра, 1980. 200 с.
16. Бим-Бад Б. М. Автомобильные гидромеханические передачи ЧССР // Автомобильная промышленность. 1980. № 7. С. 30–31.
17. Новый двухтурбинный гидротрансформатор и его характеристики / С. М. Трусов, П. И. Баженов, Ю. К. Есеновский-Пашков [и др.] // Автомобильная промышленность. 1983. № 7. С. 17–18.
18. Трушин Н. Н. Проектные решения в области кинематических схем гидромеханических передач транспортных и технологических машин // Автомобилестроение : проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства. Ижевск : Издательство Управления информационных ресурсов Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова, 2021. С. 413–418.
19. Патент 2716378 Российской Федерации, МПК F16H 41/22, F16H 45/02, F16H 61/14, F16H 61/62. Гидромеханическая передача транспортного средства : № 2019132137 : заявл. 10.10.2019 ; опубл. 10.03.2020 / Н. Н. Трушин. 12 с.
20. Петров А. В. Планетарные и гидромеханические передачи колесных и гусеничных машин. Москва : Машиностроение, 1966. 383 с.
21. Брацлавский Х. Л. Гидродинамические передачи строительных и дорожных машин. Москва : Машиностроение, 1976. 149 с.

References

1. Belobaev G. Ya., Buryanitsa V. I., Gavrilenco M. K. [et al.]; Nazarov L. S., ed. Shunting locomotives. Moscow: Transport; 1977. 408 p. (In Russ.).
2. Kochkarev A. Ya. Hydrodynamic transmissions: textbook for universities. Leningrad: Mashinostroenie; 1971. 336 p. (In Russ.).
3. Gavrilenco B. A., Semichastnov I. F. Hydrodynamic couplings and converters. Moscow: Mashinostroenie; 1969. 392 p. (In Russ.).
4. Semichastnov I. F. Hydraulic locomotives transmissions. Moscow: Mashgiz; 1961. 331 p. (In Russ.).
5. Narbut A. N. Features of Hydrodynamic Transfer Propelled Machines. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University*. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University Publishing House; 2015. No. 43 (4). P. 17–24. (In Russ.).
6. Lomakin N. N., Trushin N. N. History of Invention and Evolution of A. Lysholm Hydrodynamic Converter. *Problems of History and Philosophy of Science and Technology*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2021. P. 81–86. (In Russ.).
7. Khurshudyan G. M. Hydraulic torque converters. Leningrad: Sudpromgiz; 1963. 267 p. (In Russ.).

8. Rumb V. K., Yakovlev G. V., Sharov G. I. [et al.]. Ship power plants. Ship diesel power plants: textbook. Saint-Petersburg: Saint- Petersburg State Marine Technical University; 2007. 622 p. (In Russ.).
9. Gavrilenco B. A., Semichastnov I. F., Rymarenko L. I. [et al.]. Hydrodynamic Transmissions: Design, Manufacturing, Operation. Moscow: Mashinostroenie; 1980. 224 p. (In Russ.).
10. Lapidus V. I. Automotive torque converters. Moscow: Mashinostroenie; 1971. 160 p. (In Russ.).
11. Trusov S. M. Automotive torque converters. Moscow: Mashinostroenie; 1977. 271 p. (In Russ.).
12. Lapidus V. I., Petrov A. V. Automotive Hydro-Mechanical Transmissions. Moscow: Mashgiz; 1961. 495 p. (In Russ.).
13. Mazalov N. D., Trusov S. M. Hydro-Mechanical Automotive Gear Boxes. Moscow: Mashinostroenie; 1971. 290 p. (In Russ.).
14. Narbut A. N. Automotive Hydro-Mechanical Transmissions: textbook. Moscow: Greenlight+; 2010. 192 p. (In Russ.).
15. Korlyakov P. A., Kordyukov G. S., Pavlov Yu. N. [et al.]. Bucket loaders and transport vehicles. Moscow: Nedra; 1980. 200 p. (In Russ.).
16. Bim-Bad B. M. Automotive Hydro-Mechanical Transmissions of Czechoslovak Socialist Republic. *Automotive Industry*. 1980;(7):30–31. (In Russ.).
17. Trusov S. M., Bazhenov P. I., Yesenovsky-Lashkov Yu. K. [et al.]. New Twin-turbine torque converter and his features. *Automotive Industry*. 1983;(7):17–18. (In Russ.).
18. Trushin N. N. Project solutions in the field of kinematic schemes of hydro-mechanical transmissions for transport and technological machines. *Automotive engineering: design, construction, calculation and repair and production technologies*. Izhevsk: Publishing House of the Information Resources Office Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov; 2021. P. 413–418. (In Russ.).
19. Trushin N. N. Patent 2716378 Russian Federation. CPC F16H 41/22; F16H 45/02; F16H 61/14; F16H 61/62. Hydro mechanical Transmission of a Vehicle. Application: 2019132137, 10.10.2019. Effective date for property rights: 10.10.2019. Date of publication: 10.03.2020. 12 p. (In Russ.).
20. Petrov A. V. Planetary and hydro mechanical gears of wheel and tractor machines. Moscow: Mashinostroenie; 1966. 383 p. (In Russ.).
21. Bratslavsky Kh. L. Hydrodynamic transmissions of construction and road machines Moscow: Mashinostroenie; 1976. 149 p. (In Russ.).

Информация об авторе

Н. Н. Трушин – профессор кафедры «Технология машиностроения» Тульского государственного университета, доктор технических наук.

Information about the author

N. N. Trushin – Professor of the Machine Building Department, Tula State University, Doctor of Engineering.

Статья поступила в редакцию 21.10.2022; одобрена после рецензирования 15.11.2022; принята к публикации 09.01.2023.

The article was submitted 21.10.2022; approved after reviewing 15.11.2022; accepted for publication 09.01.2023.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.222.3

doi 10.52170/1815-9265_2023_64_35

Определение перерабатывающей способности мест погрузки, оборудованных вагоноопрокидывателями для работы в зимних условиях

Павел Станиславович Бурдяк^{1✉}, Александра Дмитриевна Калидова²

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

¹ BurdyakPS@mail.ru

² alexsandra_kd@bk.ru

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос выбора параметров мест выгрузки угля, оборудованных вагоноопрокидывателями в зимних условиях, которые являются ограничивающими при расчете перерабатывающей способности, так как в технологическом процессе выгрузки появляются дополнительные операции по разогреву вагонов, способствующие отделению груза от кузова вагона и его размораживанию.

Параметры перерабатывающей способности в зимнее время ниже, чем в летнее, поэтому зимний период закладывается в расчетах перерабатывающей способности как основной. Это позволяет обеспечить заданную переработку вагонопотока в зимнее время и установить параметры инфраструктуры промышленного предприятия для принятия проектных решений и определения условий взаимодействия магистрального и промышленного транспорта. Принятые проектные решения для зимнего времени являются избыточными для летнего и несут дополнительную нагрузку в виде капитальных затрат и эксплуатационных расходов для промышленных предприятий, занятых выгрузкой угля.

Снижение разрыва в значениях перерабатывающей способности между летним и зимним временем при использовании вагоноопрокидывателей позволяет более эффективно использовать места погрузки, снизить протяженность путевого развития предприятия и повысить надежность взаимодействия железнодорожных станций общей сети железных дорог и промышленных предприятий.

В статье приведены примеры перерабатывающей способности нескольких ГРЭС и ТЭЦ, а также расчеты и зависимости емкости мест разогрева вагонов с учетом размера подачи вагонов под выгрузку на вагоноопрокидыватель. Предложены в табличном виде сочетания емкости разогревающих устройств, размера подачи группы вагонов и перерабатывающей способности, которые должны учитываться при проектировании мест выгрузки смерзающихся грузов.

Ключевые слова: вагоноопрокидыватель, разогревающее устройство, смерзающиеся грузы, перерабатывающая способность мест погрузки, выгрузка угля

Для цитирования: Бурдяк П. С., Калидова А. Д. Определение перерабатывающей способности мест погрузки, оборудованных вагоноопрокидывателями для работы в зимних условиях // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 35–43. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_35.

TRANSPORT

Original article

Determination of the processing capacity of loading sites equipped with car dumpers for operation in winter conditions

Pavel S. Burdyak^{1✉}, Alexsandra D. Kalidova²

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

¹ BurdyakPS@mail.ru

² alexsandra_kd@bk.ru

Abstract. The article considers the issue of choosing the parameters of coal unloading sites equipped with car dumpers in winter conditions. These conditions are limiting when calculating the processing capacity, because in the technological process of unloading, additional operations are added to warm up the wagons, contributing to the separation of cargo from the wagon body and its defrosting.

The parameters of processing capacity in winter are lower than in summer, so this period of time is included in the calculations of processing capacity as the main one. This makes it possible to ensure a given processing of the car traffic in winter and to set the parameters of the infrastructure of an industrial enterprise for making design decisions and conditions for the interaction of mainline and industrial transport. The adopted design solutions for winter time are redundant for summer time and carry an additional burden in the form of capital costs and operating costs for industrial enterprises engaged in coal unloading.

Reducing the gap in the values of processing capacity between summer and winter time when using car dumpers makes it possible to use loading sites more efficiently, reduce the duration of the company's track development and increase the reliability of the interaction of railway stations of the common network of railways and industrial enterprises.

The article provides examples of several GRES and CHP plants processing capacity, as well as calculations and dependences of the wagons heating places capacity, taking into account the size of the wagons supply for unloading to the car dumper. Combinations of the heating devices capacity, the size of a group of wagons supply and the processing capacity are proposed in tabular form, which should be taken into account when designing places for loading frozen goods.

Keywords: car dumper, heating device, freezing loads, processing capacity of loading sites, coal loading

For citation: Burdyak P. S., Kalidova A. D. Determination of the processing capacity of loading sites equipped with car dumpers for operation in winter conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):35–43. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_35.

Введение

Предприятия энергетической отрасли, которые потребляют уголь для выработки энергии, в летнее и зимнее время имеют разное потребление энергоресурсов ввиду внешних факторов, вызванных различными условиями работы, а также колебаний температуры окружающей среды в течение года. Такие предприятия принято называть предприятиями с планово-снижающимися объемами производства [1]. В данной статье не затрагиваются вопросы сезонного колебания выработки энергии, связанного с потреблением произведенной энергии, а рассмотрены только вопросы планового снижения перерабатывающей способности из-за необходимости ввода дополнительных операций, направленных на подготовку к выгрузке и переработке грузов, требующих разогрева, рыхления и т. п.

При проектировании и эксплуатации таких предприятий зимний период с отрицательными температурами воздуха является расчетным. Данный выбор расчетного периода не случаен, так как от его параметров зависит бесперебойность потребления угля ГРЭС, ТЭЦ и т. д., которая не должна ограничивать выработку энергии для потребителей или производственную мощность производства.

В летних условиях перерабатывающая способность предприятия, занятого выгрузкой угля, выше за счет отсутствия необходимости дополнительной подготовки вагонов к выгрузке. Данные резервы используются на предприятиях для организации летней путевой кампании, регламентных работ по восстановлению параметров оборудования, техничес-

кого обслуживания и ремонта. Однако заложенные параметры работы в зимний период, как правило, выше этой необходимости и к тому же создают резервы перерабатывающей способности на оставшиеся «теплые» месяцы года. Это ведет в первую очередь к проектированию избыточной инфраструктуры предприятий в части путевого развития и оборудования. Решение этой проблемы в части минимизации разницы значений в переработке вагонов в летний и зимний период позволит не только более точно устанавливать требования к инфраструктуре путей общего пользования, но и снизить негативное влияние на инфраструктуру путей общего пользования в части снижения непроизводительных простоев подвижного состава в зимний период. В статье на примере предприятий, осуществляющих выгрузку вагонов на вагоноопрокидывателях (ВО), рассмотрено влияние подготовки вагонов, а именно разогрева на разогревающих устройствах, оборудованных электронагревателями (РУ) [2].

Обследование ряда предприятий, осуществляющих выгрузку грузов, приходящуюся на один ВО, в зимнее время показало значительное влияние дополнительных операций на переработку грузов (табл. 1). При этом такие операции, как отбор проб груза и взвешивание, выполняются до момента подачи вагонов на пути надвига вагонотолкателя (ВТ) и не влияют на время занятости мест погрузки.

Также цикл работы фронтов включает время на подготовку фронта, подвижного состава и маневровую работу. Операции в некоторых случаях удается выполнять одновре-

Таблица 1

**Объемы переработки грузов в летний и зимний периоды на предприятиях энергетики
в среднем в сутки, ваг.**

Предприятие	Переработка груза		Разница в переработке
	Летний период	Зимний период	
ГРЭС А	87	65	22
ГРЭС Б	50	40	10
ТЭЦ – В	65	48	17
ТЭЦ – Г	46	37	9

менно, что позволяет снизить время занятости мест погрузки.

Материалы и методы исследования

Основная сложность в определении времени цикла работы фронтов, оборудованных вагоноопрокидывателями, заключается в использовании дополнительного оборудования для разогрева вагонов в зимнее время.

Дополнительные операции не только влияют на продолжительность занятости мест погрузки, но и усложняют определение времени, необходимого для качественной подготовки вагонов. При этом может быть два случая: первый – недостаточное время разогрева вагонов, что приводит к потерям при выгрузке на вагоноопрокидывателе, так как ведет к дополнительным переворотам вагонов, использованию ручного или механизированного инструмента для отделения груза от стенок вагона и разрушения смерзшихся кусков груза; второй – перегрев из-за неверно установленного времени нахождения груза в зоне действия разогревающего устройства. И первое, и второе ведет к увеличению времени нахождения подвижного состава на путях вагоноопрокидывателя, что, в свою очередь, снижает перерабатывающую способность. Но основная проблема – это избыточная инфраструктура путевого развития, которая требуется для нахождения подвижного состава, ожидающего выполнения операций с ним. В ряде случаев неверно подобранное сочетание вместимости мест разогрева и длины подачи на фронт выгрузки приводит к продолжительному занятию путей надвига и путей накопления после выгрузки.

Обследование предприятий угольной промышленности, занятой обогащением угля, и предприятий энергетики (ТЭЦ и ГРЭС) показало, что емкость путей, на которых расположены вагоноопрокидыватели, рассчитывается исходя из двух ограничений:

- мощности толкателей;

– длины подачи, кратной длине состава по приему или отправлению.

При этом емкость РУ определяется, как правило, длиной прямого участка пути на пути надвига перед ВО. ВО проектируются в основном парно для поочередного использования на случай поломки одного из ВО и исключения остановки процесса выгрузки. Также такая схема позволяет полноценно проводить регламентные технические работы.

Длина пути надвига при проектировании подчинена нескольким ограничениям:

- необходимость широкого междупутья для размещения двух ВО и узла погрузки с надземной и подземной частями;
- необходимость прокладки троллеи для токосъема вагонотолкателя (ВТ) или контактной сети;
- незначительная длина пути надвига из-за мощности ВТ;
- необходимость размещения стрелочных переводов, ведущих на вытяжные и тупиковые пути ВТ;
- обеспечение видимости надвигаемого подвижного состава с рабочего места оператора ВО [3];
- мощность энергосетей для питания РУ.

В зависимости от места расположения подземных коммуникаций ВО и узла погрузки возможны два варианта расположения путей надвига ВО (рис. 1).

На рис. 1 представлены наиболее часто встречающиеся схемы расположения ВО относительно друг друга. Основное влияние на длину позиций разогрева имеет длина кривых участков пути перед ВО. Необходимость в них обусловлена расположением узла перегрузки (УП) и уширением междупутья для его размещения в габарите приближения строений. Также длина прямого участка ограничивается необходимостью технологического проезда перед зданием ВО.

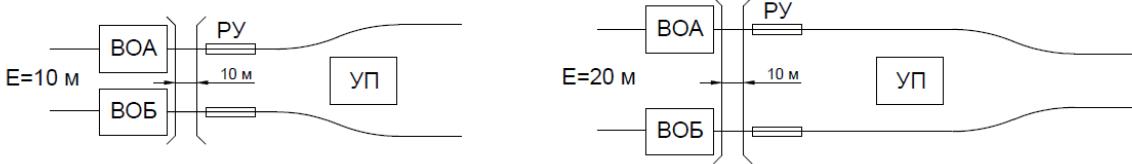


Рис. 1. Размещение разогревающих устройств перед вагоноопрокидывателями

Повышение мощности толкателей для увеличения емкости пути надвига перед ВО зачастую не решает проблему ввиду того, что при увеличении составности подачи значительно усложняется процесс позиционирования вагонов на ВО, так как состав при остановке увеличивается в длине на расстояние хода автосцепок. Для одной автосцепки это расстояние составляет от 0,07 до 0,12 м [4, 5]. Пути надвига состава проектируются в основном на площадке, поэтому волна растяжения и сжатия при начале движения ВТ и его остановке требует дополнительного времени на установку вагонов по центру ВО.

Использование более мощных ВТ позволяет увеличить длину подаваемого состава на пути надвига, быстрее освободить пути парка приема, тем самым снизить его загрузку; но при выполнении маневровой работы требуются дополнительные операции при отцепке вагона, связанные с отсоединением тормозной магистрали и восстановлением тормозного давления в маневровом составе. Такие решения применяются в основном на местах погрузки грузов, на которых большая группа вагонов продвигается под бункером или другим устройством без отцепки вагонов.

Время занятия мест погрузки оборудованными ВО можно определить по формуле [6]:

a)

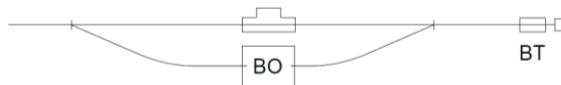


Рис. 2. Схема расположения вагонотолкателей обслуживаемых вагоноопрокидывателяй

$$T_{\text{ц}}^{\Phi} = t_{\text{под}} + t_{\text{подг}} + T_{\text{выгр}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{под}}$ – время на маневровую работу по подаче вагонов на путь надвига перед ВО, мин; $t_{\text{подг}}$ – время на подготовку вагонов перед выгрузкой (отпуск тормозов, навешивание защитных экранов на блоки идентификации вагонов), мин; $T_{\text{выгр}}$ – время на разогрев группы вагонов перед выгрузкой, мин.

Время на маневровую работу по подаче вагонов на путь надвига перед ВО $t_{\text{под}}$ определяется составлением технологической карты для схемы путевого развития места установки ВО [7]. Как правило, имеются две схемы расположения, отличающиеся порядком заезда: локомотивом или вагонами вперед по ходу движения маневрового состава (рис. 2).

Схема, представленная на рис. 2, *a*, характеризуется более быстрой технологией, так как отсутствует необходимость закрепления подвижного состава, как на рис. 2, *b*, и выезда локомотива для освобождения места для ВО.

Время на подготовку вагонов перед выгрузкой (отпуск тормозов, навешивание защитных экранов на блоки идентификации вагонов) $t_{\text{подг}}$ определяется на основе норм времени на маневровые работы и хронометражных наблюдений [8, 9]. Принятые на предприятиях времена на подготовку вагонов (табл. 2) разнятся незначи-

b)

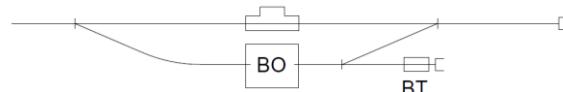


Таблица 2

Режимная карта времени на разогрев группы вагонов в размораживающем устройстве с электронагревателями $t_{\text{РУ}}^{\text{гр}}$

Температура наружного воздуха, °C	Кол-во позиций в цикле разогрева	Время цикла разогрева, мин	Предельное время разогрева вагонов, мин
От 0 до -10	4	20	40
От -10 до -20	4	24	40
От -20 до -30	4	32	45
От -30 до -40	4	40	50

тельно и составляют в среднем 1 мин на вагон. Время на подачу вагонов при обслуживании одним локомотивом в среднем составляет 60 мин.

Время на разогрев вагонов перед выгрузкой $T_{РУ}$ определяется для температуры окружающего воздуха с учетом емкости РУ и режимной карты разогрева вагонов (см. табл. 2) [2].

Результаты исследования

Сложностью в определении цикла разогрева является установление времени нахождения вагонов в РУ во время выгрузки уже разогретых вагонов. Натурное наблюдение за процессом разогрева и выгрузки на ВО и составленные на его основе технологические

карты показали, что, за исключением операций по постановке первой группы вагонов и постановке первого вагона, циклы повторяются для групп вагонов, начиная со второй и заканчивая предпоследней, с количеством вагонов, равным емкости РУ (табл. 3).

В табл. 3 представлены операции для первых двух групп, поступающих на выгрузку, и для последней. Из технологической карты можно вывести формулу на определение времени, необходимого для выгрузки грузов на ВО в зимнее время:

$$T_{\text{выгр}} = T_{РУ} n_{РУ} + \\ + (m_{\text{под}} - n_{\text{grp}} m_{РУ})(t_{\text{выгр}} + t_{\text{пост}}^{\text{след}}), \quad (2)$$

Таблица 3

Фрагменты технологической карты по разогреву вагонов на РУ

Наименование операции	Продолжительность операции, мин	Номера вагонов в группе и их состояние				
		1–4	5	6	7	8
<i>Выгрузка вагонов первой и второй групп</i>						
1. Разогрев вагонов 1–4	30	P	—	—	—	—
2. Постановка вагона 1	2,05	—	—	—	—	—
3. Выгрузка вагона 1	4,00	—	P	—	—	—
4. Проталкивание вагона 1 и постановка вагона 2 под выгрузку	2,88	—	P	—	—	—
5. Выгрузка вагона 2	4,00	—	P	P	—	—
6. Проталкивание вагона 2 на путь и постановка вагона 3 под выгрузку	2,88	—	P	P	—	—
7. Выгрузка вагона 3	4,00	—	P	P	P	—
8. Проталкивание вагона 3 на путь и постановка вагона 4 под выгрузку	2,88	—	P	P	P	—
9. Выгрузка вагона 4	4,00	—	P	P	P	P
10. Разогрев вагонов 5–8	5,36	—	P	P	P	P
<i>...</i>						
<i>Выгрузка вагонов последней группы</i>						
38. Проталкивание вагона 16 на путь и постановка вагона 17 под выгрузку	2,88	P	P	P	—	—
39. Выгрузка вагона 17	4,00	P	P	P	P	—
40. Проталкивание вагона 17 на путь и постановка вагона 18 под выгрузку	2,88	—	P	P	P	—
41. Выгрузка вагона 18	4,00	—	P	P	P	P
42. Проталкивание вагона 18 на путь и постановка вагона 19 под выгрузку	2,88	—	—	P	P	P
43. Выгрузка вагона 19	4,00	—	—	P	P	P
44. Проталкивание вагона 19 на путь и постановка вагона 20 под выгрузку	2,88	—	—	—	P	P
45. Выгрузка вагона 20	4,00	—	—	—	P	P
46. Разогрев вагонов 21–22	9,36	—	—	—	P	P
47. Выгрузка вагона 21	4,00	—	—	—	—	—
48. Проталкивание вагона 21 на путь и постановка вагона 22 под выгрузку	2,88	—	—	—	—	—
49. Выгрузка вагона 22	4,00	—	—	—	—	—
50. Проталкивание вагона 22	2,88	—	—	—	—	—
<i>Итого</i>	202,69					—

Примечание. Р – разогрев вагонов.

где $T_{РУ}$ – время работы разогревающего устройства для выбранного режима в соответствии с температурой окружающего воздуха, мин; $n_{РУ}$ – количество групп вагонов, помещаемых под разогрев; $m_{под}$ – количество вагонов в подаваемой на ВО группе, ваг.; $n_{гр}$ – количество целых групп вагонов относительно размера подачи и емкости РУ; $m_{РУ}$ – емкость разогревающего устройства, ваг; $t_{выгр}$ – время на выгрузку на ВО, мин; $t_{пост}^{след}$ – время на уборку вагона с ВО и постановку следующего вагона, мин.

Параметры $n_{РУ}$ и $n_{гр}$ определяются по формуле

$$n_{РУ(гр)} = \frac{m_{под}}{m_{РУ}}. \quad (3)$$

При этом параметр $n_{РУ}$ округляется в большую сторону, $n_{гр}$ – в меньшую, до целого значения.

Перерабатывающая способность фронта определяется согласно [10]:

$$N_{гр} = \sum_{i=1}^{\varepsilon} \frac{T_i - t_{постi}^{\phi}}{T_{цi}^{\phi}(1 + \rho_{fi})} K_{цi} B_i, \quad (4)$$

где ε – количество грузовых фронтов, обслуживаемых локомотивом; T_i – расчетный период работы i -го грузового фронта, ч; $t_{постi}^{\phi}$ – продолжительность времени для выполнения постоянных операций (техническое обслуживание и ремонт погрузочно-разгрузочных машин и пр.) на i -м фронте; $T_{цi}^{\phi}$ – цикл

работы грузовых фронтов, который определяется продолжительностью обслуживания грузового фронта с наибольшим временем выполнения грузовых операций с одной подачей (уборкой) вагонов; ρ_{fi} – коэффициент, учитывающий возникновение отказов в работе погрузочно-разгрузочных машин на i -м грузовом фронте; $K_{цi}$ – число подач (уборок) вагонов на i -м грузовом фронте за время $T_{цi}^{\phi}$; B_i – среднее число вагонов в одной подаче на i -й грузовой фронт.

Для установления перерабатывающей способности мест погрузки с целью определения наилучших показателей работы устройства в дальнейших расчетах принято:

- количество грузовых фронтов – 1;
- количество локомотивов, обслуживающих фронт, – 1;
- расчетный период работы грузового фронта – 24 ч;
- продолжительность времени для выполнения постоянных операций – 2 ч [10];
- число подач (уборок) вагонов – 1;
- коэффициент, учитывающий возникновение отказов в работе, – 0,02 [10].

На основе данных о работе фронтов и их техническом вооружении определены кривые изменения перерабатывающей способности для различных значений размера подачи вагонов и емкости разогревающего устройства (рис. 3).

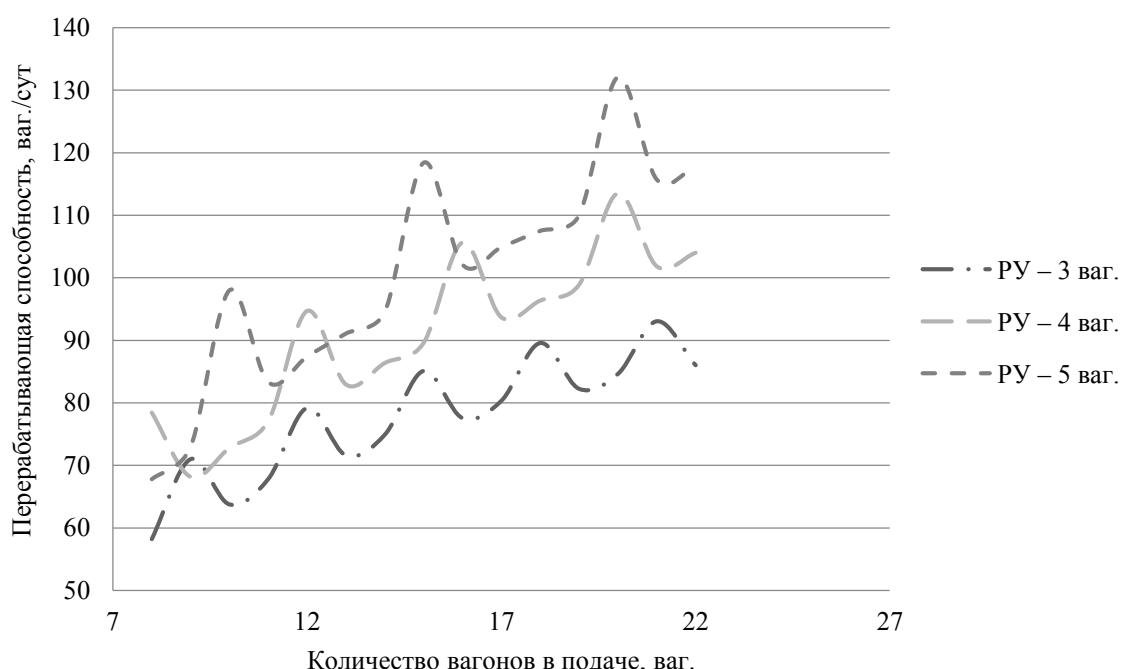


Рис. 3. Графики изменения перерабатывающей способности мест погрузки

На рис. 3 показано, что перерабатывающая способность зависит от емкости РУ. Чем больше вагонов вмещает РУ, тем выше перерабатывающая способность мест погрузки. Это связано с сокращением групп, подаваемых под разогрев. При этом на всех трех графиках видно, что наиболее высокая перерабатывающая способность соответствует количеству вагонов в подаче, кратной емкости РУ. Отсюда следует вывод, что при некратности подачи появляются дополнительные потери времени. Например, для подачи, состоящей из 12 вагонов, следует предусматривать емкость РУ, равную четырем вагонам, так как при емкости 3 и 5 вагонов перерабатывающая способность ниже.

Для кратных значений вагонов в подаче, соответствующих емкости РУ, построена ито-

говая диаграмма выбора соответствия технических параметров устройства и технологии маневровой работы (рис. 4).

Итоговые решения по выбору оснащения ВО должны приниматься только для групп подаваемых вагонов, кратных емкости РУ. Сочетания перерабатывающей способности и емкости РУ приведены в итоговой табл. 4.

Выводы

Полученные на рис. 4 графики имеют рекомендуемый характер, так как при их нарушении возникает ситуация, когда не только предприятие угольной промышленности получает неэффективное решение при проектировании своей инфраструктуры, но и станции общей сети железных дорог испытывают негативное влияние.

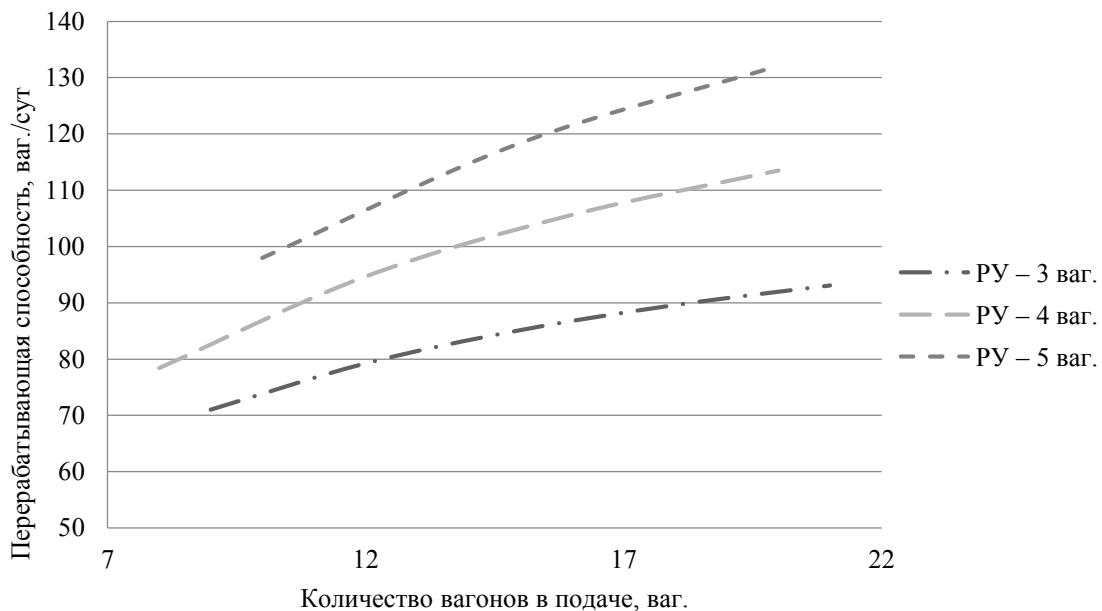


Рис. 4. Графики изменения перерабатывающей способности мест погрузки

Значения перерабатывающей способности вагоноопрокидывателя, оборудованного разогревающим устройством

Таблица 4

Емкость РУ, ваг.	Длина подачи, ваг.	Перерабатывающая способность, ваг./сут
3	9	71
3	12	79
3	15	85
3	18	89
4	8	78
4	12	94
4	16	105
4	20	113
5	10	98
5	15	118
5	20	132

Для принятия решения о составности подачи более 15 вагонов по данным, приведенным в табл. 4, следует проверить:

– фактические мощности ВТ и данные технического паспорта в части износа подвижного состава и использования песка для увеличения сцепления;

– соответствие продольного профиля путей надвига нормативным требованиям и качеству его содержания.

Уменьшение количества вагонов в подаче допустимо только при некратности деления состава на расчетные подачи. Как правило, такое уменьшение не должно составлять более одного вагона по сравнению с приведенными в табл. 4 значениями.

Список источников

1. Сборник правил перевозок и тарифов железнодорожного транспорта Союза ССР. Москва : Транспорт, 1985. 56 с.
2. ИНФРАСИБ : устройство для размораживания смерзшегося угля в железнодорожных вагонах // СибОРГРЭС : [сайт]. URL: <http://www.siborgres-oao.ru/0895654649> (дата обращения: 08.11.2022).
3. СП 37.13330.2012. Свод правил. Промышленный транспорт : актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91* : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 29 декабря 2011 г. № 635/7 : дата введения 2013-01-01. Москва, 2012. 281 с.
4. Болдырев А. П., Кеглин Б. Г., Иванов А. В. Разработка и исследование фрикционно-полимерного поглощающего аппарата ПМКП-110 класса Т1 // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2005. № 4. С. 8.
5. Болдырев А. П., Белоусов А. Г. Расчетно-экспериментальная оценка рациональных параметров конструкции поглощающего аппарата ПМКП-110 с полимерным подпорным блоком // Динамика, прочность и надежность транспортных машин / Брянский государственный технический университет. Брянск, 2003. С. 15–28.
6. Руководство по расчету основных технико-экономических параметров новых средств и комплексов предотвращения смерзаемости, восстановления сыпучести и выгрузки смерзшихся грузов, перевозимых в железнодорожных вагонах : введено в действие 01.03.1979 приказом по Промтранснипроекту № 324 от 30.09.1978. Москва, 1979. Вып. 4482. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293723/4293723175.files/1.gif> (дата обращения: 08.11.2022).
7. Нормы времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожных станциях ОАО «РЖД», нормативы численности бригад и маневровых локомотивов / ОАО «РЖД». Москва, 2006. 80 с.
8. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины : учебник для машиностроительных специальностей вузов. 6-е изд., перераб. Москва : Высшая школа, 1985. 520 с.
9. Нормативы времени на погрузочно-разгрузочные работы, выполняемые на железнодорожном, водном и автомобильном транспорте. Ч. 1. Погрузочно-разгрузочные работы, выполняемые на станциях железных дорог, предприятиях, в организациях, учреждениях отраслей народного хозяйства / Центральное бюро нормативов по труду при Научно-исследовательском институте труда Государственного комитета СССР по труду и социальным вопросам. Москва : Экономика, 1987.
10. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог : утверждена ОАО «РЖД» от 10.11.2010. Москва : Техинформ, 2011. 289 с.

References

1. Collection of railway transport transportation rules and tariffs of the USSR. Moscow: Transport; 1985. 56 p. (In Russ.).
2. INFRASIB: a device for defrosting frozen coal in railway wagons. SibORGRES: [site]. (In Russ.). URL: <http://www.siborgres-oao.ru/0895654649>.
3. SP 37.13330.2012. Set of rules. Industrial transport: updated version of SNiP 2.05.07-91*: approved by order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation dated December 29, 2011 No. 635/7: introduction date 2013-01-01. Moscow; 2012. 281 p. (In Russ.).
4. Boldyrev A. P., Keglin B. G., Ivanov A. V. Development and research of the friction-polymer absorbing apparatus PMKP-110 class t1. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Railway Transport*. 2005;(4):8. (In Russ.).
5. Boldyrev A. P., Belousov A. G. Computational and experimental evaluation of the functional parameters of the design of the PMKP-110 absorbing apparatus with a polymer retaining block. *Dynamics, strength and reliability of transport vehicles*. Bryansk State Technical University. Bryansk; 2003. P. 15–28. (In Russ.).

6. Manual for the calculation of the main technical and economic parameters of new means and complexes for the prevention of freezing, the formation of flow ability and unloading of frozen goods transported in railway wagons stations put into effect on 03/01/1979 by order No. 324 of 09/30/1978 on Promtransniiproekt. Moscow; 1979. Issue 4482. (In Russ.). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293723/4293723175.files/1.gif>.
7. Norms of time for shunting work performed at railway stations Russian Railways, standards for the number of crews and shunting locomotives. Russian Railways. Moscow; 2006. 80 p. (In Russ.).
8. Alexandrov M. P. Lifting and transport machines: a textbook for engineering specialties of universities. Sixth edition, reprinted. Moscow: Higher School; 1985. 520 p. (In Russ.).
9. Time standards for loading and unloading operations performed on railway, water and road transport. Part 1. Loading and unloading operations performed at railway stations, enterprises, organizations, institutions of the national economy. Central Bureau of Labour Standards at the Research Institute of Labour of the USSR State Committee for Labour and Social Issues. Moscow: Economics; 1987. (In Russ.).
10. Instructions for calculating the available capacity of railways: instruction of Russian Railways dated November 10, 2010 No. 128. Moscow; 2011. 289 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

Information about the authors

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

Статья поступила в редакцию 22.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 09.01.2023.
The article was submitted 22.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 09.01.2023.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.212.7
doi 10.52170/1815-9265_2023_64_44

Определение перерабатывающей способности контейнерного терминала

Диана Юрьевна Гришкова

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, raigas@inbox.ru

Аннотация. В последнее время наблюдается переориентация логистических потоков с запада на восток. Не остаются в стороне и контейнерные грузы. В связи с резким увеличением размеров перевалки через восточные морские и сухопутные погранпереходы возникла острая необходимость в наращивании контейнерных перевозок. Контейнерная перевозка относится к модульному типу, так как на всем пути следования груз находится за пломбами грузоотправителя независимо от того, какие операции с ним производятся и каким видом транспорта он перевозится. Модульные перевозки позволяют в разы быстрее осуществлять погрузочно-выгрузочные работы по сравнению с навалочными или тарно-упаковочными грузами, что, в свою очередь, также способствует наращиванию перерабатывающей способности погрузочно-разгрузочных и перегрузочных пунктов.

В работе рассмотрен контейнерный терминал К. Он включает в себя четыре контейнерные площадки, оснащенные козловыми кранами большой грузоподъемности и ричстакерами. Рассчитана перерабатывающая способность контейнерных площадок и в целом терминала в двадцатифутовом эквиваленте в зависимости от вместимости контейнерных площадок и производительности средств механизации. Актуальность такого расчета связана с потребностью в оптимизации параметров терминала. Установлено, что при расчетах по емкости самая большая перерабатывающая способность у контейнерной площадки 3, минимальная – у контейнерной площадки 4; при расчетах по параметру производительности средств механизации самая большая перерабатывающая способность также у контейнерной площадки 3, а самая маленькая – у контейнерной площадки 2. Выполнено вероятностное распределение контейнеропотоков в зависимости от интервалов объемов погрузки и выгрузки за максимальный месяц. Определен резервный запас контейнеромест на контейнерном терминале. Методом интерполяции рассчитан средний запас контейнеромест на терминале. Проведено сравнение наличной перерабатывающей способности контейнерного терминала с объемом переработки контейнеров за 2021 г. Выполнено сравнение прогнозных значений переработки контейнеров на терминале в 2023–2025 гг. с номинальной перерабатывающей способностью, в ходе которого была выявлена потребность в техническом или технологическом совершенствовании контейнерного терминала к 2023 г.

Ключевые слова: перерабатывающая способность, контейнерный терминал, контейнерная площадка, двадцатифутовый эквивалент, контейнеропотоки, контейнероместа

Для цитирования: Гришкова Д. Ю. Определение перерабатывающей способности контейнерного терминала // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 44–51. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_44.

TRANSPORT

Original article

Determination of the processing capacity of a container terminal

Diana Yu. Grishkova

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, raigas@inbox.ru

Abstract. Recently, there has been a reorientation of logistics flows from the west to the east. Containerized cargo is also not left out. Due to the sharp increase in transshipment volumes through the eastern sea and land border crossings, there is an urgent need to increase container traffic. Container transportation has a modular type, since the cargo is behind the shipper's seals along the entire route; regardless of what operations are performed with it and what type of transport it is transported. Modular transportation makes it possible to speed up loading and unloading many times compared to bulk cargo or packaging in containers, which, in turn, also increases the capacity of loading and unloading and reloading stations.

The article discusses the container terminal K. It includes 4 container platforms equipped with heavy gantry cranes and reach stackers. The capacity of container platforms and the terminal as a whole is calculated in twenty-foot equivalent, depending on the capacity of container platforms and the performance of mechanization facilities. The relevance of this calculation is related to the need to optimize the terminal parameters. It was found that when calculating the throughput capacity, the largest processing capacity of container platform 3, the minimum – container platform 4; when calculating, depending on the productivity of mechanization, the largest processing capacity also has container platform 3, and the smallest – container platform 2. A probabilistic distribution of container flows was carried out depending on the intervals of loading and unloading volumes for maximum month. The reserve stock of container platforms at the container terminal has been determined. The average stock of container seats at the terminal was calculated by interpolation. The available capacity of the container terminal was compared with the volume of containers processed in 2021. The forecast values of the terminal capacity for container transshipment for 2023-2025 were compared with the nominal capacity. In the course of comparing the actual capacity of the container handling terminal with the projected values of the total annual container flow, the need for technical or technological improvements of the container terminal by 2023 was identified.

Keywords: processing capacity, container terminal, container site, twenty-foot equivalent, container flows, container spaces.

For citation: Grishkova D. Yu. Determination of the processing capacity of a container terminal. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):44–51. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_44.

Введение

На сегодняшний день в России интенсивно развиваются контейнерные грузоперевозки. Этому способствуют выгода и удобство такого рода перевозок для клиентов, которые заключаются в надежном выполнении всех требований по доставке грузов в установленные сроки [1, 2].

2020 г. стал сложным для экономики всех стран. Несмотря на вводимые в течение года карантинные ограничения, негативно сказавшиеся на экономической деятельности, объемы контейнерных перевозок в России выросли более чем на 16 %.

В ближайшие годы контейнерные компании в целом ожидают рост приблизительно на 10 %. Сюда включены как «доходные» для операторов перевозки (доставка груженого контейнера или контейнеров других компаний, независимо от загрузки), так и «расходные» (транспортировка своего порожнего контейнера или порожнего вагона-платформы).

Так как город Н является крупнейшим транспортным узлом в регионе С, расположенным на пересечении транспортных магистралей [3], а также имеющим железнодорожный выход в Среднюю Азию, он по праву заслужил статус скрепляющего звена между Европой и странами Азиатско-Тихоокеанского региона. В состав данного транспортного узла входит контейнерный терминал К [4, 5].

Прогнозируемое увеличение объема контейнерных перевозок создаст для транспортного узла Н высокий потенциал для привлечения инвестиций и развития региона [6]. Од-

нако для его использования потребуется либо строительство новых контейнерных терминалов, либо модернизация и совершенствование уже существующих [7].

В настоящее время на контейнерных терминалах активно внедряются передовые технические средства и используются инновационные технологии работы с грузом и контейнерами для повышения эффективности работы и снижения эксплуатационных расходов.

Железнодорожная станция К по характеру работы является грузовой, по объему и сложности выполняемых на ней операций относится к внеклассной. К станции примыкает контейнерный терминал.

В состав контейнерного терминала входят четыре крупнотоннажные контейнерные площадки, перерабатывающие 20- и 40-футовые контейнеры. Все площадки оснащены следующим оборудованием [8–10]:

- погрузочно-разгрузочные механизмы (ПРМ);
- рабочие места с персональными электронно-вычислительными машинами;
- камеры наружного наблюдения;
- телефонная связь, включая IP-телефонию;
- радиосвязь для обмена информацией между мастером участка, приемо-отправителем и механизатором грузоподъемных механизмов (ГПМ).

Материалы и методы исследования

Перерабатывающая способность контейнерного терминала состоит из перерабатывающих способностей включенных в него контейнерных площадок (КП). Перерабатываю-

щая способность КП определяется по формуле [11, 12]:

$$Q_r = R \frac{365}{\tau}, \quad (1)$$

где R – количество контейнеров, которое может единовременно поместиться на контейнерной площадке (вместимость или емкость контейнерной площадки), двадцатифутовый эквивалент – ДФЭ; τ – средний срок хранения контейнеров на площадке, сут.

Средний срок хранения контейнеров на КП1 – 5 сут, КП2 – 6 сут, КП3 – 6 сут, КП4 – 7 сут.

На срок хранения контейнеров влияют следующие факторы [13]:

- наличие и доля постоянных клиентов, направляющих свои контейнеры на терминал;
- наличие и доля крупных клиентов, направляющих контейнеры большими транспортными партиями;
- особенности расположения терминала;
- наличие морского порта;
- маршруты доставки контейнеров на терминал и с терминала, наличие таможенного поста на терминале и др.

Определим перерабатывающую способность КП Q_r , ДФЭ/год:

– для КП1

$$Q_r^1 = 630 \cdot \frac{365}{5} = 45\,990;$$

– для КП2

$$Q_r^2 = 488 \cdot \frac{365}{6} = 29\,687;$$

– для КП3

$$Q_r^3 = 2\,220 \cdot \frac{365}{6} = 135\,050;$$

– для КП4

$$Q_r^4 = 528 \cdot \frac{365}{7} = 27\,531.$$

Суммарная перерабатывающая способность контейнерных площадок, а следовательно и контейнерного терминала (КТ) составляет 238 258 ДФЭ. Представим полученные результаты перерабатывающей способности на рис. 1. Перерабатывающая способность контейнерного терминала в зависимости от производительности средств механизации определяется по формуле [14]:

$$P_{\text{мех}}^{\text{КП}} = \frac{M_{\text{мех}}(T_p - T_{\text{мех}})365}{t_{\text{п}}^{\text{М}}[1,1\varphi_{\text{м}} + 2(1 - \varphi_{\text{м}})k_{\text{Д}}^{\text{К}}]}, \quad (2)$$

где $M_{\text{мех}}$ – количество работающих механизмов шт.; T_p – среднесуточная продолжительность работы контейнерной площадки, ч; $T_{\text{мех}}$ – средняя продолжительность технологических перерывов в работе одного механизма, ч; $t_{\text{п}}^{\text{М}}$ – средняя продолжительность цикла работы механизма при перегрузке одного контейнера, ч (КП1 – 0,135 ч; КП2 – 0,115 ч; КП3 – 0,107 ч; КП4 – 0,107 ч); 1,1 – коэффициент, установленный единными нормами выработки и времени на вагонные, автотранспортные и складские погрузочно-разгрузочные работы для циклов непосредственного перегруза; $\varphi_{\text{м}}$ – доля местных контейнеров, перегружаемых по прямому варианту (вагон – автомобиль и

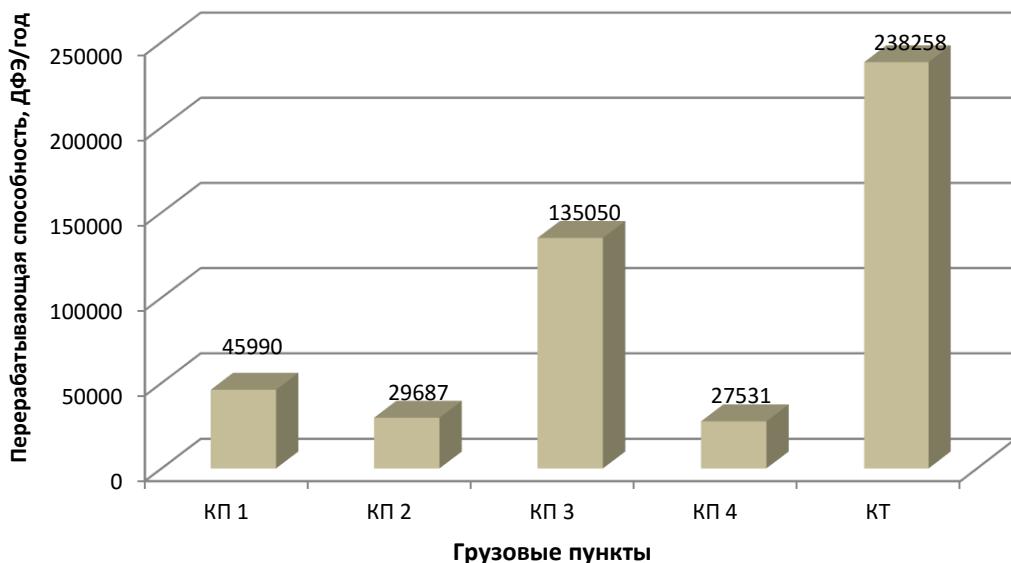


Рис. 1. Перерабатывающая способность контейнерных площадок и контейнерного терминала

автомобиль – вагон), $\varphi_m = 0,05$; 2 – коэффициент, учитывающий двойную работу ПРМ с контейнером (вагон – площадка и площадка – автотранспорт); $k_d^k = 1,8$ – коэффициент, учитывающий дополнительную работу ПРМ на складе, в том числе по поиску нужного контейнера при установке контейнеров на площадке в несколько ярусов по высоте (чтобы забрать нижний контейнер в штабеле, надо сначала снять вышележащие контейнеры, в этом случае объем работы ПРМ увеличивается).

Выполним расчет перерабатывающей способности ПРМ, ДФЭ/год:

$$\Pi_{\text{мех}}^{\text{КП1}} = \frac{3(24 - 2)365}{0,135[1,1 \cdot 0,05 + 2(1 - 0,05)1,8]} = 51\,350;$$

$$\Pi_{\text{мех}}^{\text{КП2}} = \frac{2(24 - 2)365}{0,115[1,1 \cdot 0,05 + 2(1 - 0,05)1,8]} = 40\,187;$$

$$\Pi_{\text{мех}}^{\text{КП3}} = \frac{4(24 - 2)365}{0,107[1,1 \cdot 0,05 + 2(1 - 0,05)1,8]} = 86\,384;$$

$$\Pi_{\text{мех}}^{\text{КП4}} = \frac{2(24 - 2)365}{0,096[1,1 \cdot 0,05 + 2(1 - 0,05)1,8]} = 48\,141.$$

Общая перерабатывающая способность ПРМ на терминале составляет 226 062 ДФЭ/год. Согласно хронометражным наблюдениям работы контейнерного терминала средства механизации могут быть максимально загружены в

1,6 раз больше. Максимально возможная перерабатывающая способность терминала, в зависимости от производительности ПРМ, составит $226\,062 \cdot 1,6 = 361\,699$ ДФЭ/год. Представим полученные результаты перерабатывающей способности на рис. 2.

Так как перерабатывающая способность по емкости складов (238 258 ДФЭ/год) оказалась меньше возможной перерабатывающей способности (361 699 ДФЭ/год), то ее и принимаем за наличную перерабатывающую способность терминала.

Результаты исследования

Для того чтобы сравнить годовую перерабатывающую способность КТ с объемом переработки контейнеров за год, необходимо определить запас контейнеромест на контейнерном терминале. Запас контейнеромест рассчитывается по месяцу максимальных перевозок. В 2021 г. таким месяцем являлся октябрь: на КТ прибыло 7 257 контейнеров и 14 177 контейнеров отправились с КТ. Общее количество прибывших и отправленных контейнеров в октябре 2021 г. составило 21 434 ДФЭ.

Определим вероятностные распределения контейнеропотоков. При этом число интервалов величин суточного прибытия и отправления контейнеров принимается равным пяти. Значения суточного контейнеропотока и их вероятности подобраны исходя из данных суточного

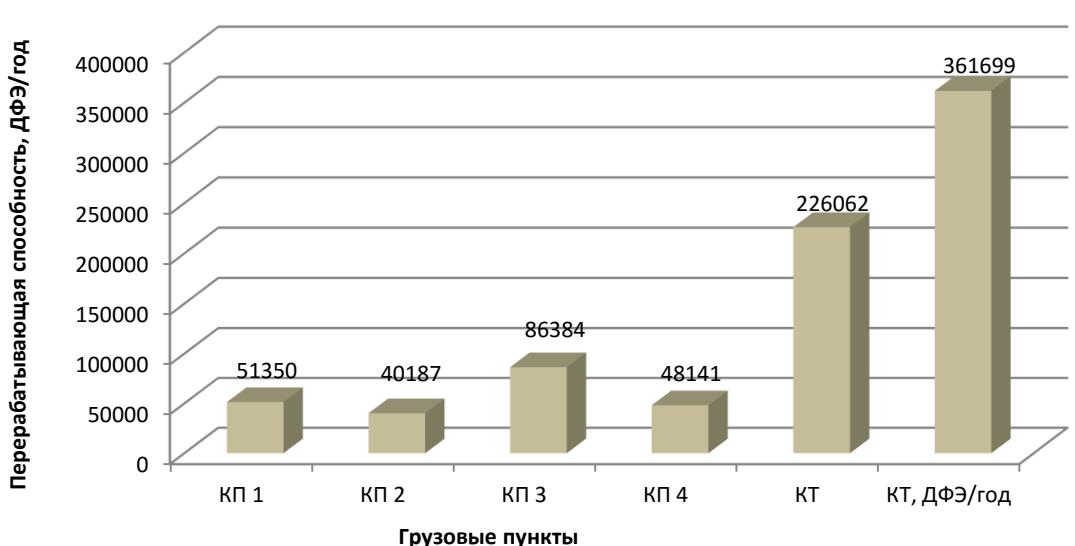


Рис. 2. Перерабатывающая способность контейнерных площадок и контейнерного терминала в зависимости от производительности средств механизации

прибытия и отправления за октябрь 2021 г. Вероятностные распределения контейнеропотоков с пятью интервалами представлены в табл. 1.

Производится проверка нормировочного условия – сумма вероятностей каждого вида грузопотоков должна быть равна 1,00:

$$\alpha_i(q_i) = 0 + 0,23 + 0,45 + 0,25 + 0,07 = 1; \\ \beta_j(s_j) = 0,22 + 0,39 + 0,29 + 0,1 + 0 = 1.$$

Резервный запас контейнеромест на площадке определяется как разность максимального прибытия и минимального отправления контейнеров за сутки:

$$I_0 = 328 - 234 = 94 \text{ ДФЭ/сут.}$$

Определяются все возможные сочетания прибытия и отправления грузов со склада и по каждому сочетанию запас контейнеромест и вероятность этого запаса.

Величина запаса мест для каждого k -го сочетания суточных контейнеропотоков прибытия и отправления определяется следующим образом:

$$I_k = I_0 - q_k + s_k, \quad (3)$$

где q_k – суточный грузопоток прибытия в k -е сутки, ДФЭ/сут; s_k – суточный грузопоток отправления в k -е сутки, ДФЭ/сут.

Вероятность запаса хранения контейнеров в k -е сутки определяется как вероятность двух независимых случайных событий и рассчитывается по формуле [12, 14]:

$$P_k = \alpha(q_k)\beta(s_k). \quad (4)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Распределение запасов контейнеромест I_i и их вероятностей P_i представлено в табл. 3. При этом учитывается, что по отдельным сочетаниям запасы могут совпадать, их вероятности суммируются.

Вероятности запасов контейнеромест суммируются нарастающим итогом слева направо и составляется интегральная функция распре-

деления запасов $\Phi(I)$, результаты представлены в табл. 4. Расчет доверительной вероятности приведен в табл. 5.

Данные прогнозного прибытия и отправления контейнеров за 2023–2025 гг. представлены в табл. 6.

Доверительная вероятность принимается 0,95. Она попадает в интервал между 0,932 и 0,977. Следовательно, резервный запас контейнеромест должен находиться в интервале от 391 до 417 мест. Искомый запас определяется методом интерполяции:

$$R = \frac{0,95 - 0,932}{0,977 - 0,95} (417 - 391) + 391 = \\ = 408 \text{ ДФЭ/сут.}$$

Таким образом, для равномерной и бесперебойной работы контейнерного терминала необходимо соблюдать запас контейнеромест не менее 408 ДФЭ. Доля запаса от общего количества контейнеромест составит:

$$A = \frac{408}{630 + 488 + 2220 + 528} = 0,1055.$$

Следовательно, наличная перерабатывающая способность контейнерного терминала с учетом запаса контейнеромест равна:

$$Q'_r = 238\ 258(1 - 0,1055) = \\ = 213\ 121 \text{ ДФЭ/сут.}$$

Выводы

Выполнено сравнение наличной перерабатывающей способности контейнерного терминала с фактическим объемом переработки контейнеров за 2021 г. [15]:

$$u_{\text{год}}^{\text{пр}} + u_{\text{год}}^{\text{от}} \leq Q'_r, \quad (5)$$

$$122\ 547 + 73\ 760 < 213\ 121,$$

$$196\ 307 < 213\ 121,$$

где $u_{\text{год}}^{\text{пр}}$, $u_{\text{год}}^{\text{от}}$ – расчетное количество контейнеров в год по прибытии и отправлении соответственно, ДФЭ/год;

Таблица 1

Вероятностные распределения контейнеропотоков за октябрь 2021 г.

Прибытие	q_i	122	210	234	260	328
Отправление	$\alpha_i(q_i)$	0,00	0,23	0,45	0,25	0,07
	$\beta_j(s_j)$	234	380	500	557	641
	$\beta_j(s_j)$	0,22	0,39	0,29	0,10	0,00

Примечание. В таблице обозначено: q_i – случайные значения суточного прибытия контейнеров, ДФЭ/сут; $\alpha_i(q_i)$ – соответствующие вероятности появления этих случайных величин суточного прибытия; s_j – случайные значения суточного отправления контейнеров, ДФЭ/сут; $\beta_j(s_j)$ – соответствующие вероятности появления этих случайных величин суточного отправления.

Таблица 2

Расчетные значения запаса контейнеромест

Сочетания грузопотоков, ДФЭ/сут		Запас контейнеромест I_k	Вероятность запасов P_k	$I_k P_k$
Прибытие	Отправление			
122	234	206	0,0000	0,0000
	380	352	0,0000	0,0000
	500	472	0,0000	0,0000
	557	529	0,0000	0,0000
	641	613	0,0000	0,0000
210	234	118	0,0506	5,9708
	380	264	0,0897	23,6808
	500	384	0,0667	25,6128
	557	441	0,0230	10,1430
	641	525	0,0000	0,0000
234	234	94	0,0990	9,3060
	380	240	0,1755	42,1200
	500	360	0,1305	46,9800
234	557	417	0,0450	18,7650
	641	501	0,0000	0,0000
260	234	68	0,0550	3,7400
	380	214	0,0975	20,8650
	500	334	0,0725	24,2150
	557	391	0,0250	9,7750
	641	475	0,0000	0,0000
328	234	0	0,0154	0,0000
	380	146	0,0273	3,9858
	500	266	0,0203	5,3998
	557	323	0,0070	2,2610
	641	407	0,0000	0,0000
<i>Итого</i>		1,0000	0,0000	

Таблица 3

Распределение запасов и вероятностей

I_i	P_i								
0	0,0154	146	0,0273	266	0,0203	384	0,0667	441	0,0230
68	0,0505	214	0,0975	323	0,0070	391	0,0250	475	0,0000
94	0,0990	240	0,1755	334	0,0725	407	0,0000	501	0,0000
118	0,0506	264	0,0897	360	0,1305	417	0,0450	525	0,0000

Таблица 4

Интегральная функция распределения запасов

I_i	0	68	94	118	146	214	240	264	266	323
$\Phi(I)$	0,0154	0,0704	0,1694	0,2200	0,2473	0,3448	0,5203	0,6100	0,6303	0,6373

Таблица 5

Расчет доверительной вероятности

I_i	334	360	384	391	407	417	441	475	501	525
P_i	0,7098	0,8403	0,9070	0,9320	0,9320	0,9770	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Таблица 6

Прогнозируемый контейнеропоток на 2023–2025 гг.

Год	Прибытие контейнеров, ДФЭ	Отправление контейнеров, ДФЭ	Суммарный годовой контейнеропоток, ДФЭ
2023	158 710	102 002	260 712
2024	172 378	108 862	281 240
2025	186 046	115 723	301 769

Из вышеприведенного сравнения следует, что контейнерный терминал способен переработать 196 307 ДФЭ за год.

Для того чтобы определить момент, когда перерабатывающей способности КТ окажется недостаточно для удовлетворения возросшей потребности в переработке контейнеров, используются данные, полученные при прогнозировании аддитивным методом [16], и сравнивается номинальная перерабатывающая способность с прогнозируемыми объемами прибытия-отправления контейнеров за 2023, 2024 и 2025 гг.

Сравнивая текущую перерабатывающую способность (213 121 ДФЭ/год) с прогнозиру-

емым суммарным контейнеропотоком, можно сделать вывод, что уже к 2023 г. фактическая перерабатывающая способность не сможет обеспечить стабильную и бесперебойную работу контейнерного терминала. Следовательно, необходимо разработать ряд мероприятий технического, технологического и организационного характера по увеличению перерабатывающей способности: увеличение доли переработки контейнеров ключевых клиентов терминала по прямому варианту (перегруз с одного транспортного средства на другое, минуя КП), разработка технологии рационального размещения контейнеров на площадках.

Список источников

1. Никода К. В. Текущее состояние и прогноз рынка контейнерных перевозок в России // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 5. С. 46–51.
2. Алешина А. Контейнеризация в России переживает эпоху развития // РЖД-Партнер.ру : информационное агентство. 2022. URL: <http://zd-partner.ru/logistics/interview/konteynerizatsiya>. (дата обращения: 10.11.2022).
3. Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 26–32.
4. Гришкова Д. Ю. Анализ транспортно-логистической инфраструктуры Новосибирской области // Глобальная экономика в XXI веке: роль биотехнологий и цифровых технологий : сборник научных статей по итогам работы второго круглого стола с международным участием. Москва : Конверт, 2020. С. 170–172.
5. Покровская О. Д. Логистический накопительно-распределительный центр как инфраструктурная основа международных транспортных коридоров // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 12-1. С. 118–121.
6. Куприянов Д. И., Смирнова А. В. Пути повышения качества логистического сервиса на основе прогнозирования объема контейнерных перевозок // Научный форум: экономика и менеджмент : сборник статей по материалам XXXIX Международной научно-практической конференции. Москва : МЦНО, 2020. Т. 6 (39). С. 5–11.
7. Джоев А. З. Инновации в системах управления контейнерными терминалами // Системный анализ и логистика. 2013. № 10. С. 4–8.
8. Изотов О. А., Гультьяев А. В. Оценка эффективности комплектования контейнерной площадки перегружочным оборудованием // Системный анализ и логистика. 2017. № 2 (15). С. 18–22.
9. Гомбосэд С., Маликов О. Б. Техническое оснащение контейнерных площадок // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. Т. 3, № 2. С. 7–16.
10. Покровская О. Д., Мороз Ю. А. Цифровое обеспечение расчета параметров контейнерных терминалов // Вестник транспорта. 2020. № 2. С. 41–44.
11. СП 316.1325800.2017. Терминалы контейнерные. Правила проектирования : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 14 ноября 2017 г. № 1541/пр : введен в действие с 15 мая 2018 г. М. : Стандартинформ, 2018. 54 с.
12. Гришкова Д. Ю. Определение перерабатывающей способности терминала при различных условиях работы // Заметки ученого. 2021. № 1. С. 30–34.
13. Псеровская Е. Д., Грефенштейн А. П. Расположение городского распределительного центра: научно-методологический подход // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3 (83). С. 131–140. DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_131.
14. Псеровская Е. Д., Кагадий И. Н. Оценка влияния основных параметров грузовой станции на ее перерабатывающую способность // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 1 (40). С. 19–29.
15. Грефенштейн А. П. Обоснование целесообразности создания распределительного центра в условиях взаимодействия разных видов транспорта // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 68–75. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_68.
16. Гришкова Д. Ю. Методы прогнозирования размеров погрузки на железнодорожном объекте // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2020. № 3 (43). С. 74–80.

References

1. Nikoda K. V. The current state and forecast of the container transportation market in Russia. *Transport of the Russian Federation*. 2013;(5):46–51. (In Russ.).
2. Aleshina A. Containerization in Russia is experiencing an era of development. *Russian Railways Partner: information agency*. 2022. (In Russ.). URL: <http://zd-partner.ru/logistics/interview/konteynerizatsiya>.
3. Pokrovskaya O. D. Complex assessment of transport and storage systems. *Rail transport*. 2019;(7):26–32. (In Russ.).
4. Grishkova D. Yu. Analysis of the transport and logistics infrastructure of the Novosibirsk region. *The Global Economy in the XXI century: the role of biotechnologies and digital technologies. Proceedings based on the results of the second round table with international participation*. Moscow; 2020. P. 170–172. (In Russ.).
5. Pokrovskaya O. D. Logistics storage and distribution center as an infrastructural basis of international transport corridors. *Actual problems of Humanities and Natural Sciences*. 2013;(12-1):118–121. (In Russ.).
6. Kupriyanov D. I., Smirnova A. V. Ways to improve the quality of logistics service based on forecasting the volume of container traffic. *Proceedings based on the materials of the XXXIX International Scientific and Practical Conference. Scientific Forum: Economics and Management*. Moscow: International Centre of Science and Education. 2020;6(39):5–11. (In Russ.).
7. Dzhioev A. Z. Innovations in container terminal management systems. *System analysis and logistics*. 2013;(10):4–8. (In Russ.).
8. Izotov O. A., Gulyaev A. V. Evaluation of the effectiveness of completing a container site with transshipment equipment. *System analysis and logistics*. 2017;(15):18–22. (In Russ.).
9. Gombosed S., Malikov O. B. Technical equipment of container platforms. *Modern problems of the transport complex of Russia*. 2013;3(2):7–16. (In Russ.).
10. Pokrovskaya O. D., Moroz Yu. A. Digital support for calculating the meters of container terminals. *The Bulletin of Transport*. 2020;(2):41–44. (In Russ.).
11. SP 316.1325800.2017. Container terminals. Design rules: approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated November 14, 2017 No. 1541/pr; entered into force on May 15, 2018. Moscow: Standartinform; 2018. 54 p. (In Russ.).
12. Grishkova D. Yu. Determination of the processing capacity of a thermal under various working conditions. *Notes of a scientist*. 2021;(1):30–34. (In Russ.).
13. Pserovskaya, E. D., Grefenstein A. P. Location of the urban distribution center: a scientific and methodological approach. *The Rostov Transport University Bulletin*. 2021;(83):131–140. (In Russ.). DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_131.
14. Pserovskaya E. D., Kagadiy I. N. Assessment of the influence of the main parameters of the cargo station on its processing capacity. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2017;(40):19–29. (In Russ.).
15. Grefenstein A. P. Justification of the expediency of creating a distribution center in the conditions of interaction of different modes of transport. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):68–75. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_68.
16. Grishkova D. Yu. Methods of predicting the size of loading on a railway facility. *Sciff. Issues of student science*. 2020;(43):74–80. (In Russ.).

Информация об авторе

Д. Ю. Гришкова – доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the author

D. Yu. Grishkova – Associate Professor of the Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 16.11.2022; одобрена после рецензирования 19.12.2022; принята к публикации 06.02.2023.

The article was submitted 17.06.2022; approved after reviewing 01.11.2022; accepted for publication 09.01.2023.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.212.5

doi 10.52170/1815-9265_2023_64_52

Распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов на сортировочных горках

Сергей Анатольевич Бессоненко¹, Антон Андреевич Гунбин^{2✉},
Александр Александрович Климов³, Константин Ильич Корниенко⁴,
Иван Александрович Ольгейзер⁵, Андрей Валерьевич Суханов⁶

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

^{4,5,6} Ростовский филиал акционерного общества «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», Ростов-на-Дону, Россия

¹ bessonenko@stu.ru

² gunbin_gdsu@mail.ru✉

³ aklimov@ngs.ru

⁴ kkonstantini@mail.ru

⁵ ivanolgezer@yandex.ru

⁶ a.suhanov@vniias.ru

Аннотация. Рассмотрены действующие нормативы для расчета сил сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки, установлены причины необходимости актуализации числовых характеристик сил сопротивления движению вагонов для использования при проведении конструктивных и технологических расчетов сортировочных устройств. Приведены результаты статистической обработки данных о скатывании 5 000 отцепов с четной сортировочной горки станции И в 2022 г. с использованием комплекса компьютерного зрения для контроля занятости сортировочных путей. Представлены плотности распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов по результатам обработки статистических данных о скатывании отцепов с сортировочной горки. Выполнено сопоставление числовых характеристик плотностей распределения сопротивлению движению вагона, используемых в существующей методике расчета и полученных по результатам обработки статистических данных о скатывании отцепов на эксплуатируемой сортировочной горке.

Установлено, что параметры распределения вероятностей суммарного удельного сопротивления движению отцепов (математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение) имеют значительно меньшие значения, чем используемые при расчете сортировочных горок в настоящее время. Кроме того, установлено, что ходовые свойства отцепов стали меньше зависеть от их массы.

Причиной этого является то, что за прошедший период, со времени выполнения последних измерений сил сопротивления движению вагонов при скатывании с горки, значительно изменился подвижной состав. При изготовлении вагонов используются более качественные материалы, изменилась конструкция подвижного состава, появились «инновационные» вагоны, доля которых на сети железных дорог постоянно увеличивается.

Изменение ходовых свойств отцепов необходимо учитывать при расчете сортировочных устройств. Даны рекомендации по дальнейшему использованию полученных результатов и совершенствованию правил и норм проектирования сортировочных устройств.

Ключевые слова: сортировочная горка, распределение вероятностей удельного сопротивления движению отцепов, статистические данные о скатывании отцепов, числовые характеристики распределения удельного сопротивления движению отцепа

Для цитирования: Распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов на сортировочных горках / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Климов, К. И. Корниенко, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 52–61. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_52.

TRANSPORT

Original article

Probability distributions of specific resistance to the movement of cuts on gravity humps

Sergey A. Bessonenko¹, Anton A. Gunbin^{2✉}, Aleksandr A. Klimov³, Konstantin I. Kornienko⁴, Ivan A. Olgeyzer⁵, Andrey V. Sukhanov⁶

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

^{4,5,6} Rostov Branch of AO NIIAS, Rostov-on-Don, Russia

¹ bessonenko@stu.ru

² gunbin_gdsu@mail.ru✉

³ aklimov@ngs.ru

⁴ kkonstantini@mail.ru

⁵ ivanolgeyzer@yandex.ru

⁶ a.sukhanov@vniias.ru

Abstract. The current standards for calculating the forces of resistance to the movement of cars when rolling down a gravity hump are considered; the reasons for the need to update the numerical characteristics of the resistance forces to the movement of cars for use in carrying out structural and technological calculations of sorting devices are established. The results of processing statistical data on the rolling of 5000 cuts from the marshalling yard of station I in 2022 using the automated system Computer Vision are presented. The probability distribution densities of the specific resistance to the movement of cuts are given based on the results of processing statistical data on the rolling of cuts from a gravity hump. Comparison of the numerical characteristics of the distribution densities to the resistance to the movement of the car, used in the existing calculation method and obtained from the results of processing statistical data on the rolling of cuts on an operating gravity hump, was made.

It has been established that the parameters of the probability distribution of the total specific resistance to the movement of cuts (mathematical expectation and standard deviation) have significantly lower values than those currently used in the calculation of hump yards. In addition, it was found that the running properties of cuts began to depend less on their weight.

The reason for this is that over the past period since the last measurements of the resistance forces to the movement of cars when rolling down the hill, the rolling stock has changed significantly. In the manufacture of cars, better materials are used, the design of the rolling stock has changed, innovative cars have appeared, the share of which in the railway network is constantly increasing.

Changes in the running properties of cuts must be taken into account when calculating sorting devices. Recommendations are given for the further use of the results obtained and the improvement of the rules and norms for the design of sorting devices.

Keywords: gravity hump, probability distribution of the specific resistance to the movement of cuts, statistical data on the rolling of cuts, numerical characteristics of the distribution of the specific resistance to the movement of cuts

For citation: Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A., Kornienko K. I., Olgeyzer I. A., Sukhanov A. V. Probability distributions of specific resistance to the movement of cuts on gravity humps. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):52–61. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_52.

Введение

Сортировочные горки являются наиболее эффективными устройствами для расформирования и формирования поездов, выполнения сортировочной работы различного характера в местах массовой переработки вагонопотоков [1–4]. Качество функционирования сортировочных горок во многом определяет перерабатывающую способность станции в целом и время простоя вагонов на станции. При выполнении маневровой работы в системе расформирования и формирования поездов по-прежнему фиксируются случаи нарушения безопасности производственного процесса. В связи с этим совершенствование методики расчета конструктив-

ных и технологических параметров сортировочных горок является актуальным направлением исследований на современном этапе развития железнодорожного транспорта [3].

При проектировании сортировочных горок производится расчет следующих конструктивных параметров: высоты сортировочной горки, конфигурации и параметров продольного профиля надвижной, перевальной и спускной частей горки, а также путей сортировочного парка, количества и мощности тормозных позиций и т. д. Согласно действующей методике, расчет параметров горок производится на основании результатов скатывания одиночных вагонов с определенными хо-

довыми характеристиками – расчетных бегунов, в частности ОП, П, Х, ОХ-85 и ОХ-100 («очень плохие», «плохие», «хорошие» и «очень хорошие» ходовые характеристики расчетных бегунов соответственно). При этом основным параметром расчетных бегунов, определяющим ходовые характеристики вагона, является основное удельное сопротивление движению при скатывании с сортировочной горки.

Материалы и методы исследования

Согласно действующей методике расчета, суммарное удельное сопротивление движению вагонов включает несколько составляющих:

- неуправляемые силы сопротивления: основное, от воздушной среды и ветра, от стрелочных переводов и кривых участков пути, от снега и инея;

- управляемые силы сопротивления: сопротивление от торможения вагонов на механизированных или немеханизированных тормозных позициях.

Порядок расчета всех видов удельного сопротивления движению вагонов изложен во многих источниках [4–13]. При этом значения основного удельного сопротивления движению вагонов нормируются на основании выполненных ранее исследований. В последней редакции Правил и норм проектирования сортировочных устройств 2003 года (в настоящее время не является действующим нормативным документом) приведены значения основного удельного сопротивления, представленные в табл. 1 [1–12].

Поскольку основное удельное сопротивление движению отцепов является случайной величиной, в таблице также приведены числовые характеристики распределения вероятностей данной величины.

Кроме того, установлены расчетные значения основного удельного сопротивления движению расчетных бегунов, которые должны использоваться при выполнении горочных расчетов (табл. 2).

Приведенные в табл. 1, 2 значения используются при разработке проектов строительства и реконструкции сортировочных горок в настоящее время. Указанные данные были получены по результатам выполненных исследований еще в 1970–80-х гг. [14, 15] и их использование в современных условиях эксплуатации вызывает сомнение [16].

За прошедшее время изменился подвижной состав, материалы, технологии изготовления вагонов. Появились новые типы подшипников, оказывающие меньшее сопротивление качению, принципиально новые типы подвижного состава, имеющие повышенную нагрузку на ось («инновационные» вагоны). В результате должно увеличиться число вагонов с хорошими ходовыми качествами, в том числе возможно появление вагонов со значениями основного удельного сопротивления, меньшими указанных в табл. 1, 2. Следовательно, в перерабатываемом на сортировочных горках вагонопотоке увеличивается

Таблица 1

Расчетные параметры основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки

Диапазон массы вагонов, т	Весовая категория вагонов		Числовые характеристики распределения w_o , Н/кН	
	Наименование	Обозначение	Среднее значение w_o	Среднее квадратичное отклонение σ_{w_o}
До 28	Легкая	Л	1,75	0,67
28–44	Легкосредняя	ЛС	1,54	0,59
44–60	Средняя	С	1,40	0,50
60–72	Среднетяжелая	СТ	1,25	0,38
Свыше 72	Тяжелая	Т	1,23	0,35

Таблица 2

Расчетные параметры основного удельного сопротивления движению расчетных бегунов

Характеристика	Значение параметра в зависимости от категории расчетных бегунов (вагонов)			
	ОП	П	Х	ОХ
Расчетная масса q , т	22	25	70	85
Основное удельное сопротивление w_o , Н/кН	0,5	4,0	0,8	0,5

число вагонов, при скатывании которых значения скорости движения превышают расчетные значения.

Корректировка скоростного режима скатывания отцепов в реальных условиях эксплуатации производится за счет использования систем горочной механизации и автоматизации. При этом решение таких задач, как расчет высоты сортировочной горки, проверка мощности тормозных позиций по-прежнему производится с использованием значений, указанных в табл. 1 и 2, что может приводить к принятию проектных решений, не соответствующих реальным условиям эксплуатации объекта. В связи с этим имеется необходимость пересмотра значений удельного сопротивления движению вагонов и корректировки их расчетных значений для использования при проектировании или реконструкции сортировочных горок.

Определение сил сопротивления движению вагонов на фиксированном участке скатывания с сортировочной горки производилось по существующей методике путем расчета с использованием измерения скоростей движения вагона на данном участке. Измерение скоростей движения вагона на участке скатывания на первом этапе производилось при проведении натурных наблюдений с помощью измерительной аппаратуры «Искра». Результаты данных исследований в целом подтвердили гипотезу о снижении основного удельного сопротивления движению для современного вагонного парка [6, 7].

Проведение натурных наблюдений на эксплуатируемой горке требует значительной трудоемкости и затрат времени. При этом необходимо соблюдение техники безопасности и присутствия на спускной части горки специальных сотрудников. Проведение достаточно большого количества измерений для построения кривых распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов затруднительно также по причине необходимости наблюдения за скатыванием только одиночных отцепов, так как в отцепах, состоящих из нескольких вагонов, удельное сопротивление движению усредняется.

Поэтому на втором этапе исследований была выполнена обработка статистических данных о фазовых траекториях скатывания одиночных вагонов с использованием комплекса компьютерного зрения для контроля

занятости сортировочных путей [1, 2]. Данная система разработана специалистами Ростовского филиала НИИАС и позволяет определять координаты скатывающихся отцепов через определенные интервалы времени. В результате были обработаны результаты скатывания более 5 000 отцепов из одиночных вагонов на четной сортировочной горке станции И с июля по ноябрь 2022 г. В настоящее время комплекс компьютерного зрения для контроля занятости сортировочных путей устанавливается на ряде сортировочных станций сети ОАО «РЖД».

На основании значений времени и координат расположения отцепов определялась скорость их движения в заданных точках по маршруту скатывания. По значениям скоростей скатывания отцепа в фиксированных точках и расстоянию между ними выполнялся расчет суммарного удельного сопротивления движению отцепа по формуле

$$w_{\text{сум}} = i - \frac{v_{\text{вых}}^2 + v_{\text{вх}}^2}{2g'l \cdot 10^{-3}},$$

где $w_{\text{сум}}$ – суммарное удельное сопротивление движению отцепа по участку, Н/кН; i – уклон участка скатывания, %; $v_{\text{вых}}$ – скорость выхода отцепа с участка (вторая точка), м/с; $v_{\text{вх}}$ – скорость входа отцепов на участок (первая точка), м/с; g' – ускорение свободного падения (с учетом инерции врачающихся частей вагонов), м/с²; l – длина участка скатывания (50 м).

Для измерения удельного сопротивления движению отцепов использовалась выборка данных через каждые 50 м для каждого пути сортировочного парка. В качестве нулевой точки принята координата точки выхода отцепа с парковой тормозной позиции. Поскольку измерения проводились на путях сортировочного парка (на прямых участках пути) при положительной температуре наружного воздуха, силы сопротивления от стрелочных переводов и криевых, а также от снега и инея не учитывались.

Удельное сопротивление движению отцепов от среды и ветра оказывает незначительное влияние на полученные результаты из-за небольшой скорости отцепов в сортировочном парке.

Результаты исследования

Результаты обрабатывались методами математической статистики. В итоге были получены распределения вероятностей суммарного удельного сопротивления движению отцепов для каждой весовой категории вагонов (рис. 1).

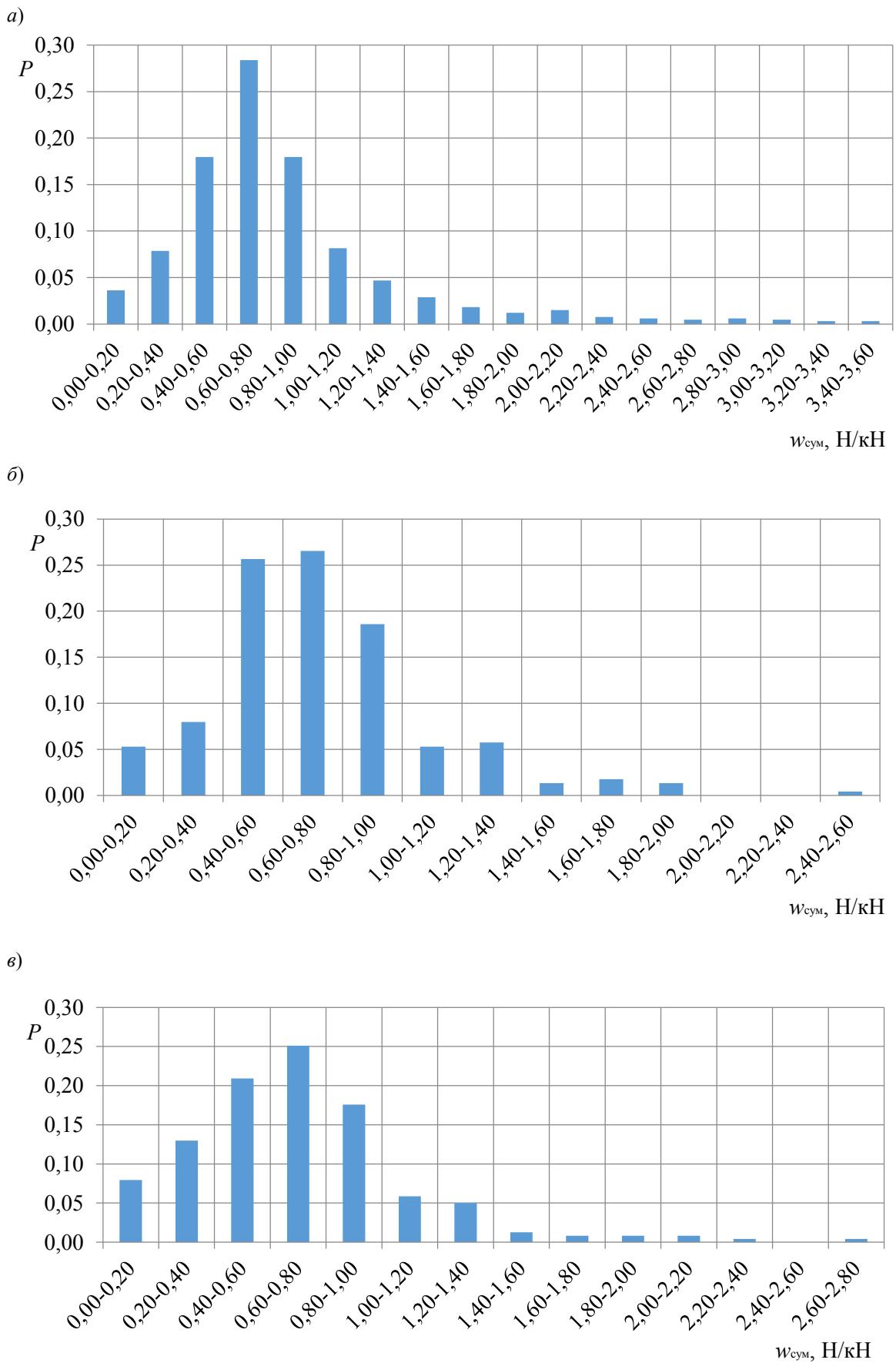
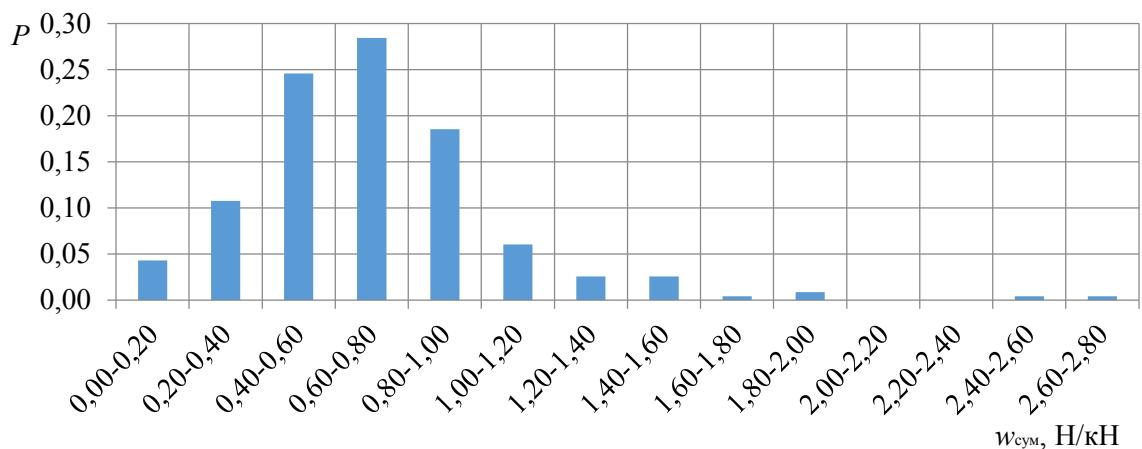


Рис. 1. Плотность распределения вероятностей суммарного удельного сопротивления движению отцепов для различных весовых категорий (начало):
 а – легкой; б – легкосредней; в – средней

e)



d)

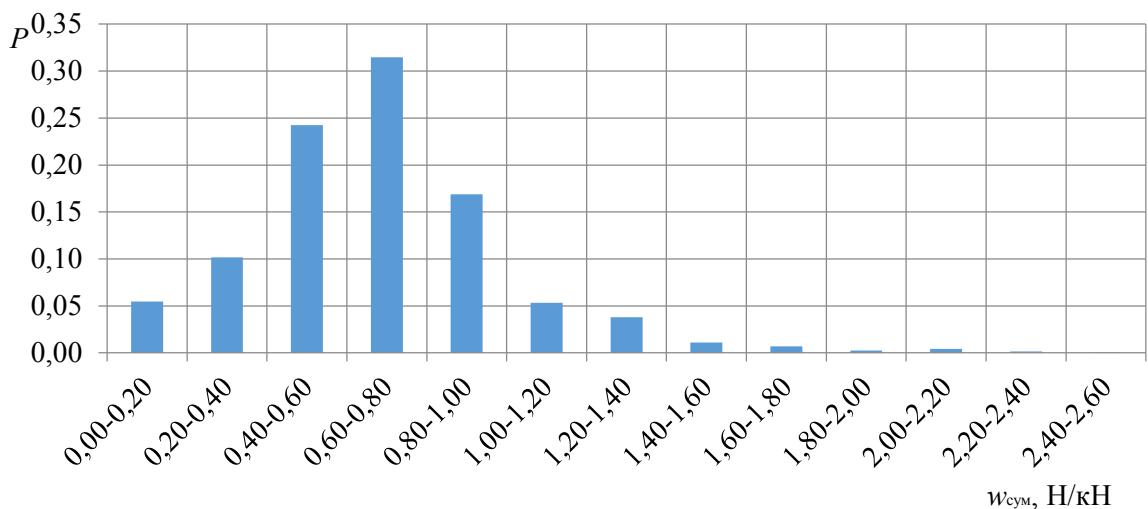


Рис. 1. Плотность распределения вероятностей суммарного удельного сопротивления движению отцепов для различных весовых категорий (окончание):
e – среднетяжелой; д – тяжелой

Интегральные функции распределения суммарного удельного сопротивления движению отцепов для легкой, средней и тяжелой весовых категорий приведены на рис. 2. Распределения для легкосредней и среднетяжелой весовых категорий отличаются незначительно, поэтому на рисунке приведены не будут. Зависимость математического ожидания и среднеквадратического отклонения функции от весовой категории отцепа распределения суммарного удельного сопротивления движению отцепов для всех весовых категорий приведена на рис. 3.

Данные рис. 2 показывают, что интегральные функции распределения вероятностей удельного сопротивления движению для раз-

ных весовых категорий отцепов отличаются незначительно. Распределение значений суммарного удельного сопротивления в пределах весовой категории значительно превышает их отличие для разных весовых категорий. Это вызывает сомнение в необходимости в горочных расчетах учитывать весовую категорию отцепов.

Поскольку распределения вероятностей суммарного удельного сопротивления имеют достаточно выраженную асимметрию, был проведен расчет данных параметров.

Значения асимметрии и эксцесса для разных весовых категорий отцепов отличаются незначительно и составляют:

- для асимметрии от 1,36 до 2,0;
- для эксцесса от 3 до 4,5.

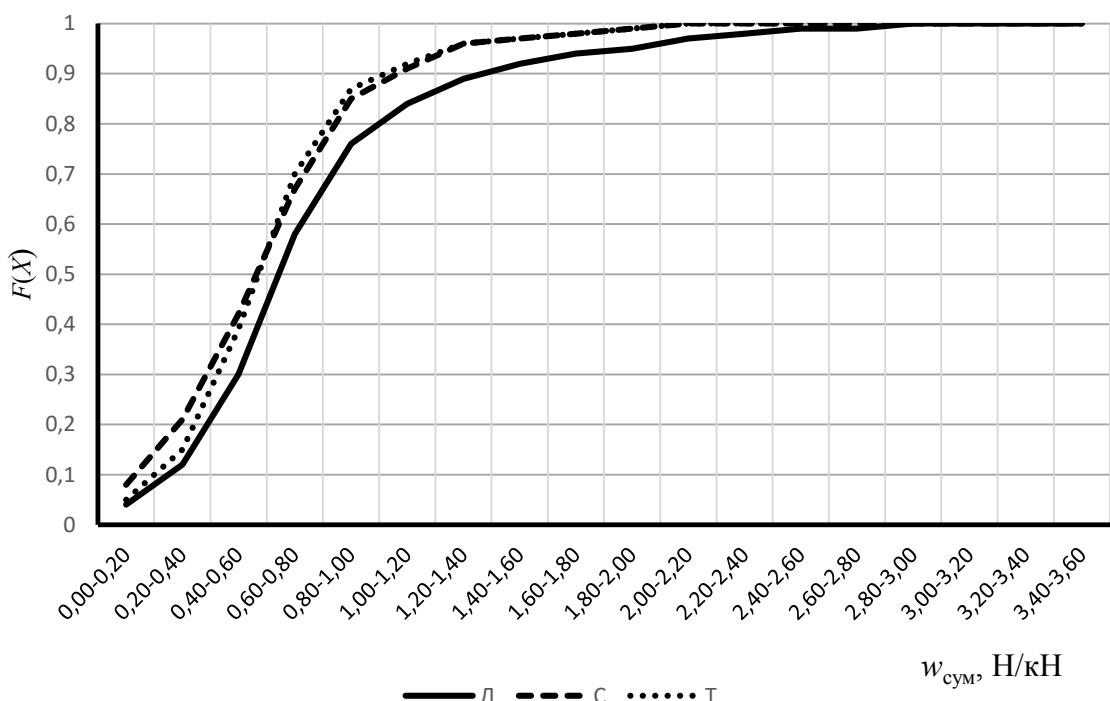
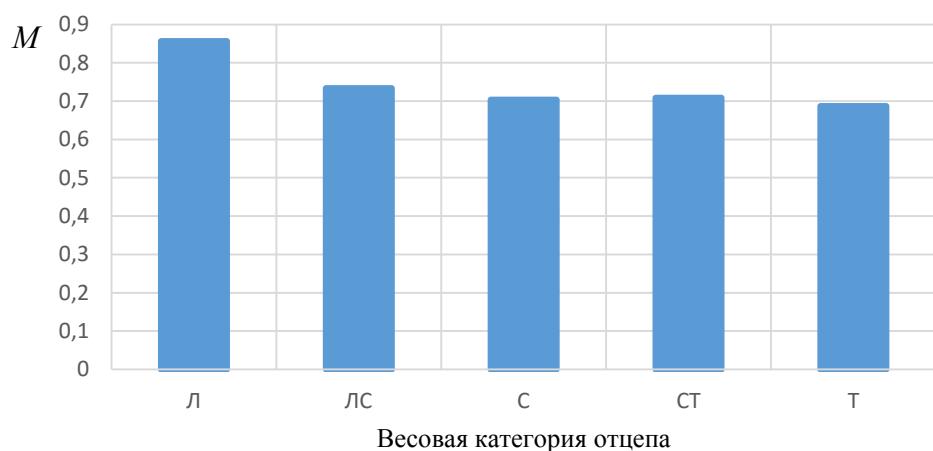


Рис. 2. Интегральные функции распределения суммарного удельного сопротивления движению отцепов для легкой, средней и тяжелой весовых категорий

а)



б)

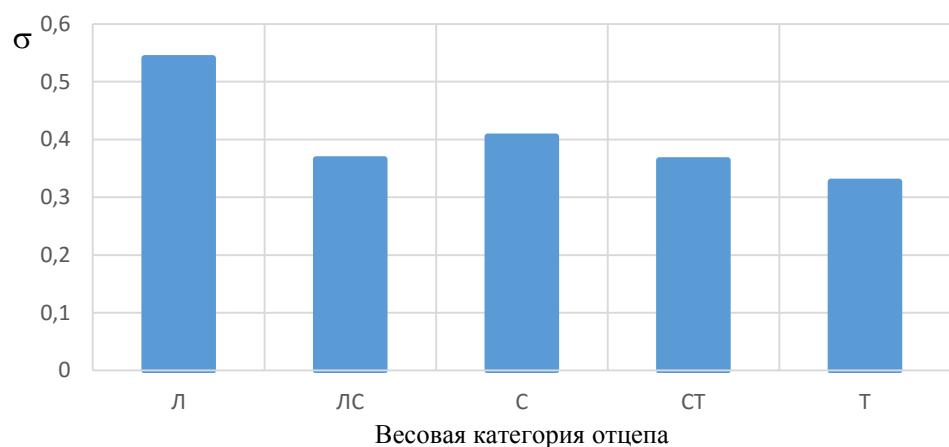


Рис. 3. Зависимость суммарного удельного сопротивления движению отцепов от весовой категории:
а – математического ожидания; б – среднеквадратического отклонения

Таблица 3

Параметры распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов, действующие (основное удельное сопротивление) / новые (основное удельное сопротивление и сопротивление от воздушной среды и ветра)

Весовая категория вагонов		Диапазон веса вагона, т	Математическое ожидание $w_o / (w_o + w_{cb})$, Н/кН	Среднее квадратическое отклонение $\sigma_{w_o} / \sigma_{w_o + w_{cb}}$, Н/кН
Наименование	Обозначение			
Легкая	Л	До 28	1,75/0,857	0,67/0,541
Легкосредняя	ЛС	28–44	1,54/0,734	0,59/0,366
Средняя	С	44–60	1,39/0,704	0,50/0,405
Среднетяжелая	СТ	60–72	1,25/0,709	0,38/0,364
Тяжелая	Т	Свыше 72	1,23/0,687	0,35/0,327

При этом не прослеживается зависимость данных значений от весовой категории отцепов.

Сравнение результатов исследований с действующими нормативами представлено в табл. 3.

Приведенные в табл. 3 результаты показывают, что удельное сопротивление движению отцепов значительно уменьшилось по сравнению со значениями, приведенными в Правилах и нормах проектирования сортировочных устройств (последняя редакция 2003 г.).

Выводы

По итогам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Результаты выполненных исследований подтвердили предположение об улучшении ходовых характеристик вагонного парка, эксплуатируемого на сети железных дорог РФ в настоящее время. Отмечается значительное снижение средних значений сил сопротивления для всех весовых категорий вагонов по сравнению с используемыми в настоящее время данными для расчета сортировочных горок.

2. Значительно сократился диапазон изменения следующих значений распределения вероятностей сопротивлений – основного и от воздушной среды и ветра по сравнению с действующими параметрами основного распределения:

– среднее значение: w_o было в диапазоне 1,23…1,75, стало $(w_o + w_{cb})$ в диапазоне 0,69…0,86;

– среднее квадратическое отклонение: w_o было в диапазоне 0,35…0,67, стало $(w_o + w_{cb})$ в диапазоне 0,33…0,64.

3. Установлено, что интегральные функции распределения вероятностей удельного сопротивления движению для разных весовых категорий отцепов отличаются незначительно. На основании этого возникает вопрос о необходимости использования всех пяти весовых категорий отцепов при горочных расчетах. Кроме того, требуется пересмотр расчетных значений сопротивления для используемых в методике расчетных бегунов.

4. Наблюдается значительное увеличение доли вагонов, имеющих значение удельного сопротивления движению вагонов менее минимально установленного в существующих методиках расчета (менее 0,5 Н/кН). Доля таких вагонов составляет от 0,20 до 0,33 для легкой и тяжелой весовых категорий соответственно, что необходимо учитывать при выполнении как конструктивных, так и технологических расчетов сортировочных горок. Данный эффект особенно следует учитывать при скатывании вагонов на путях сортировочных парков после выхода с парковой тормозной позиции, а также при расчете мощности тормозных позиций.

5. Для выработки рекомендаций по корректировке числовых характеристик сопротивлений движению вагонов при скатывании с горки необходимо увеличить число проводимых экспериментов, в том числе на сортировочных горках, расположенных в различных климатических зонах.

Список источников

1. Компьютерное зрение для контроля занятости сортировочных путей / А. Е. Хатламаджян, В. В. Борисов, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов // Автоматика, связь и информатика. 2021. № 3. С. 8–11.
2. Компьютерное зрение как способ интеллектуализации систем горочной автоматизации / Д. В. Глазунов [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 1. С. 46–53. DOI 10.52261/02346206_2022_1_46.
3. Сортировочная станция – из прошлого в будущее / А. Н. Шабельников, В. А. Кобзев, И. А. Ольгейзер, С. А. Рогов // Железнодорожный транспорт. 2020. № 9. С. 18–21.
4. Бессоненко С. А. Теория расчета сортировочных горок для различных климатических зон : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.08 / Бессоненко Сергей Анатольевич. Москва, 2010. 419 с.
5. Гунбин А. А. Исследование интервалов на разделительных элементах сортировочной горки при скатывании отцепов дифференцированной длины // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3 (35). С. 108–117.
6. Климов А. А. Метод определения сопротивлений движению отцепов при скатывании с сортировочной горки на основе натурных наблюдений и цифровых баз данных // Цифровые технологии транспорта: проблемы и перспективы : материалы Международной научно-практической конференции «Цифровые технологии транспорта и логистики» (28 сентября 2022 г.) / Российский университет транспорта. Москва, 2022. С. 300–305.
7. Корниенко К. И. Построение кривой распределения основного удельного сопротивления движению вагонов в сортировочном парке с учетом перерабатываемого вагонопотока и отцепопотока // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 1 (48). С. 20–28.
8. Осипов Д. В. Метод расчета координат точек отрыва одновагонных отцепов на перевальной части сортировочных горок // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 3. С. 62–66.
9. Осипов Д. В., Климов А. А. Особенности расчета удельных сил сопротивления движению отцепа при имитационном моделировании процесса расформирования составов // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании : материалы Международной научно-практической конференции. Одесса, 2010. С. 69–75.
10. Орлов А. П., Волков В. П. Новые нормы удельных сопротивлений для расчета сортировочных горок // Железнодорожный транспорт. 1964. № 6. С. 50–52.
11. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм ; утверждены Министерством путей сообщения Российской Федерации 10.10.2003. Москва : Техинформ, 2003. 168 с.
12. Пособие по применению правил и норм проектирования сортировочных устройств / Ю. А. Муха, Л. Б. Тишков, В. П. Шейкин [и др.]. Москва : Транспорт, 1994. 220 с.
13. К вопросу о движении вагона по уклону железнодорожного пути / Ю. О. Пазойский, В. А. Кобзев, И. П. Старшов, В. М. Рудановский // Бюллетень транспортной инфраструктуры. 2018. № 2 (272). С. 35–37.
14. Страковский И. И. Сопротивление вагонов при скатывании с горок в зимнее время // Труды Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Москва : Трансжелдориздат, 1952. Выпуск 63. 132 с.
15. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / под ред. Е. А. Сотникова // Труды Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Москва : Транспорт, 1975. Выпуск 545. 104 с.
16. Кондрашов В. М. Единые принципы исследования динамики железнодорожных экипажей в теории и эксперименте // Труды Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Москва : Интекст, 2001. 189 с.

References

1. Khatlamadzhiyan A. E., Borisov V. V., Olgeyzer I. A., Sukhanov A. V. Computer vision for monitoring the occupancy of marshalling lanes. *Automation, communication and informatics*. 2021;(3):8–11. (In Russ.).
2. Glazunov D. V. [et al.]. Computer vision as a way to intellectualize hump automation systems. *Problems of mechanical engineering and automation*. 2022;(1):46–53. (In Russ.). DOI 10.52261/02346206_2022_1_46.
3. Shabelnikov A. N., Shabelnikov A. N., Kobzev V. A., Olgeyzer I. A., Rogov S. A. Marshalling yard – from the past to the future. *Railroad transport*. 2020;(9):18–21. (In Russ.).
4. Bessonenko S. A. The theory of calculation of marshalling yards for various climatic zones: dissertation for a degree of a Doctor of Engineering: 05.22.08 / Bessonenko Sergey Anatolevich. Moscow; 2010. 419 p. (In Russ.).
5. Gunbin A. A. Investigation of intervals on the separating elements of a hump when rolling cuts of differentiated length. *Bulletin of the Ural State University of Railway Transport*. 2017;(35):108–117. (In Russ.).
6. Klimov A. A. Method for determining the resistance to the movement of uncouples when rolling down a gravity hump on field observations and digital databases. *Digital transport technologies: problems and prospects. Materials of the International Scientific and Practical Conference Digital technologies of Transport and Logistics*, September 28, 2022. Russian University of Transport. Moscow; 2022. P. 300–305. (In Russ.).

7. Kornienko K. I. Construction of the distribution curve of the main specific resistance to the movement of cars in the marshalling yard, taking into account the processed car traffic and uncoupling traffic. *The Bulletin of the Siberian Transport University*. 2019;(48):20–28. (In Russ.).
8. Osipov D. V. Method for calculating the single-car cuts points of separation coordinates on the saddle part of marshalling humps. *Transport: science, technology, management*. 2016;(3):62–66. (In Russ.).
9. Osipov D. V., Klimov A. A. Calculating features of the resistance specific forces to the movement of the cut in the process of disbanding trains simulation. *Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education: materials of the International scientific-practical conference*. Odessa; 2010. P. 69–75. (In Russ.).
10. Orlov A. P., Volkov V. P. New norms of resistivity for the calculation of marshalling humps. *Railway transport*. 1964;(6):50–52. (In Russ.).
11. Rules and norms for the design of marshalling devices on 1520 mm gauge railways: approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation 10.10.2003. Moscow: Tekhninform; 2003. 168. p. (In Russ.).
12. Mukha Yu. A., Tishkov L. B., Sheikin V. P. [et al.]. A manual on the application of rules and norms for the design of sorting devices. Moscow: Transport; 1994. 220 p. (In Russ.).
13. Pazoisky Yu. O., Kobzev V. A., Starshov I. P., Rudanovsky V. M. On the question of the movement of the car on the slope of the railway track. *Bulletin of transport infrastructure*. 2018;(272):35–37. (In Russ.).
14. Strakovskiy I. I. Resistance of wagons when rolling down hills in winter. *Proceedings of All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport*. Moscow: Transzheldorizdat; 1952. Issue 63. 132 p. (In Russ.).
15. Sotnikova E. A., ed. Resistance to the movement of freight cars when rolling down hills. *Proceedings of All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport*. Moscow: Transport; 1975. Issue 545. 104 p. (In Russ.).
16. Kondrashov V. M. Uniform principles for studying the dynamics of railway vehicles in theory and experiment. *Proceedings of All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport*. Moscow: Intekst; 2001. 189 p. (In Russ.).

Информация об авторах

- С. А. Бессоненко – профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.
- А. А. Гунбин – доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.
- А. А. Климов – доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.
- К. И. Корниенко – старший научный сотрудник отделения инновационных и интеллектуальных технологий цифровой станции Ростовского филиала акционерного общества «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», кандидат технических наук.
- И. А. Ольгейзер – начальник отделения инновационных и интеллектуальных технологий цифровой станции Ростовского филиала акционерного общества «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», кандидат технических наук, доцент.
- А. В. Суханов – заместитель начальника Отделения инновационных и интеллектуальных технологий цифровой станции Ростовского филиала акционерного общества «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», кандидат технических наук.

Information about the authors

- S. A. Bessonenko – Professor of the Operational Operations Management Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.
- A. A. Gunbin – Associate Professor of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.
- A. A. Klimov – Associate Professor of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.
- K. I. Kornienko – Senior Researcher of Innovative and Intelligent Technologies of the Digital Station Department Rostov Branch of AO NIIAS, Candidate of Engineering.
- I. A. Olgeyzer – Head of Innovative and Intelligent Technologies of the Digital Station Department Rostov Branch of AO NIIAS, Associate Professor, Candidate of Engineering.
- A. V. Sukhanov – Deputy Head of Innovative and Intelligent Technologies of the Digital Station Department Rostov Branch of AO NIIAS, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 16.03.2023; одобрена после рецензирования 17.03.2023; принята к публикации 18.03.2023.

The article was submitted 16.03.2023; approved after reviewing 17.03.2023; accepted for publication 18.03.2023.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.2

doi 10.52170/1815-9265_2023_64_62

Определение параметров качественной трансформации железнодорожной инфраструктуры в городе

Наталья Александровна Ковалева^{1✉}, Аскер Измудинович Хашев²,
Тимур Энверович Мамаев³

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

³ Северо-Кавказская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», Ростов-на-Дону, Россия

¹ nvhreva@gmail.com✉

² hash-93@mail.ru

³ t.mamaev@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы целесообразности эксплуатации железнодорожного транспорта в городской транспортной среде. Обозначены положительные и отрицательные стороны прохождения железной дороги через городскую среду с точки зрения пассажирского железнодорожного сообщения и наличия пересечений с автомобильным транспортом. Приводятся мероприятия по снижению барьеров при организации движения при пересечении автомобильного и железнодорожного сообщения. На базе имитационно-аналитического моделирования разработано программное обеспечение, которое предназначено для расчета интегрированных потерь общества от функционирования одноуровневых железнодорожно-автомобильных пересечений в городской среде при разной интенсивности транспортного потока через переезд.

Определение параметров качественной трансформации железнодорожной инфраструктуры в городской черте предлагается проводить с помощью сопоставления экономических потерь и выгод участников дорожного движения, которые зависят от времени закрытия железнодорожных переездов, числа железнодорожных путей и количества автомобильных полос, интенсивности движения автотранспортных средств через переезд и, как следствие, простоя автотранспортных средств при пропуске железнодорожных составов. Приводятся графики зависимости затрат (потерь) и выгод участников дорожного движения через железнодорожно-автомобильные пересечения в одном уровне. Построенные функциональные зависимости, полученные методом имитационного моделирования, дают высокую точность результатов. Проведен анализ железнодорожных переездов, рассмотрена классификация железнодорожных переездов общего пользования по интенсивности движения транспортных средств Северо-Кавказской железной дороги и г. Ростова-на-Дону.

Ключевые слова: железнодорожно-автомобильное пересечение, железнодорожный переезд, имитационное моделирование, автомобильный транспорт, железнодорожный транспорт, потери, задержки, пассажиропоток

Для цитирования: Ковалева Н. А., Хашев А. И., Мамаев Т. Э. Определение параметров качественной трансформации железнодорожной инфраструктуры в городе // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 62–73. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_62.

TRANSPORT

Original article

Determination of qualitative transformation parameters of the railway infrastructure in the city

Natalya A. Kovaleva^{1✉}, Asker I. Khashev², Timur E. Mamaev³

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

³ The North Caucasus Railway – Branch of Russian Railways, Rostov-on-Don, Russia

¹ nvhreva@gmail.com✉

² hash-93@mail.ru

³ t.mamaev@mail.ru

Abstract. Questions about the expediency of operating railway transport in an urban transport environment are considered. The positive and negative aspects of the passage of the railway through the urban environment are

indicated both from the side of passenger railway traffic and from the side of the presence of intersections with road transport. Measures are given to reduce barriers in the organization of traffic at the intersection of road and rail traffic. On the basis of simulation-analytical modeling, software has been developed that is designed to calculate the integrated losses of society from the operation of single-level railway-road intersections in an urban environment with different traffic flow through the crossing.

It is proposed to determine the parameters of the qualitative transformation of the railway infrastructure in the city by comparing the economic losses and benefits of road users, which depend on the time of closing of railway crossings, the number of railway tracks and the number of car lanes, the intensity of vehicle traffic through the crossing and, as a consequence, the downtime of vehicles when passing trains. Schematic diagrams of dependence of costs (losses) and benefits of road users through railway-road intersections in one level are given. The analysis of railway crossings is carried out, the classification of public railway crossings according to the intensity of traffic of vehicles of the North Caucasian Railway and the city of Rostov-on-Don is given. A program is presented for calculating the integrated losses of society from the functioning of single-level railway-road intersections. The constructed functional dependencies, obtained by the simulation method, give high accuracy of the results obtained.

Keywords: railway-automobile crossing, railway crossing, simulation modeling, automobile transport, railway transport, losses, delays, passenger traffic

For citation: Kovaleva N. A., Khashev A. I., Mamaev T. E. Determination of qualitative transformation parameters of the railway infrastructure in the city. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):62–73. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_62.

Введение

Стратегически значимой отраслью для Российской Федерации, определяющей ее мощь, геополитическое положение на евроазиатском пространстве, возможности устойчивой реализации внутри- и внешнеполитических приоритетов, была и остается транспортная отрасль. От устойчивого функционирования транспорта зависит жизнь страны в целом и отдельных регионов в частности. Регионы в транспортной политике страны выступают административно-территориальными образованиями, которые могут формировать свою собственную стратегию развития в пределах делегированных полномочий, а также оказывать влияние на крупные инфраструктурные решения в развитии транспортной системы страны, имеющие отношение к данному региону. Транспортные коммуникации для региона играют ключевую роль, влияя на его место в межрегиональном взаимодействии как внутри страны, так и в международных коммуникациях. Вопрос целесообразности эксплуатации железной дороги в городской черте для внутригородских перевозок поднимается во многих крупных российских городах: Москве, Ростове-на-Дону, Краснодаре, Новосибирске, Волгограде, Екатеринбурге и др. Все эти города являются ядрами городских агломераций, где сосредоточены места приложения труда и отдыха, учебно-культурные заведения, медицинские учреждения и т. д., которые обеспечивают рост транспортной подвижности населения в радиальных направлениях «город – пригород», т. е. маятниковую миграцию.

В связи с этим городская транспортная система характеризуется повышенной нагрузкой на улично-дорожную сеть (УДС) в центральной части мегаполисов и на подъездах в город. Определение параметров качественной трансформации железнодорожной инфраструктуры в городской черте предлагается проводить с помощью сопоставления экономических потерь и выгод участников дорожного движения. Потери участников движения напрямую зависят от времени закрытия железнодорожных переездов и простоя автотранспортных средств при пропуске железнодорожных составов. Оценка простоя времени автотранспорта, которая зависит от интенсивности железнодорожного сообщения через переезд, может осуществляться с использованием имитационно-аналитического моделирования.

Литературный обзор

Вопросам эффективности построения транспортных систем посвящено достаточно большое количество работ, в которых рассмотрены регулирование транспортных потоков [1–3], обеспечение конечных пользователей большей информативностью и безопасностью [4], качество уровня взаимодействия между участниками движения [5], развитие транспортно-логистических комплексов с использованием потенциала логистической инфраструктуры, которые определяются индексами эффективности развития LPI (Logistics Performance Index) [6, 7]. Отдельно следует выделить работы, в которых проведены исследования уровня развития региональных транс-

портных систем [8] с выделением положительной и отрицательной динамики показателей исходя из темпов их изменения, данные выводы могут быть использованы при стратегическом планировании развития регионов и мегаполисов.

Большинство научных работ по развитию железнодорожной инфраструктуры раскрывают методологии по ее управлению, в том числе при взаимодействии с другими видами транспорта [9, 10], увеличению пропускной способности [11], экономические и экологические оценки эффективности организации железнодорожных грузовых перевозок [12, 13], важность железнодорожного сообщения для регионов и стран [14, 15], экономической оценки влияния сезонности перевозок на показатели текущей и инвестиционной деятельности железнодорожного транспорта. При этом проблемы целесообразности развития железнодорожной инфраструктуры в городской черте недостаточно изучены. Параметры оценки использования внутригородского железнодорожного сообщения не установлены и не учитываются при стратегическом планировании и разработке программ комплексной системы организации дорожного движения городов и агломераций.

Материалы и методы исследования

Рост численности населения в мегаполисах, активное строительство жилищных комплексов, в том числе на окраинах городов, влечет за собой расширение городских границ, увеличение радиальных перемещений, образование заторов на автодорогах. В связи с этим вопрос ограничений, связанных с наличием железнодорожных переездов, приводит к негативному отношению к железнодорожно-автомобильной транспортной системе. В крупных городах железная дорога проходит преимущественно через центральные части, что приводит к образованию большого количества внутригородских пересечений с автомобильными и пешеходными дорогами и уменьшает развитие мобильности населения (рис. 1) [16].

В настоящее время железнодорожные пути зарождаются и погашаются на ст. Ростов-Главный и действуют в нескольких ключевых направлениях (рис. 2): в сторону Таганрога через остановочную площадку 1337-й км и ст. Ростов-Западный, а также через ст. Первомайская; внутригородская железная дорога в сторону Новочеркасска через станции Сельмаш, Кизитеринка; в направлении Батайска. В настоящее время курсирует в ежедневном обращении 24 пары пригородных поездов,



Рис. 1. Зонирование железной дорогой территории г. Ростова-на-Дону

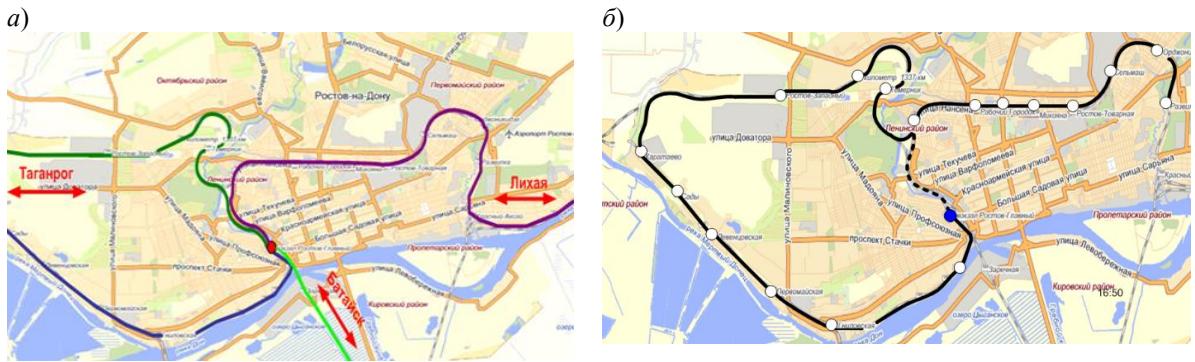


Рис. 2. Схема движения пригородных электропоездов (а) и городской электрички (б)
в Ростове-на-Дону

осуществляющих транспортное обслуживание граждан в городской агломерации. Потребителями услуг, оказываемых на пригородном железнодорожном транспорте, по результатам проводимых исследований являются: пассажиры, оплатившие проезд полностью за наличный расчет; льготники регионального уровня; школьники и студенты; льготники федерального уровня, имеющие право бесплатного проезда; работники железнодорожного транспорта.

Негативное влияние железных дорог на пропускную способность автотранспортных потоков становится значительным при увеличении численности населения городов и с ростом уровня автомобилизации. Железнодорожный транспорт имеет высокую пассажироподъемность в системе перевозок «город – пригород» и во внутригородском сообщении. Проект «Городская электричка» реализован в таких мегаполисах, как Красноярск, Екатеринбург, Уфа, Ростов-на-Дону, Калининград.

Эффективность проекта доказана: уже в первый год его реализации (в период с марта по декабрь 2016 г.) было перевезено 41 707 чел., далее проект набирает популярность и все больше пассажиров начинают использовать городскую электричку для перемещения по Ростову-на-Дону. Так, в 2017 г. перевезено более 95 тыс. пасс., что на 118 % (53,5 тыс. пасс.) больше, чем в 2016 г., в 2018 г. прирост пассажиропотока составил 54,3 % (51,8 тыс. пасс.), в 2019 г. – 13,3 % (или 19,5 тыс. пасс.). Таким образом, среднесуточный пассажиропоток составил: в 2016 г. – 210 пасс., 2017 г. – 385, 2018 г. – 595, 2019 г. – 677 пасс.

Одноуровневые железнодорожно-автомобильные пересечения на улично-дорожной сети приносят ряд отрицательных последствий: сокращают пропускную способность автомобильных и железных дорог, повышаются выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, увеличиваются расходы топлива, возникают несчастные случаи в результате ДТП, а также препятствуют развитию скоростного железнодорожного сообщения и т. д.

Разработанная аналитическая модель дает возможность оценить совокупные социально-экономические потери при уменьшении скоростей движения на улично-дорожной сети города (рис. 3) [17]. Расчеты опираются на официальные статистические данные, которые в конечном счете определяют динамику изменения потерь на текущий момент. Так, потери, связанные с изменением сроков доставки грузов, обусловлены увеличением времени доставки за счет снижения скорости движения на уличной сети, что в свою очередь влечет увеличение расходов топлива и энергоресурсов, ухудшение экологической среды, усиление износа транспортных средств вследствие необходимости разгона и замедления при образовании заторов. Потери пассажиров будут обусловлены задержкой в пути следования и, как следствие, снижением потенциальной производительности [17].

Особенностями методических подходов анализа состояния и оценки эффективности железнодорожного транспорта и перевозок являются:

- обеспечение спроса на транспортные услуги «здесь и сейчас», что требует адекватных прогнозов пассажиропотоков;

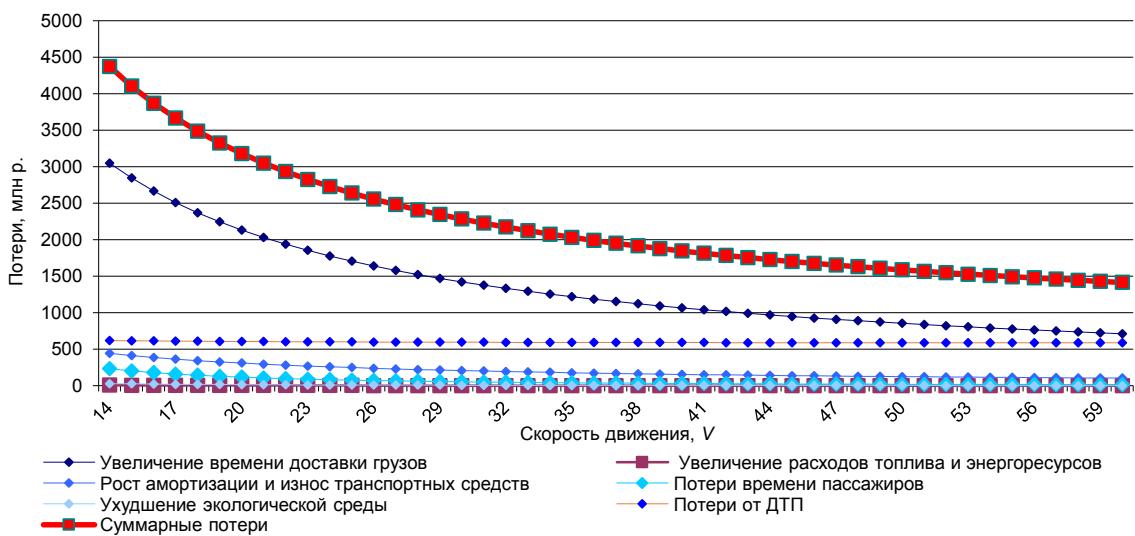


Рис. 3. Влияние скоростей движения на улично-дорожной сети города на социально-экономические потери [17]

– пространственно-рассредоточенный характер транспортных систем, их элементы обретают значимость при условии сбалансированного распределения мощностей и ресурсов, узкие места в транспортной сети могут оказываться на глобальной пропускной способности и стать барьерами для ее развития;

– важность экономической, социальной и финансово-хозяйственной составляющих в вопросах развития транспортной системы, формирующих определенные коллизии в реализации интересов транспортных компаний, административных регионов и муниципалитетов, городского сообщества (населения).

Оценка железнодорожной инфраструктуры мегаполиса Ростова-на-Дону

Оценка современного состояния железнодорожных перевозок проводится на основе статистических данных основных показателей пассажиропотока, анализа развития транспортной инфраструктуры и результатов реализации стратегии развития транспортных систем.

На Северо-Кавказской железной дороге (СКЖД) к началу 2022 г. насчитывалось 870 железнодорожных переездов, из которых 824 – общего пользования, а 46 – необщего. Железнодорожные переезды СКЖД расположены на территориях Южного и Северо-Кавказского федеральных округов (рис. 4).

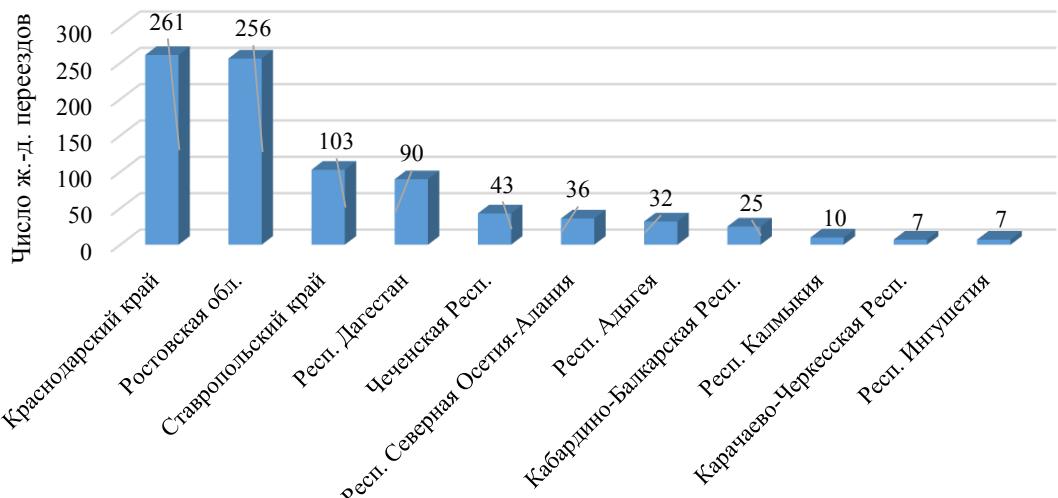


Рис. 4. Количество железнодорожных переездов на СКЖД по субъектам РФ

Наибольшее количество переездов находится на территории Краснодарского края и Ростовской области. Ростовская агломерация обеспечена пригородным железнодорожным сообщением. Основные направления: Ростов-на-Дону – Таганрог, Ростов-на-Дону – Батайск, Ростов-на-Дону – Азов, Ростов-на-Дону – Орлово-Кубанская, Ростов-на-Дону – Сальск.

Вопрос эффективности организации транспортной системы Ростовской области, Ростовской агломерации и г. Ростова-на-Дону должен основываться на повышении привлекательности для населения общественного и городского пассажирского транспорта, в том числе железнодорожного транспорта общего пользования, который обладает высокой пассажироемкостью, соблюдением графиков движения и, как следствие, способствует разгрузке улично-дорожной сети от доминирования легковых автомобилей.

Зависимость потерь автомобильного транспорта $Z_a(P)$ от выгоды использования городской электрички $Z_k(P)$ при отсутствии разноуровневых железнодорожно-автомобильных пересечений в городе условно можно разделить на три зоны (рис. 5):

– первая зона: график потерь автомобильного транспорта показывает линейный рост. Закрытие железнодорожного переезда для пропуска городской электрички при низкой интенсивности автомобильного транспорта не оказывает существенного влияния на задержку автомобильного транспорта;

– вторая зона: параболический рост графика. Выгоды пассажиров от использования городской электрички превышают потери ав-

томобильного транспорта. В связи с чем считаем необходимо применять регулирующие воздействия для эффективной и безопасной организации пропуска автомобильного транспорта через железнодорожный переезд;

– третья зона: экспоненциальный рост графика. Потери автомобильного транспорта превышают выгоду пассажиров от городской электрички. В этом случае необходимо поднимать вопрос о строительстве разноуровневых пересечений, а также проводить мероприятия по пересадке автомобилистов на городскую электричку.

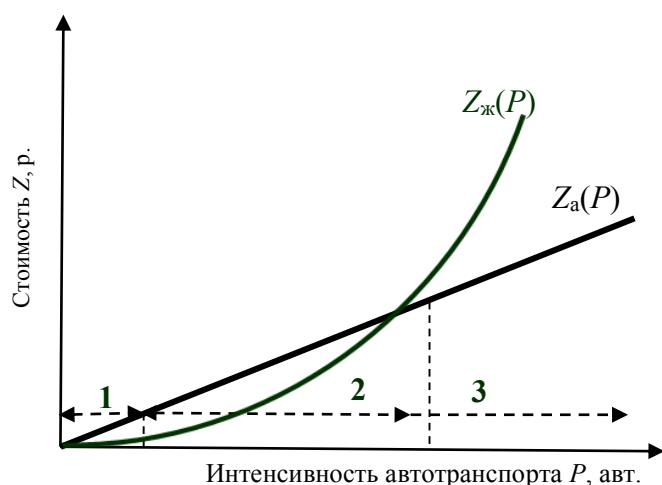
Для оценки влияния железнодорожного переезда на транспортную систему города необходимо оценить интенсивность транспортного потока через переезд (рис. 6).

Определение категории железнодорожных переездов позволяет разработать организационные мероприятия по регулированию транспортного потока, оценить их функционирование, а при увеличении интенсивности движения авто- и железнодорожного транспорта рассмотреть вопрос организации пересечения автомобильных и железнодорожных путей в разных уровнях. В числе приоритетных задач государственной политики в области регулирования транспорта можно отметить:

– стимулирование, модернизацию и техническое перевооружение отрасли;

– поддержку комплексных проектов развития транспорта, способствующую сбалансированному развитию транспортной системы в целом и отдельных регионов;

– поддержку научно-технических проектов в области транспорта и др.



1-я зона

Низкая интенсивность автомобильного транспорта через железнодорожный переезд

2-я зона

Выгоды пассажиров от использования городской электрички превышают потери автомобильного транспорта

3-я зона

Потери автомобильного транспорта превышают выгоду пассажиров от использования городской электрички

Рис. 5. Схема зависимости потерь автомобильного транспорта на переезде и выгод от использования городской электрички

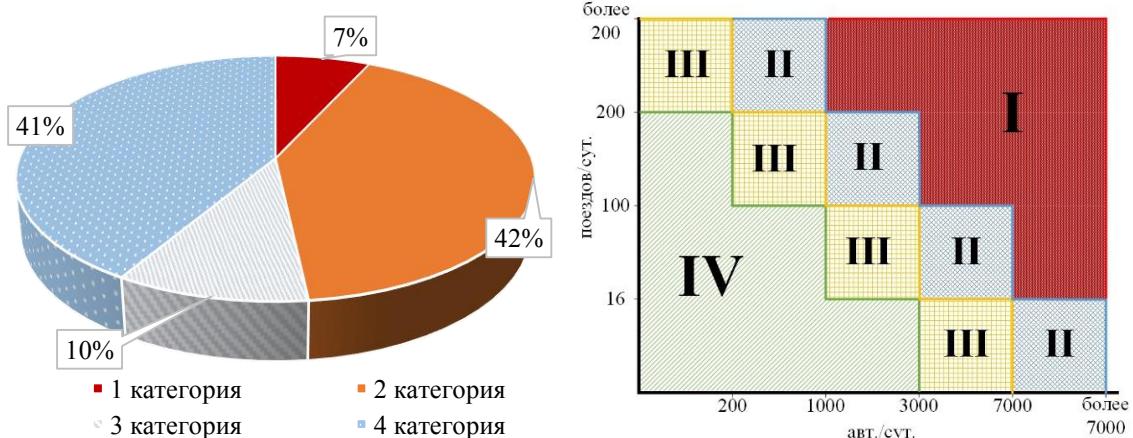


Рис. 6. Классификация и количество железнодорожных переездов общего пользования на СКЖД

Наращивание темпов научно-технического прогресса, наблюдаемый рост дефицита развития УДС требуют активных новаций в транспортной политике стран, регионов и городов, в создании транспортной инфраструктуры. Большой резерв в развитии отрасли видится в формировании нормативно-правовых и институциональных основ для использования возможностей всех видов транспорта в обеспечении перевозок грузов и пассажиров на принципах мульти- и интермодальности.

На базе имитационно-аналитического моделирования разработан программный продукт «Программа оценки социально-экономических потерь на железнодорожных переездах» (рис. 7) [18], который предназначен для расчета интегрированных потерь общества от функционирования одноуровневых железнодорожно-автомобильных пересечений, включающий экономические потери транспортных предприятий; потери населения в ожидании открытия переезда; потери, связанные с загрязнением окружающей среды и др.

Инструментарием для имитационного моделирования послужила программа PTV Vissim, которая позволяет получить результаты исследования на основе корреляции параметров железнодорожного переезда. Оценка социально-экономических потерь проводится с помощью аналитического моделирования с использованием программы Microsoft Excel. Этот инструментарий дает возможность провести оценку и определить очередность ликвидации одноуровневых железнодорожно-автомобильных пересечений в городской среде путем строительства разноуровневых развязок. Преимуществом данного подхода считается способность адекватно описывать поведение участников транспорт-

ного потока и выдавать точные параметры движения: скорость, задержки транспортных средств, длину и динамику образования заторов и т. д. [19].

Железнодорожные переезды обладают низкой пропускной способностью вследствие вынужденного понижения скорости составом и задержки автотранспортных средств на данном участке. Оценка всех потерь, возникающих в узле в экономическом и техническом направлениях, является актуальной в исследовании проблем железнодорожных переездов. Отличием регулируемого переезда от нерегулируемого является то, что на нерегулируемом переезде установлен знак 2.5 «Движение без остановки запрещено» и нанесена разметка 1.12 «Стоп-линия» на расстоянии 10 м от ближнего рельса. На регулируемых переездах отсутствует знак 2.5 и вынужденная остановка автомобиля происходит только при запрещающем сигнале светофора. Интенсивность движения железнодорожного транспорта – количество поездов, проходящих через железнодорожный переезд в час. От интенсивности движения железнодорожного транспорта зависит количество закрытий шлагбаума на железнодорожном переезде для пропуска железнодорожного состава. Максимальная пропускная способность железнодорожного переезда – количество автотранспорта, которое может проехать через переезд без остановки в течение часа. После выбора всех параметров железнодорожного переезда программа строит имитационную модель с ранее выбранными характеристиками и выдает результаты моделирования в зависимости от интенсивности движения автомобильного и железнодорожного транспорта.

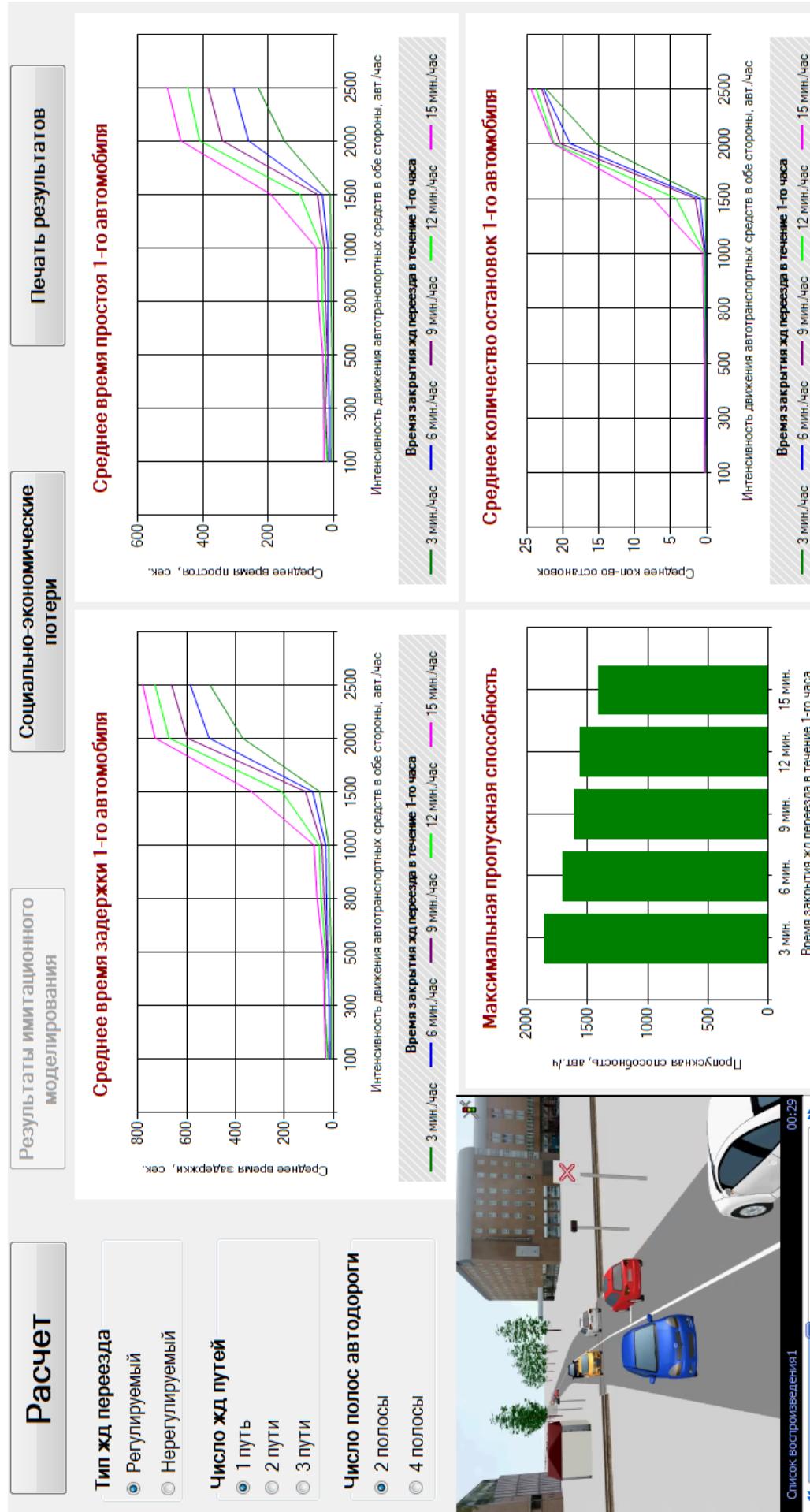


Рис. 7. Программа оценки социально-экономических потерь на железнодорожных переездах (начало)

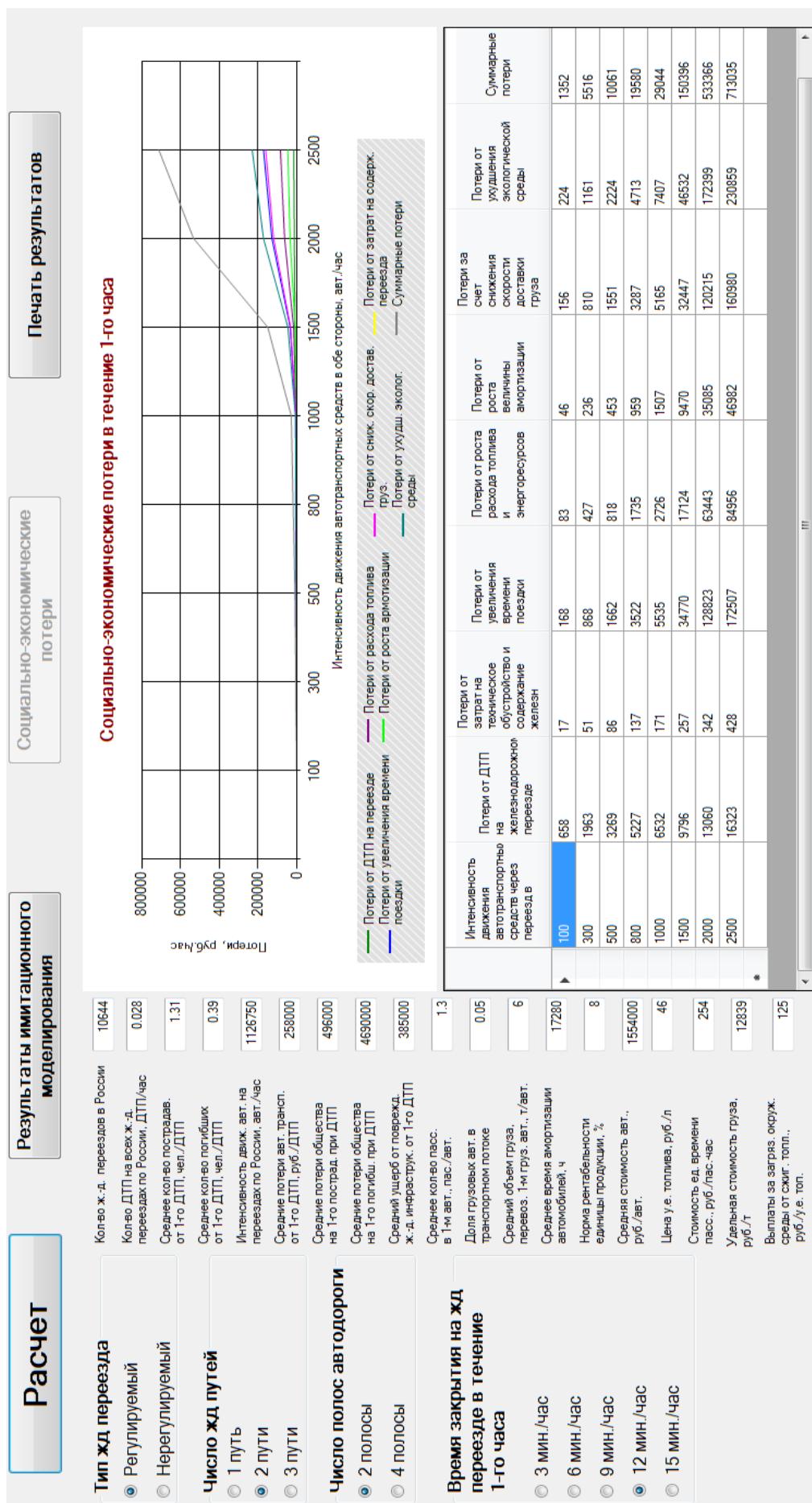


Рис. 7. Программа оценки социально-экономических потерь на железнодорожных пересадках (окончание)

Основными параметрами железнодорожного переезда, которые оказывают влияние на изменение его технических показателей, являются: тип переезда, время закрытия переезда $T_{закр}$, число железнодорожных путей и автомобильной дороги, интенсивность движения автотранспортных средств через переезд $N_{авт}$.

Для регулируемого железнодорожного переезда с одним железнодорожным путем и двумя полосами автомобильной дороги пропускная способность железнодорожного переезда $N_{макс}$ будет вычисляться по формуле с коэффициентом корреляции $n^2 = 0,996$, авт./ч:

$$N_{макс} = 0,714T_{закр}^2 - 49,19T_{закр} + 1984. \quad (1)$$

При закрытии железнодорожного переезда $T_{закр}$ на 12 мин/ч средняя задержка одного автомобиля будет составлять, ч:

– при $N_{авт} > N_{макс}$ с коэффициентом корреляции $n^2 = 0,994$:

$$T_{зад} = 0,0001N_{авт}^2 - 0,136N_{авт} + 46,14; \quad (2)$$

– при $N_{авт} < N_{макс}$ с коэффициентом корреляции $n^2 = 0,995$:

$$T_{зад} = -0,0002N_{авт}^2 + 1,15N_{авт} - 1227,3. \quad (3)$$

Для нерегулируемого железнодорожного переезда, который представлен двумя железнодорожными путями и двумя автомобильными полосами, пропускная способность железнодорожного переезда $N_{макс}$, авт./ч, будет вычисляться по формуле с коэффициентом корреляции $n^2 = 0,98$:

$$N_{макс} = -0,103T_{закр}^2 - 13,91T_{закр} + 936. \quad (4)$$

При закрытии железнодорожного переезда $T_{закр}$ на 12 мин/ч средняя задержка одного автомобиля будет составлять:

– при $N_{авт} > N_{макс}$ с коэффициентом корреляции $n^2 = 0,98$, ч:

$$T_{зад} = 0,0003N_{авт}^2 - 0,15N_{авт} + 15,63; \quad (5)$$

– при $N_{авт} < N_{макс}$ с коэффициентом корреляции $n^2 = 1$, ч:

$$T_{зад} = -0,0005N_{авт}^2 + 2,15N_{авт} - 1276,1. \quad (6)$$

Построенные функциональные зависимости были получены методом имитационного моделирования, что дает высокую точность результатов. Анализ зависимостей графиков и функции показывает резкий рост задержек автотранспортных средств на переезде при интенсивности автотранспорта, равной максимальной и превышающей ее, что в свою очередь влечет увеличение потерь участников дорожного движения.

Выводы

Развитие городской транспортной системы должно основываться на интегрированном взаимодействии всех видов транспорта, при этом основным критерием оценки эффективности функционирования такой системы являются потери, которые несут участники дорожного движения.

Оценка данных потерь является сложной задачей, которая может быть решена с использованием средств имитационно-аналитического моделирования. Основной результат при решении данной задачи – организация безбарьерных схем движения транспорта с учетом минимизации интегрированных потерь от функционирования железнодорожно-автомобильных пересечений в городской черте. Мониторинг потерь при наличии однорядневых пересечений в городской черте позволит определить критическую точку, в которой возникает необходимость пересмотра транспортных развязок и организации разнорядневых пересечений. Основным параметром оценки является интенсивность движения через переезд как автомобильного, так и железнодорожного транспорта.

Список источников

1. Зырянов В. В., Левандовский В. В. Анализ подходов к гибкому ограничению скорости на автомагистралях // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 4 (63). С. 49–54.
2. Зырянов В. В., Феофилова А. А., Чуклинов Н. Н. Динамическая маршрутизация транспортных потоков как метод снижения транспортной нагрузки на элементы УДС // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 1 (60). С. 74–80.
3. Лебедева О. А., Гозбенко В. Е., Каргапольцев С. К. Моделирование транспортной сети с учетом компрессионной оценки матрицы корреспонденций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 4 (51). С. 28–33.

4. Демьянов В. В., Имарова О. Б., Скоробогатов М. Э. Состояние проблемы и методы обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 4 (135). С. 215–230.
5. Choosing the optimal control option for an intelligent transport system / M. Barsuk, V. Vorobyov, K. Gromenko [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 130. P. 248–259.
6. Efficient and secure logistics transportation system / M. Kolesnikov, N. Lyabakh, E. Mamaev, M. Bakalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 918. 7 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/346113306_Efficient_and_secure_logistics_transportation_system (дата обращения: 11.01.2023).
7. Зубков В. В., Сирина Н. Ф., Раевская П. Е. Применение экономико-математической модели при формировании оптимального варианта оптимизации транспортно-логистического процесса // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 2 (53). С. 30–36.
8. Bogachev T., Alekseychik T. and Bogachev V. Comparative assessment of the transport systems of the regions using fuzzy modeling // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 896. P. 651–658.
9. Methodological bases of modeling and optimization of transport processes in the interaction of railways and maritime transport / O. Chislov, V. Zadorozhniy, D. Lomash [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1083. P. 934–949.
10. Capacity and Traffic Management on a Heavy-Traffic Railway / V. Zubkov, E. Ryazanova, E. Chebotareva [et al.] // Line Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116. P. 934–949.
11. Gasparik J., Abramovic B. and Zitricky V. Research on Dependences of Railway Infrastructure Capacity // Tehnicki Vjesnik. 2018. № 25 (4). P. 1190–1195.
12. Krakovskiy Ю. М., Попова Н. Н. Обобщенное прогнозирование показателей грузовых перевозок железнодорожным транспортом на основе сценарного подхода // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3 (79). С. 132–138.
13. Data driven condition assessment of railway infrastructure / C. Hoelzl, E. Chatzi, S. Zuger [et al.] // Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations. 2021. Vol. 693. P. 693–701.
14. Horvath G., Szabo L. The role of the railway infrastructure in ports of Hungary // Conference: Fifth International Conference on Road and Rail Infrastructure. 2018. P. 895–902.
15. Smoczyński P., Gill A., Kadzinski A. Maintenance layers for railway infrastructure in Poland // Transport. 2020. Vol. 35 (6). P. 605–615.
16. Ларина Н. А. Железнодорожные территории – перспективы для развития города Москвы // Architecture and Modern Information Technologies. 2014. № 3 (28). Р. 6.
17. Mamaev Э. А., Ковалева Н. А. К оценке потерь экономики от неэффективности организации движения в транспортной сети // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. № 2 (54). С. 64–69.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617524. Программа оценки социально-экономических потерь на железнодорожных переездах : заявка № 2020616420 : дата поступления 22.06.2020 : зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.07.2020 / Хашев А. И., Mamaev Э. А.
19. Хашев А. И. Технология расчета потерь на железнодорожных переездах // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2020. № 1 (77). С. 137–144.

References

1. Zyryanov V. V., Levandovskiy V. V. Analysis of approaches to flexible limitation speeds on automobiles. *The world of transport and technological machines*. 2018;(63):49–54. (In Russ.).
2. Zyryanov V. V., Feofilova A. A., Chuklinov N. N. Dynamic routing of transport flows as a method of reducing the transport load for macro elements. *The world of transport and technological machines*. 2018;(60):74–80. (In Russ.).
3. Lebedeva O. A., Gozbenko V. E., Kargapolsev S. K. Modeling of a transport network taking into account compression evaluation of the correspondence matrix. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(51):28–33. (In Russ.).
4. Demianov V. V., Imarova O. B., Skorobogatov M. E. State of the problem and methods of traffic safety provision on railroad crossings. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(135):215–230. (In Russ.).
5. Barsuk M., Vorobyov V., Gromenko K., Konkin A. and Shepilova E. Choosing the optimal control option for an intelligent transport system. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020;130:248–259.
6. Kolesnikov M., Lyabakh N., Mamaev E. and Bakalov M. Efficient and secure logistics transportation system. *International Organization Partners Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;918:7. URL: https://www.researchgate.net/publication/346113306_Efficient_and_secure_logistics_transportation_system.

7. Zubkov V. V., Sirina N. F., Rayevskaya P. E. Application of economic-mathematical model in the formation of the optimal option for optimizing the transport and logistics process. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(53):30–36. (In Russ.).
8. Bogachev T., Alekseychik T. and Bogachev V. Comparative assessment of the transport systems of the regions using fuzzy modeling. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018;896:651–658.
9. Chislov O., Zadorozhniy V., Lomash D., Chebotareva E., Solop I. and Bogachev T. Methodological bases of modeling and optimization of transport processes in the interaction of railways and maritime transport. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1083:934–949.
10. Zubkov V., Ryazanova E., Chebotareva E., Bakalov M. and Gordienko A. Capacity and Traffic Management on a Heavy-Traffic Railway. *Line Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1116:934–949.
11. Gasparik J., Abramovic B. and Zitricky V. Research on Dependences of Railway Infrastructure Capacity. *Tehnicki Vjesnik*. 2018;25(4):1190–1195.
12. Krakovskiy Yu. M., Popova N. N. The generalized forecasting of freight transport indicators by rail based on scenario method. *The Rostov State Transport University Bulletin*. 2020;(79):132–138. (In Russ.).
13. Hoelzl C., Chatzi E., Zuger S., Dertimanis V., Winklehner D. and Oprandi A. Data driven condition assessment of railway infrastructure. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations*. 2021;693:693–701.
14. Horvath G. and Szabo L. The role of the railway infrastructure in ports of Hungary. *Conference: Fifth International Conference on Road and Rail Infrastructure*. 2018. P. 895–902.
15. Smoczynski P., Gill A. and Kadzinski A. Maintenance layers for railway infrastructure in Poland. *Transport*. 2020;35(6):605–615.
16. Larina N. A. Railway area – prospects for development of Moscow. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2014;3(28): 6 p. (In Russ.).
17. Mamaev E. A., Kovaleva N. A. On the assessment of economic loss from inefficient organization of traffic in a transport network. *The Rostov State Transport University Bulletin*. 2014;(54):64–69. (In Russ.).
18. Khashev A. I., Mamaev E. A. Certificate of state registration of the computer program No. 2020617524. Program for assessing socio-economic losses at railway crossings. Application No. 2020616420. Date of receipt 22.06/2020. Registered in the Register of computer programs 08.07.2020. (In Russ.).
19. Khashev A. I. Technology for calculating losses at rail crossings. *The Rostov State Transport University Bulletin*. 2020;(77):137–144. (In Russ.).

Информация об авторах

Н. А. Ковалева – доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Ростовского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.
 А. И. Хашев – доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Ростовского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.
 Т. Э. Мамаев – начальник технологической службы Северо-Кавказской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Information about the authors

N. A. Kovaleva – Associate Professor of the Logistics and Management of Transport System Department, Rostov State Transport University, Candidate of Engineering.
 A. I. Khashev – Associate Professor of the Logistics and Management of Transport System Department, Rostov State Transport University, Candidate of Engineering.
 T. E. Mamaev – Head of the Technological Service of the North Caucasus Railway – Branch of Russian Railways.

Статья поступила в редакцию 16.01.2023; одобрена после рецензирования 25.01.2023; принятая к публикации 16.02.2023.

The article was submitted 16.01.2023; approved after reviewing 25.01.2023; accepted for publication 16.02.2023.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 624.159.2

doi 10.52170/1815-9265_2023_64_74

Оценка эффективности внедрения систем контроля технического состояния железнодорожного переезда

Наталья Борисовна Попова¹, Александра Дмитриевна Калидова²,
Иван Александрович Кутень^{3✉}, Петр Геннадьевич Швецов⁴

^{1,2,3,4} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ pnb1512@yandex.ru

² alexsandra_kd@bk.ru

³ Kraz0893@mail.ru✉

⁴ petr.shvetsov.99@mail.ru

Аннотация. Место, в котором в одном уровне происходит пересечение автомобильной и железной дорог, является потенциально опасной зоной. В связи с этим во многих европейских странах наблюдается тенденция сокращения числа железнодорожных переездов. Переезд демонтируют, а на его месте проектируется путепроводная развязка в разных уровнях. Это позволяет снизить вероятность возникновения дорожно-транспортных происшествий при движении транспорта. Однако строительство путепровода является очень длительным и трудоемким процессом, который требует значительных затрат. Поэтому стоит рассматривать и другие методы повышения уровня безопасности на железнодорожных переездах. Текущее состояние, а также заблаговременное выявление отказов основных технических элементов переездной сигнализации определяют безопасное функционирование железнодорожного переезда.

Внедрение систем диагностики и мониторинга текущего состояния переезда позволяет незамедлительно реагировать на возникновение неисправностей в работе железнодорожной автоматики, принимать верные решения, направленные на исключение выхода из строя оборудования. Целесообразность внедрения систем диагностирования доказана на примере разработанного программного обеспечения «Мониторинг переездов». Проведенные расчеты полностью подтверждают эффективность его внедрения, так как расходы на внедрение программы и ее обслуживание составили 281 600 р., что значительно превышает потенциальные потери, связанные с возможными задержками поездов, которые составили 3 434 741 р.

Ключевые слова: железнодорожный переезд, система технического диагностирования, уровень безопасности, текущее состояние, мониторинг, устройства автоматики и телемеханики, эффективность системы

Для цитирования: Попова Н. Б., Калидова А. Д., Кутень И. А., Швецов П. Г. Оценка эффективности внедрения систем контроля технического состояния железнодорожного переезда // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 74–84. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_74.

TRANSPORT

Original article

Evaluating the effectiveness of introducing technical condition monitoring systems for railway crossings

Natalia B. Popova¹, Alexsandra D. Kalidova², Ivan A. Kuten^{3✉}, Petr G. Shvetsov⁴

^{1,2,3,4} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ pnb1512@yandex.ru

² alexsandra_kd@bk.ru

³ Kraz0893@mail.ru✉

⁴ petr.shvetsov.99@mail.ru

Abstract. The place where a road and railway intersect at the same level is a potentially hazardous area. For this reason, there is a trend in many European countries to reduce the number of railway crossings. The crossing will be dismantled and an overpass on different levels will be designed in its place. This reduces the likelihood of traffic accidents. However, the construction of an overpass is a very time-consuming and labour-intensive process that requires considerable expense. It is therefore worth considering other methods to improve safety at railway

crossings. The current state, as well as early detection of pre-failure states of the main technical elements of a railway crossing largely determines its accident-free functioning.

The purpose of this article is to evaluate the effectiveness of diagnostic systems. Implementation of diagnostics and monitoring systems of the current state of the crossing allows reacting immediately to occurrence of faults in operation of railway automatics, to make correct decisions aimed at exclusion of equipment failure. The feasibility of introducing diagnostic systems is proved by the example of the programme Crossing Monitoring. The carried out calculations fully confirm the effectiveness of its implementation, as the cost of the programme implementation and maintenance was 281 600 rubles, which significantly exceeds the potential losses associated with possible train delays, they amounted to 3 434 741 rubles.

Keywords : railway crossing, technical diagnostics system, safe level, current status, monitoring, automation and telemechanics devices, system performance effectiveness

For citation : Popova N. B., Kalidova A. D., Kuten I. A., Svetsov P. G. Evaluating the effectiveness of introducing technical condition monitoring systems for railway crossings. The Siberian Transport University Bulletin. 2023;(64):74–84. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_74.

Введение

Железнодорожный переезд является одним из наиболее ответственных элементов транспортной инфраструктуры, так как он обеспечивает пересечение в одном уровне рельсовой колеи с автодорогой. От его технического состояния напрямую зависит бесперебойное и ритмичное функционирование как железнодорожного, так и автомобильного транспорта. Отказ в работе любого из элементов переезда в значительной степени увеличивает вероятность возникновения потенциальной аварии, которая может повлечь за собой самые непредсказуемые последствия, например, выход из строя различного переездного оборудования, задержки поездов и автомобилей, а также результатом отказа могут быть и более трагичные последствия – человеческие жертвы. Именно поэтому на сегодняшний день очень важным вопросом остается заблаговременное определение и незамедлительное устранение отказов, для обнаружения которых используются системы технического диагностирования [1].

Целью исследования является анализ систем диагностирования текущего состояния элементов железнодорожного переезда, а также оценка эффективности внедрения системы контроля технического состояния «Мониторинг переездов».

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующий перечень задач:

- выполнить анализ текущего уровня безопасности на железнодорожном переезде;
- ознакомиться с системой «Мониторинг переездов», рассмотреть ее основные и дополнительные возможности;

– изучить методику оценки эффективности применения систем технического диагностирования;

– рассчитать эффективность внедрения системы «Мониторинг переездов».

Проблема обеспечения безопасности на железнодорожном переезде

Железнодорожный переезд представляет собой источник потенциальной опасности для движения поездов, автомобилей и пешеходов. Несмотря на принимаемые усилия, на переездах по-прежнему нередким явлением становятся дорожно-транспортные происшествия [2]. Для оценки текущего уровня безопасности на переездах необходимо обратиться к статистическим данным. Согласно информации, полученной с официального сайта Министерства внутренних дел Российской Федерации [3], в Новосибирской области с 2015 по 2021 г. на переездах погибло 9 чел. (рис. 1). Если рассмотреть данные по всей России, а не по еециальному субъекту, то только за 2021 г. было зафиксировано 219 происшествий на железнодорожных переездах. В результате этих происшествий пострадали 133 чел., среди которых 49 пострадавших, которым не удалось спасти жизнь [3].

Все это свидетельствует о том, что вопрос обеспечения безопасности на железнодорожном переезде требует особого внимания.

Технические возможности программы «Мониторинг переездов»

Программа была разработана Министерством транспорта и дорожного хозяйства Новосибирской области совместно с Сибирским государственным университетом путей сообщения и компанией «Вега-Абсолют» с целью

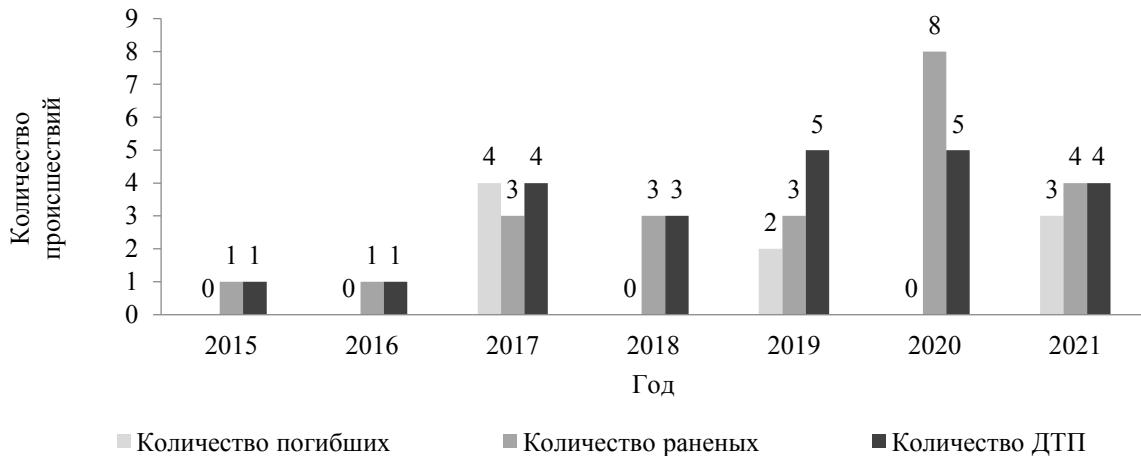


Рис. 1. Данные о количестве дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах в Новосибирской области с 2015 по 2021 г.

осуществления контроля технического состояния железнодорожных переездов и повышения уровня безопасности при проезде автотранспорта через переезд.

После оснащения железнодорожного переезда необходимыми модулями и датчиками у пользователя программы появляется доступ к информации о данном переезде. Все переезды, оснащенные данной системой, отображаются на карте. Интерфейс главной страницы программы показан на рис. 2.

К основным функциям программы относятся:

- мониторинг технического состояния железнодорожного переезда без использования физического кабеля между переездом и пунктом диспетчера;

- контроль пересечения переездов на запрещающий сигнал светофора транспортными

средствами, оборудованными системой ГЛОНАСС;

- выявление потенциально опасных переездов посредством анализа зафиксированных нарушений личным транспортом граждан без установления владельцев автомобилей.

Дополнительными функциями программы являются:

- предупреждение водителей автомобилей, оборудованных системой ГЛОНАСС, о приближении к закрывающемуся/закрытому переезду;

- отображение информации в навигационных приложениях об открытых/закрытых железнодорожных переездах;

- возможность оценки влияния железнодорожных переездов в черте города на образование заторов.

Пользователь данной программы может получить информацию о количестве передви-

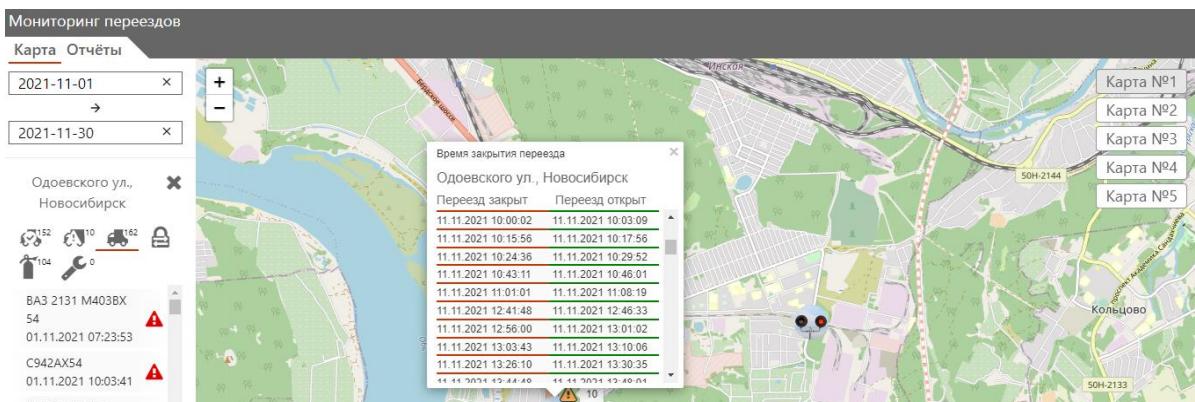


Рис. 2. Интерфейс программы «Мониторинг переездов»

жений автомобилей через выбранный переезд и о техническом состоянии переезда:

- данные о количестве автомобилей, которые проследовали через выбранный переезд без нарушения Правил дорожного движения (рис. 3, а);

- данные о количестве автомобилей, которые проследовали через выбранный переезд с нарушениями Правил дорожного движения (рис. 3, б);

- данные по общему количеству автомобилей, которые проследовали через железнодорожный переезд (рис. 3, в);

- данные о количестве аварий, произошедших на переезде (рис. 3, г);

- данные о количестве неисправностей на переезде (рис. 3, д).

При размещении системы контроля на переезде устанавливаются средства фиксации государственных знаков автомобилей. Фиксация производится круглосуточно. Данные передаются в систему.

Рис. 3. Основные функции программы «Мониторинг переездов»

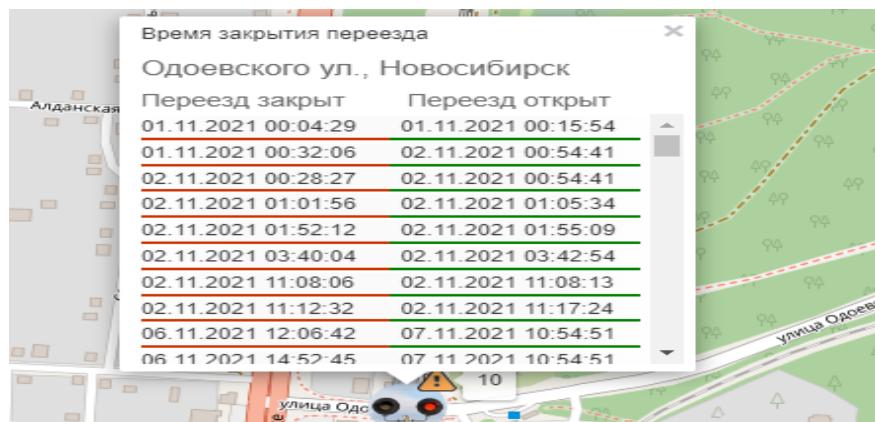


Рис. 4. Данные о времени закрытия и открытия переезда

Оснащение переезда диагностическим комплексом позволяет осуществлять контроль его работы. Программа позволяет в автоматическом режиме фиксировать время закрытия и открытия переезда. На рис. 4 показана информация о работе переезда.

С помощью данной программы можно получить отчет за выбранный период времени о количестве автомобилей, которые проследовали через конкретный переезд. На рис. 5 представлены отчетные данные по количеству проездов автомобилей через выбранный переезд.

Также программа собирает информацию о неисправностях основных элементов переезда. Все неисправности подразделяются в зависимости от продолжительности в следующих временных интервалах:

- до 2 с;
- от 2 до 5 с;
- от 5 до 30 с;
- от 30 с до 2 мин;

- от 2 до 5 мин;
- от 5 до 15 мин;
- более 15 мин.

Информация о возникновении неисправностей на переездах отражается в табличной форме, пример которой представлен на рис. 6.

Описание метода оценки эффективности работы систем диагностирования оборудования железнодорожных переездов

Диагностика устройств автоматики и телемеханики железнодорожного переезда является необходимой мерой по причине того, что нарушение нормального режима работы технических элементов переезда может послужить причиной аварии. Проводить диагностику можно несколькими способами, наиболее распространенными из которых являются следующие: проведение всех необходимых измерений основных параметров переезда непосредственно об-

служивающим персоналом и получение информации о техническом состоянии переезда в автоматическом режиме.

В последнее время на сети железных дорог передовых стран происходит активное внедрение микропроцессорной техники, которая позволяет не только получать информацию о текущем значении контролируемого параметра, но и прогнозировать техническое состояние [4].

Одной из функций переездных систем является диагностика и передача информации о техническом состоянии систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Также должна обеспечиваться передача информации одному из дежурных прилегающих станций или поездному диспетчеру, которая позволяет оценивать способность системы выполнять свои основные функции (подавать сигнал, запрещающий движение, и осуществлять заграждение) [5].

Мониторинг переездов																																							
Карта		Отчёты																																					
По проездам		По переездам																																					
Недельный		Месячный																																					
2021-11-01		x																																					
→																																							
2021-11-30		x																																					
Скачать																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Переезд / Период</th> <th colspan="2">01.11.2021-30.11.2021</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Переезд Куйбышев</td> <td>3</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Одоевского ул., Новосибирск</td> <td>152</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Переезд на ст. Совхозная</td> <td>17</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Переезд возле Изыллы</td> <td>17</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Переезд Завьялово</td> <td>26</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Переезд возле Ферма</td> <td>10</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Переезд возле аэропорта</td> <td>6</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Переезд в Мочице</td> <td>3</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Переезд на Хмельницкого</td> <td>59</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Переезд Изынский</td> <td>17</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Пашинский Переезд</td> <td>56</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>				Переезд / Период	01.11.2021-30.11.2021		Переезд Куйбышев	3	0	Одоевского ул., Новосибирск	152	10	Переезд на ст. Совхозная	17	0	Переезд возле Изыллы	17	1	Переезд Завьялово	26	0	Переезд возле Ферма	10	0	Переезд возле аэропорта	6	0	Переезд в Мочице	3	0	Переезд на Хмельницкого	59	0	Переезд Изынский	17	1	Пашинский Переезд	56	0
Переезд / Период	01.11.2021-30.11.2021																																						
Переезд Куйбышев	3	0																																					
Одоевского ул., Новосибирск	152	10																																					
Переезд на ст. Совхозная	17	0																																					
Переезд возле Изыллы	17	1																																					
Переезд Завьялово	26	0																																					
Переезд возле Ферма	10	0																																					
Переезд возле аэропорта	6	0																																					
Переезд в Мочице	3	0																																					
Переезд на Хмельницкого	59	0																																					
Переезд Изынский	17	1																																					
Пашинский Переезд	56	0																																					

Рис. 5. Данные о количестве проездов автотранспорта через переезд

Мониторинг переездов																																																																																																																																																																																																																																																														
Карта		Отчёты																																																																																																																																																																																																																																																												
По проездам		По переездам																																																																																																																																																																																																																																																												
Недельный		Месячный																																																																																																																																																																																																																																																												
2021-01-01		x																																																																																																																																																																																																																																																												
→																																																																																																																																																																																																																																																														
2021-03-31		x																																																																																																																																																																																																																																																												
Скачать																																																																																																																																																																																																																																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">№ Переезд / Период</th> <th colspan="12">01.01.2021-31.01.2021</th> <th colspan="12">01.02.2021-28.02.2021</th> <th rowspan="2">01</th> </tr> <tr> <th>до 2 секунд</th><th>от 2 до 5 секунд</th><th>от 5 до 30 секунд</th><th>от 2 до 2 мин</th><th>от 2 до 5 мин</th><th>от 5 до 15 мин</th><th>более 15 мин</th><th>Всего</th><th>до 2 секунд</th><th>от 2 до 5 секунд</th><th>от 5 до 30 секунд</th><th>от 2 до 2 мин</th><th>от 2 до 5 мин</th><th>от 5 до 15 мин</th><th>более 15 мин</th><th>Всего</th><th>до 2 секунд</th><th>от 2 до 5 секунд</th><th>от 5 до 30 секунд</th><th>от 2 до 2 мин</th><th>от 2 до 5 мин</th><th>от 5 до 15 мин</th><th>более 15 мин</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Переезд Куйбышев</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>45</td><td>5</td><td>0</td><td>53</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td><td>4</td><td>57</td><td>6</td><td>0</td><td>69</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>2 Переезд Одоевского ул., Новосибирск</td><td>0</td><td>0</td><td>10</td><td>329</td><td>1808</td><td>145</td><td>4</td><td>2296</td><td>1</td><td>1</td><td>8</td><td>383</td><td>1844</td><td>178</td><td>4</td><td>2419</td><td>8</td><td>47</td><td>112</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td> </tr> <tr> <td>3 Переезд на ст. Совхозная</td><td>0</td><td>0</td><td>6</td><td>599</td><td>1146</td><td>156</td><td>10</td><td>1917</td><td>1</td><td>0</td><td>7</td><td>913</td><td>1577</td><td>255</td><td>11</td><td>2764</td><td>2</td><td>0</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td> </tr> <tr> <td>4 Переезд возле Изыллы</td><td>1</td><td>0</td><td>29</td><td>602</td><td>1747</td><td>62</td><td>3</td><td>2444</td><td>4</td><td>1</td><td>41</td><td>772</td><td>1648</td><td>36</td><td>2</td><td>2504</td><td>4</td><td>0</td><td>32</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td> </tr> <tr> <td>5 Переезд Завьялово</td><td>1</td><td>0</td><td>52</td><td>407</td><td>1858</td><td>142</td><td>2</td><td>2462</td><td>0</td><td>1</td><td>66</td><td>457</td><td>1817</td><td>141</td><td>4</td><td>2486</td><td>1</td><td>0</td><td>52</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td> </tr> <tr> <td>6 Переезд возле Ферма (3365км)</td><td>16</td><td>83</td><td>633</td><td>1360</td><td>709</td><td>24</td><td>24</td><td>2849</td><td>22</td><td>87</td><td>560</td><td>1294</td><td>805</td><td>37</td><td>27</td><td>2832</td><td>13</td><td>49</td><td>342</td><td>8</td><td>8</td><td>8</td><td>8</td><td>8</td><td>8</td><td>8</td><td>8</td><td>8</td> </tr> <tr> <td>7 Переезд возле аэропорта (3360км)</td><td>25</td><td>130</td><td>1171</td><td>2103</td><td>491</td><td>12</td><td>15</td><td>3947</td><td>26</td><td>112</td><td>1156</td><td>2186</td><td>677</td><td>32</td><td>1</td><td>4190</td><td>22</td><td>118</td><td>1007</td><td>21</td><td>21</td><td>21</td><td>21</td><td>21</td><td>21</td><td>21</td><td>21</td><td>21</td> </tr> </tbody> </table>				№ Переезд / Период	01.01.2021-31.01.2021												01.02.2021-28.02.2021												01	до 2 секунд	от 2 до 5 секунд	от 5 до 30 секунд	от 2 до 2 мин	от 2 до 5 мин	от 5 до 15 мин	более 15 мин	Всего	до 2 секунд	от 2 до 5 секунд	от 5 до 30 секунд	от 2 до 2 мин	от 2 до 5 мин	от 5 до 15 мин	более 15 мин	Всего	до 2 секунд	от 2 до 5 секунд	от 5 до 30 секунд	от 2 до 2 мин	от 2 до 5 мин	от 5 до 15 мин	более 15 мин	1 Переезд Куйбышев	0	0	0	3	45	5	0	53	0	0	2	4	57	6	0	69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 Переезд Одоевского ул., Новосибирск	0	0	10	329	1808	145	4	2296	1	1	8	383	1844	178	4	2419	8	47	112	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3 Переезд на ст. Совхозная	0	0	6	599	1146	156	10	1917	1	0	7	913	1577	255	11	2764	2	0	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4 Переезд возле Изыллы	1	0	29	602	1747	62	3	2444	4	1	41	772	1648	36	2	2504	4	0	32	7	7	7	7	7	7	7	7	7	5 Переезд Завьялово	1	0	52	407	1858	142	2	2462	0	1	66	457	1817	141	4	2486	1	0	52	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6 Переезд возле Ферма (3365км)	16	83	633	1360	709	24	24	2849	22	87	560	1294	805	37	27	2832	13	49	342	8	8	8	8	8	8	8	8	8	7 Переезд возле аэропорта (3360км)	25	130	1171	2103	491	12	15	3947	26	112	1156	2186	677	32	1	4190	22	118	1007	21	21	21	21	21	21	21	21	21
№ Переезд / Период	01.01.2021-31.01.2021												01.02.2021-28.02.2021												01																																																																																																																																																																																																																																					
	до 2 секунд	от 2 до 5 секунд	от 5 до 30 секунд	от 2 до 2 мин	от 2 до 5 мин	от 5 до 15 мин	более 15 мин	Всего	до 2 секунд	от 2 до 5 секунд	от 5 до 30 секунд	от 2 до 2 мин	от 2 до 5 мин	от 5 до 15 мин	более 15 мин	Всего	до 2 секунд	от 2 до 5 секунд	от 5 до 30 секунд	от 2 до 2 мин	от 2 до 5 мин	от 5 до 15 мин	более 15 мин																																																																																																																																																																																																																																							
1 Переезд Куйбышев	0	0	0	3	45	5	0	53	0	0	2	4	57	6	0	69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																			
2 Переезд Одоевского ул., Новосибирск	0	0	10	329	1808	145	4	2296	1	1	8	383	1844	178	4	2419	8	47	112	3	3	3	3	3	3	3	3	3																																																																																																																																																																																																																																		
3 Переезд на ст. Совхозная	0	0	6	599	1146	156	10	1917	1	0	7	913	1577	255	11	2764	2	0	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7																																																																																																																																																																																																																																		
4 Переезд возле Изыллы	1	0	29	602	1747	62	3	2444	4	1	41	772	1648	36	2	2504	4	0	32	7	7	7	7	7	7	7	7	7																																																																																																																																																																																																																																		
5 Переезд Завьялово	1	0	52	407	1858	142	2	2462	0	1	66	457	1817	141	4	2486	1	0	52	4	4	4	4	4	4	4	4	4																																																																																																																																																																																																																																		
6 Переезд возле Ферма (3365км)	16	83	633	1360	709	24	24	2849	22	87	560	1294	805	37	27	2832	13	49	342	8	8	8	8	8	8	8	8	8																																																																																																																																																																																																																																		
7 Переезд возле аэропорта (3360км)	25	130	1171	2103	491	12	15	3947	26	112	1156	2186	677	32	1	4190	22	118	1007	21	21	21	21	21	21	21	21	21																																																																																																																																																																																																																																		

Рис. 6. Информация о количестве возникших неисправностей

На сегодняшний день на сети железных дорог России процесс диагностирования устройств автоматики и телемеханики в большинстве случаев является очень трудоемким и характеризуется высоким уровнем участия человека. Это в первую очередь обусловлено применением релейной аппаратуры и медленными темпами внедрения микропроцессорного оборудования. Также стоит отметить, что качество процесса передачи данных о состоянии железнодорожного переезда требует внимания. Внедрение беспроводных систем передачи данных позволит решить некоторые вопросы, которые относятся к своевременности получения информации о состоянии устройств автоматики переезда.

Эффективность применения системы диагностирования оборудования переездов определяется сравнением затрат, связанных с ее внедрением и обслуживанием в течение расчетного периода, с экономическим эффектом, полученным в результате применения системы. В случае, если ожидаемый экономический эффект от внедрения системы будет больше, чем затраты на ее установку и обслуживание, применение данной системы является экономически эффективной мерой. В противном же случае использование системы будет экономически нецелесообразно. Эффективность внедрения системы диагностирования технического состояния железнодорожного переезда можно оценить при помощи формулы

$$\sum_{i=0}^T [p_j N_{\text{оп}}] i + \sum_{i=0}^T (E_{\Delta}) i > \sum_{i=0}^T K_i,$$

где p_j – средние потери от возникновения одного отказа; $N_{\text{оп}}$ – количество определяемых отказов системой мониторинга за определенный период времени; E_{Δ} – экономия средств за счет статей экономии, не касающихся обнаружения и ликвидации отказов; K_i – общая сумма капиталовложений на внедрение системы технического диагностирования и мониторинга [5].

Расчет эффективности внедрения системы диагностирования технического состояния железнодорожного переезда

Все отказы можно разделить на три категории, которые определяются в зависимости от их последствий:

первая категория – отказы, приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) на 1 ч и более либо приведшие к транспортным про-

исшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта;

вторая категория – отказы, приведшие к задержке на перегоне (станции) пассажирского или пригородного поезда продолжительностью от 6 мин до 1 ч, грузового поезда – продолжительностью от 15 мин до 1 ч;

третья категория – неисправности – случаи нарушения нормального функционирования технических средств, не имеющие последствий, относящихся к отказам 1-й и 2-й категорий [6].

На железнодорожных переездах отказы и неисправности чаще всего возникают по причине выхода из строя или из-за ненадлежащей работы устройств автоматики и телемеханики. Также отказы могут возникать и из-за нарушения связи между различными элементами железнодорожного переезда.

Для подразделений Управления автоматики и телемеханики Центральной дирекции инфраструктуры отказом является:

- нарушение работы устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики по причине неисправности ее оборудования и приборов;

- нарушение правил производства работ работниками дистанций сигнализации, централизации и блокировки, приведшее к отказу.

Программа «Мониторинг переездов» представляет пользователю доступ к информации о количестве обнаруженных неисправностей на определенном железнодорожном переезде в течение выбранного промежутка времени. Для оценки эффективности внедрения системы диагностирования будем рассматривать отказы 1-й и 2-й категорий в соответствии с приведенной ранее классификацией.

В системе диагностирования отказы подразделяются в зависимости от их продолжительности. Нас интересуют отказы от 5 до 15 мин и более 15 мин, так как продолжительность выбранных отказов соответствует отказам 1-й и 2-й категорий. В качестве отчетного периода возьмем первые три месяца 2021 г. Статистические данные о количестве отказов, выявленных программой «Мониторинг переездов» за январь, февраль и март 2021 г, представлены в табл. 1, 2 и 3 соответственно. В табл. 4 сведены суммарные значения по количеству отказов за первый квартал 2021 г.

Таблица 1

Статистические данные о количестве обнаруженных отказов за январь 2021 г.

Железнодорожный переезд	Продолжительность отказа						
	До 2 с	От 2 до 5 с	От 5 до 30 с	От 30 с до 2 мин	От 2 до 5 мин	От 5 до 15 мин	Более 15 мин
Переезд Куйбышев	0	0	0	3	45	5	0
Одоевского ул., Новосибирск	0	0	10	329	1 808	145	4
Переезд на ст. Совхозная	0	0	6	599	1 146	156	10
Переезд возле Изыллы	1	0	29	602	1 747	62	3
Переезд Завьялово	1	0	52	407	1 858	142	2
Переезд возле Ферма (3 365 км)	16	83	633	1 360	709	24	24
Переезд возле аэропорта (3 360 км)	25	130	1 171	2 103	491	12	15
Переезд в Мочище (3 356 км)	2	0	18	948	879	40	5
Переезд на Хмельницкого (2 км Новосибирск-Восточный)	0	0	0	7	156	20	1
Переезд Изынский	2	0	22	621	1 655	484	29
Пашинский переезд	1	6	5	17	182	66	2
<i>Итого</i>	48	219	1 946	6 996	10 676	1 156	95

Таблица 2

Статистические данные о количестве обнаруженных отказов за февраль 2021 г.

Железнодорожный переезд	Продолжительность отказа						
	До 2 с	От 2 до 5 с	От 5 до 30 с	От 30 с до 2 мин	От 2 до 5 мин	От 5 до 15 мин	Более 15 мин
Переезд Куйбышев	0	0	2	4	57	6	0
Одоевского ул., Новосибирск	1	1	8	383	1 844	178	4
Переезд на ст. Совхозная	1	0	7	913	1 577	255	11
Переезд возле Изыллы	4	1	41	772	1 648	36	2
Переезд Завьялово	0	1	66	457	1 817	141	4
Переезд возле Ферма (3 365 км)	22	87	560	1 294	805	37	27
Переезд возле аэропорта (3 360 км)	26	112	1 156	2 186	677	32	1
Переезд в Мочище (3 356 км)	3	0	14	885	807	26	1
Переезд на Хмельницкого (2 км Новосибирск-Восточный)	0	2	1	9	220	40	3
Переезд Изынский	0	2	18	587	1 580	492	25
Пашинский переезд	0	0	1	29	251	88	3
<i>Итого</i>	57	206	1 874	7 519	11 283	1 331	81

Таблица 3

Статистические данные о количестве обнаруженных отказов за март 2021 г.

Железнодорожный переезд	Продолжительность отказа						
	До 2 с	От 2 до 5 с	От 5 до 30 с	От 30 с до 2 мин	От 2 до 5 мин	От 5 до 15 мин	Более 15 мин
Переезд Куйбышев	0	0	0	4	46	1	1
Одоевского ул., Новосибирск	8	47	112	312	1 737	200	4
Переезд на ст. Совхозная	2	0	7	786	1 515	220	30
Переезд возле Изыллы	4	0	32	796	1 513	27	2
Переезд Завьялово	1	0	52	402	1 696	123	4
Переезд возле Ферма (3 365 км)	13	49	342	823	605	35	23
Переезд возле аэропорта (3 360 км)	22	118	1 007	2 010	560	3	0
Переезд в Мочище (3 356 км)	6	4	34	858	762	29	1
Переезд на Хмельницкого (2 км Новосибирск-Восточный)	1	3	4	12	204	31	0
Переезд Изынский	0	1	9	569	1518	501	23
Пашинский переезд	0	0	2	17	182	90	1
<i>Итого</i>	57	222	1 601	6 589	10 338	1 260	89

Таблица 4

Статистические данные о количестве обнаруженных отказов за первый квартал 2021 г.

Железнодорожный переезд	Продолжительность отказа						
	До 2 с	От 2 до 5 с	От 5 до 30 с	От 30 с до 2 мин	От 2 до 5 мин	От 5 до 15 мин	Более 15 мин
Переезд Куйбышев	0	0	2	11	148	12	1
Одоевского ул., Новосибирск	9	48	130	1 024	5 389	523	12
Переезд на ст. Совхозная	3	0	20	2 298	4 238	631	51
Переезд возле Изылы	9	1	102	2 170	4 908	125	7
Переезд Завьялово	2	1	170	1 266	5 371	406	10
Переезд возле Ферма (3 365 км)	51	219	1 535	3 477	2 119	96	74
Переезд возле аэропорта (3 360 км)	73	360	3 334	6 299	1 728	47	16
Переезд в Мочище (3 356 км)	11	4	66	2 691	2 448	95	7
Переезд на Хмельницкого (2 км Новосибирск-Восточный)	1	5	5	28	580	91	4
Переезд Изынский	2	3	49	1 777	4 753	1 477	77
Пашинский переезд	1	6	8	63	615	244	6
<i>Итого</i>	162	647	5 421	21 104	32 297	3 747	265

Минимальные размеры штрафа за один поездо-час простоя грузовых и пассажирских поездов для электрифицированных участков Западно-Сибирской железной дороги составляют 3 261,84 р. и 3 023,79 р. соответственно [6]. Для расчета эффективности внедрения системы будем принимать среднее значение штрафа, которое составляет 3 142,82 р.

Для оценки потенциальных затрат, связанных с отказами в работе железнодорожной автоматики, необходимо рассчитать суммарное время отказов. Расчет приведен в табл. 5.

Суммарное время отказов за первый квартал 2021 г. составляет 690 ч. На отказы от 5 до 15 мин приходится 37 470 мин (624 ч), а продолжительность отказов выше 15 мин составляет 3 975 мин (66 ч).

Также стоит отметить, что переезды необходимо оборудовать устройствами поездной

радиосвязи, прямой телефонной связью с дежурным по станции или постом электрической централизации, а при необходимости с поездным диспетчером. Наличие канала связи между переездом и ближайшей железнодорожной станцией необходимо с целью передачи информации о текущем состоянии основных устройств переездной автоматики, а также с целью передачи извещений в случае возникновения неисправности [2].

При оснащении железнодорожного переезда системой диагностирования информация о техническом состоянии переездной автоматики передается при помощи беспроводных сетей. Это дает возможность сократить затраты, связанные с укладкой кабельной линии от переезда до ближайшей железнодорожной станции. Чтобы оценить сокращение затрат, связанных с отсутствием необходимости в кабельном соединении

Таблица 5

Суммарная продолжительность отказов за первый квартал 2021 г.

Средняя продолжительность одного отказа, мин	Количество отказов	Продолжительность отказа, мин	Средняя продолжительность одного отказа, мин	Количество отказов	Продолжительность отказа, мин
10	12	120	15	1	15
	523	5 230		12	180
	631	6 310		51	765
	125	1 250		7	105
	406	4 060		10	150
	96	960		74	1 110
	47	470		16	240
	95	950		7	105
	91	910		4	60
	1 477	14 770		77	1 155
	244	2 440		6	90
	<i>Итого</i>	3 747		<i>Итого</i>	265
		37 470			3 975

нении, нужно определить расстояние от переезда до ближайшей железнодорожной станции и стоимость укладки 1 км кабеля.

Проектная стоимость укладки кабеля вдоль железнодорожной линии рассчитана в соответствии с нормативами [7]. Для определения промежуточных и итоговых значений стоимости использовалась программа DefSmeta [8]. Для перевода цен с уровня 2000 г. на уровень первого квартала 2021 г. необходимо воспользоваться индексом перехода цен, который составляет 4,53 [9]. В табл. 6 представлен расчет экономии средств за счет отсутствия кабельного соединения между железнодорожным переездом и ближайшей станцией.

Далее была определена общая сумма капиталовложений на внедрение системы диагно-

стирования. К капитальным вложениям относятся затраты, связанные с приобретением оборудования и его монтажом. Также стоит учесть и эксплуатационные затраты, возникшие в процессе обслуживания оборудования в течение выбранного периода времени. По данным Сибирского государственного университета путей сообщения и компании «Вега-Абсолют», затраты на оснащение одного железнодорожного переезда составляют 25 тыс. р. Затраты на обслуживание системы включают в себя плату за использование сотовой связи согласно тарифу оператора, что составляет порядка 200 р. в месяц. Затраты, связанные с оснащением железнодорожных переездов системой диагностирования и ее обслуживанием, представлены в табл. 7.

Таблица 6

Расчет экономии средств за счет отсутствия кабельного соединения между железнодорожным переездом и ближайшей станцией

Железнодорожный переезд	Ближайшая железнодорожная станция	Расстояние от переезда до станции, км	Стоимость укладки 1 км кабеля, р.	Общие затраты на укладку кабеля, р.
Переезд Куйбышев	Кайнск-Барабинский	0,6	81 166,37	48 699,82
Одоевского ул., Новосибирск	Матвеевка	0,1		8 116,64
Переезд на ст. Совхозная	Совхозная	0,1		8 116,64
Переезд возле Изылы	Девино	4,0		324 665,48
Переезд Завьялово	Курундус	2,1		170 449,38
Переезд возле Ферма (3 365 км)	Барлак	1,5		121 749,56
Переезд возле аэропорта (3 360 км)	Раздолье	1,2		97 399,64
Переезд в Мочище (3 356 км)	Мочище	1,3		105 516,28
Переезд на Хмельницкого (2 км Новосибирск-Восточный)	Новосибирск-Восточный	2,6		211 032,56
Переезд Изынский	Изынский	0,9		73 049,73
Пашинский переезд	Иня-Восточная	1,2		97 399,64
<i>Итого</i>		15,6		1 266 195,37

Таблица 7

Расчет затрат на оснащение переездов системой «Мониторинг переездов» и обслуживание в течение первого квартала 2021 г.

Железнодорожный переезд	Капитальные расходы на один переезд, р.	Эксплуатационные расходы на один переезд, р.	Суммарные расходы, тыс. р.
Переезд Куйбышев	25 000	200 · 3 = 600	25,6
Одоевского ул., Новосибирск			
Переезд на ст. Совхозная			
Переезд возле Изылы			
Переезд Завьялово			
Переезд возле Ферма (3 365 км)			
Переезд возле аэропорта (3 360 км)			
Переезд в Мочище (3 356 км)			
Переезд на Хмельницкого (2 км Новосибирск-Восточный)			
Переезд Изынский			
Пашинский переезд			
<i>Итого</i>	275 000	6 600	281,6

Чтобы оценить эффективность внедрения системы диагностирования, необходимо проверить, выполняется ли условие, обозначенное в приведенной выше формуле:

$$3\ 142,82 \cdot 690 + 1\ 266\ 195,37 > 281\ 600;$$

$$3\ 434\ 741,17 \text{ р.} > 281\ 600 \text{ р.}$$

Условие выполняется, на основании этого внедрение системы технического диагностирования является экономически целесообразным.

Выводы

1. На сегодняшний день проблема повышения уровня обеспечения безопасности на железнодорожном переезде требует особого внимания. Основными причинами аварий являются отказы, возникающие в работе переездной автоматики, а также человеческий фактор. Не всегда несчастные случаи на переездах происходят по причине неисправности его основных технических элементов. Стоит отметить, что очень часто жертвы дорожно-транспортных происшествий нарушают правила проезда через железнодорожный переезд и сами являются виновниками аварий. Человеческий фактор определяется только культурным уровнем самих участников движения, поэтому, чтобы снизить вероятность возникновения несчастных случаев, необходимо повысить уровень надежности основных систем переезда.

2. Системы технического диагностирования и мониторинга позволяют в режиме реального времени контролировать основные параметры переезда и дают возможность прогнозировать их дальнейшее изменение. В статье выполнен анализ систем диагностирования текущего состояния железнодорожного переезда и с помощью расчета определена эффективность внедрения системы контроля технического состояния. С целью решения поставленной задачи было сделано следующее: выполнен анализ текущего уровня безопасности на железнодорожном переезде; рассмотрена система контроля, определены ее основные и дополнительные возможности; исследована методика оценки эффективности применения систем технического диагностирования; рассчитана эффективность внедрения системы.

3. В результате проделанной работы установлено, что применение программы «Мониторинг переездов» является экономически целесообразным. Затраты на оснащение переезда модулями программы и их обслуживание в течение первого квартала 2021 г. значительно меньше затрат, которые могли появиться в результате возникновения отказов технических средств переезда.

Список источников

1. ГОСТ 33893–2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных переездах. Требования безопасности и методы контроля. Москва : Стандартинформ, 2019. 11 с.
2. Об утверждении условий эксплуатации железнодорожных переездов : приказ Министерства транспорта РФ от 31.08.2015 № 237. Москва, 2015. 46 с.
3. Показатели состояния безопасности дорожного движения // Госавтоинспекция : официальный сайт Министерства внутренних дел Российской Федерации. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 01.02.2023).
4. Лыков А. А., Ефанов Д. В., Власенко С. В. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 5 (42). С. 67–72.
5. Радковский С. А., Глущенко И. Ю., Диков А. О. Эффективность внедрения устройств контроля технического состояния переездной автоматики // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2020. № 58. С. 36–41.
6. Положение об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАНТ и Положение об учете, расследовании и анализе технологических нарушений в перевозочном процессе на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАТ : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 01.10.2018 № 2160/р. Москва, 2018. 41 с.
7. ГЭСНм 10-07-073-02. Прокладка кабелей связи вручную с одновременной разработкой траншеи в полосе отвода железных дорог: одного кабеля массой 1 м до 2 кг // Федеральная государственная информационная система ценообразования в строительстве : [сайт]. URL: <https://fgisrf.ru/gesnm/gesnm10-07-073-02.html> (дата обращения: 01.02.2023).
8. DefSmeta : [сайт]. URL: https://www.defsmeta.com/rgsn20/gsnm_10/giesnm-10-07-073-02.php (дата обращения: 15.02.2023).

9. О рекомендуемой величине индексов изменения сметной стоимости строительства в I квартале 2021 года, в том числе величине индексов изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ, индексов изменения сметной стоимости пусконаладочных работ, индексов изменения сметной стоимости проектных и изыскательских работ : письмо Минстроя России от 22.01.2021 № 1886-ИФ/09 // Минстрой России : [сайт]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/tsenoobrazovanie/indeksy-izmeneniya-smetnoy-stoimosti/> (дата обращения: 01.02.2023).

References

1. GOST 33893–2016 Interstate standard for the system of railway automation and telemechanics at railway crossings. Safety requirements and control methods. Moscow: Standartinform; 2019. 11 p. (In Russ.).
2. On approval of the conditions for the operation of railway crossings: approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of August 31, 2015 No. 237. Moscow; 2015. 46 p. (In Russ.).
3. Indicators of the road safety condition. *State traffic inspectorate: official website of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation.* (In Russ.). URL: <http://stat.gibdd.ru/>.
4. Lykov A. A., Efanov D. V., Vlasenko S. V. Technical diagnostics and monitoring of the state of ZhAT devices. *Transport of the Russian Federation.* 2012;(42):67–72. (In Russ.).
5. Radkovsky S. A., Glushchenko I. Yu., Dikov A. O. The effectiveness of the implementation of control devices for the technical condition of crossing automation . *Proceedings of the Donetsk Railway Transport Institute.* 2020;(58):36–41. (In Russ.).
6. On Approval of the Regulations on Accounting, Investigation and Analysis of Failures in the Operation of Technical Equipment on the Infrastructure of Russian Railways using automated system KACAT: approved by the Order of Russian Railways dated 01.10.2018 No. 2160/r. Moscow; 2018. 41 p. (In Russ.).
7. GESNm 10-07-073-02 Manual laying of communication cables with simultaneous development of a trench in the right of way of railways: one cable weighing 1 m to 2 kg. *Federal State Information Pricing System in Construction: [site].* (In Russ.). URL: <https://fgisrf.ru/gesnm10-07-073-02.html>.
8. DefSmeta: [site]. (In Russ.). URL: https://www.defsmeta.com/rgsn20/gsnm_10/giesnm-10-07-073-02.php.
9. On the recommended value of the index of change in the estimated cost of construction in the first quarter of 2021, including the value of the index of change in the estimated cost of construction and installation works, the index of change in the estimated cost of commissioning, the index of change in the estimated cost of design and survey work letter of the Ministry of Construction of Russia dated January 22.2021 No. 1886-IF/09. *Russian Ministry of Construction: [site].* (In Russ.). URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/tsenoobrazovanie/indeksy-izmeneniya-smetnoy-stoimosti/>.

Информация об авторах

Н. Б. Попова – профессор кафедры «Экономика транспорта» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор географических наук.
А. Д. Калидова – доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.
И. А. Кутень – преподаватель кафедры «Графика» Сибирского государственного университета путей сообщения.
П. Г. Швецов – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

N. B. Popova – Professor of the Transport Economics Department, Siberian Transport University, Doctor of Geographic Sciences.
A. D. Kalidova – Associate Professor of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.
I. A. Kuten – University Lecturer of the Graphic Art Department, Siberian Transport University.
P. G. Shvetsov – Postgraduate Student of the Technology of Transport Engineering and Operation of Machines Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 06.03.2023; одобрена после рецензирования 09.03.2023; принята к публикации 10.03.2023.

The article was submitted 06.03.2023; approved after reviewing 09.03.2023; accepted for publication 10.03.2023.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.224(-214)
doi 10.52170/1815-9265_2023_64_85

Решение локальных проблем адаптации транспортной инфраструктуры в условиях развития крупного города и его агломерации

Валерий Иванович Хабаров¹✉, Станислав Михайлович Петров²,
Роман Игоревич Макаров³

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

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

¹ Khabarov51@mail.ru✉

² PetrovSM@edu.stu.ru

³ MakarovRI@edu.stu.ru

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы адаптации локальных объектов транспортной инфраструктуры города в условиях развития транспортной системы, обусловленного ростом жилищного строительства, вводом крупных транспортных объектов и, как следствие, повышением интенсивности движения. Формулируется проблема идентификации критических объектов, существенно осложняющих транспортную ситуацию на фоне развития города, и, соответственно, задача параметрической и структурной адаптации этих объектов к новым условиям. Подобные задачи актуальны, поскольку регулярно возникают на уровне муниципальных служб. Развитие транспортной системы представляет собой одну из важнейших задач в городском хозяйстве.

Эволюционный подход к развитию транспортной системы крупных городов заставляет обратиться к эволюционным методам для оптимизации сложных систем. Инструментом для решения подобных проблем служит имитационное моделирование транспортной системы на локальном уровне (микромоделирование) вместе с методами решения экстремальных задач на транспортных графах. Формулируется задача выделения локальной транспортной сети, находящейся в зоне влияния критического объекта, как задача определения максимально сильно связанного графа. Используются оценки пропускной способности транспортной подсистемы для выделенной пары узлов. Для поиска альтернатив комплексов мероприятий с адаптацией критического объекта в пространстве применяются методы планирования экстремальных экспериментов на имитационной транспортной модели. Другой подход использует алгоритмы поиска максимального потока в транспортном графе. Предлагаются варианты методов решения задач по выбору эффективных комплексов мероприятий, направленных на удовлетворение баланса транспортного спроса и предложения. Эти методы учитывают высокую комбинаторную сложность такого класса задач. В качестве одного из возможных вариантов поиска с адаптацией предлагается модификация симплексного поиска в булевом пространстве. Показана эффективность такого метода в условиях высокой трудоемкости вычисления целевой функции. Предлагаемые подходы иллюстрируются на конкретных задачах реконструкции транспортной сети крупного города.

Результаты исследования могут быть использованы муниципальными службами для принятия решений по развитию транспортной системы города, а также для определения приоритетных направлений в работе по улучшению транспортной ситуации.

Ключевые слова: транспортная сеть, транспортная инфраструктура, критический транспортный объект, транспортный граф, транспортная сеть, пропускная способность, максимальный транспортный поток, комбинаторная оптимизация

Для цитирования: Хабаров В. И., Петров С. М., Макаров Р. И. Решение локальных проблем адаптации транспортной инфраструктуры в условиях развития крупного города и его агломерации // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 85–92. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_85.

TRANSPORT

Original article

Solving local problems of transport infrastructure adaptation in the development of a large city and its agglomeration

Valery I. Khabarov^{1✉}, Stanislav M. Petrov², Roman I. Makarov³

¹ Siberian Transport University, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

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

¹ Khabarov51@mail.ru[✉]

² PetrovSM@edu.stu.ru

³ MakarovRI@edu.stu.ru

Abstract. This paper discusses the challenges of adapting local objects of transport infrastructure in cities to accommodate the growth of housing construction, commissioning of large transport objects, and increased traffic. Critical objects that significantly complicate the transport situation are identified, and the task of adapting these objects to new conditions is formulated. Municipal services regularly face such issues, and the development of the transport system is one of the most important tasks in urban economy.

An evolutionary approach to the development of transport system requires the application of evolutionary methods to optimize complex systems. To solve such problems, simulation modeling of transport systems on a local level (micro modeling) and methods of solving extreme tasks on transport graphs are used. The problem of identifying a local transport network located in the zone of influence of a critical object is formulated as the problem of determining the maximum strongly connected graph. Algorithms for finding the maximum flow in the transport graph are also used. Methods for selecting effective sets of measures are proposed to satisfy the balance of transport demand and supply, given the high combinatorial complexity of this class of problems. These methods consider a modification of simplex search in Boolean space and are illustrated on specific tasks of transport network reconstruction of a large city.

The results of the study can be used by municipal services to make decisions on the development of the transport system of the city, as well as to determine priority areas for improving the transport situation.

Keywords: transport network, transport infrastructure, critical transport object, transport graph, transport network, carrying capacity, maximum transport flow, combinatorial optimization

For citation: Khabarov V. I., Petrov S. M., Makarov R. I. Solving local problems of transport infrastructure adaptation in the development of a large city and its agglomeration. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):85–92. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_85.

Введение

Идентификация критических транспортных объектов и оценка уровня их критичности является актуальной задачей, поскольку позволяет качественно и количественно оценить ущерб, наносимый этими объектами, связанный с ограничением пропускной способности для транспортной системы в целом [1–3]. Это также позволяет выделять среди них объекты первостепенной важности при ограничении объемов выделяемых на реновацию средств. Сложность решения подобной задачи связана с определением границ области его негативного влияния на транспортную сеть. Для улучшения транспортной ситуации могут быть проведены мероприятия, связанные с изменением организации движения (изменение режимов светофорных объектов, запретов, топологии улично-дорожной сети и пр.) и, в соответствии с этим, требующие изменения элементов транспортной инфраструктуры. Предполагается, что отдельные мероприятия известны и известна их стоимость. Требу-

ется решить оптимизационную задачу путем выбора набора мероприятий, которые повышают транспортную эффективность при заданных ограничениях на стоимость.

Рассмотрим основные проблемы, связанные с данной постановкой. Прежде всего возникает проблема выделения границ критических объектов. Обычно сами объекты удается локализовать на экспертном уровне, например выделить проблемный перекресток. Однако при этом требуется выделить его окружение, на которое распространяется негативное воздействие такого объекта. Для этого можно использовать имитационные транспортные модели [3], позволяющие адекватно воспроизвести поведение объекта. Нагрузочный эксперимент дает возможность оценить максимальный поток в локальной сети, а следовательно, ее пропускную способность.

Для обозначенной выше задачи оптимизации выбора мероприятий по реконструкции критического объекта транспортной инфра-

структуры необходимо определить *пространство допустимых решений (множество альтернатив), критерии и ограничения*. Пространство допустимых решений формируется из возможных допустимых сочетаний мероприятий и последовательностей их ввода в действие. Например, предлагаемый режим светофора да данном перекрестке имеет смысл в сочетании с конкретным режимом другого светофора на соседнем перекрестке для заданного варианта деления проезжей части на полосы движения. В данном случае отдельными мероприятиями являются изменения режимов каждого светофора и изменение полос движения. Понятно, что количество факторов такого рода может быть велико. Формирование множества допустимых альтернатив является отдельной проблемой, решаемой на уровне экспертов. Ее сложность еще более возрастает, если учитывать последовательность ввода в действие мероприятий.

Вопрос формирования критериев заставляет обратиться к работам по транспортному планированию и моделированию [4], в которых рассматриваются различные подходы, ориентированные как на транспортный спрос, так и на транспортное предложение. С точки зрения транспортного предложения наиболее важным критерием является пропускная способность системы, с точки зрения транспортного спроса – средняя прогнозная интенсивность транспортного потока. Дополнительными критериями могут быть средняя скорость и плотность. Для формирования критерия, отражающего баланс спроса и предложения, используется средняя нагрузка на транспортную сеть. Экономическая постановка задачи заставляет вводить дополнительные критерии, учитывающие затраты на реализацию мероприятий по реконструкции транспортной инфраструктуры.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим размеченный ориентированный транспортный граф $G = (V, E, C_p, C_f)$, где $V = \{v_1, \dots, v_k\}$ – множество узлов транспортной сети, $E \subseteq V \times V$ – множество дуг, соединяющих узлы. $C_p: E \rightarrow R$ – пропускная способность для дуг транспортной сети [4, 5]. $C_f: E \rightarrow R$ – интенсивность транспортного потока на дугах сети, где R – поле вещественных

чисел. C_f отражает транспортный спрос, а C_p – транспортное предложение.

Узел транспортного графа $v \in V$ сам может быть графом, т. е. скрывать в себе подграф $G' \in G$, такой, что все входящие в этот узел и выходящие из него дуги должны быть связаны с некоторыми внутренними узлами подграфа $G' = (V', E', C'_p, C'_f)$. Операция раскрытия такого узла-подграфа и преобразование графа $G = (V, E, C_p, C_f)$ в раскрытый граф $G'' = (V'', E'', C''_p, C''_f)$ может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} V'' &= (V \cup V') \setminus \{v\}, \\ E'' &= (E \cup E') \cup \{(x, v) : \forall x \in V'' \} \cup \{(v, x) : \forall x \in V''\}. \end{aligned}$$

Задача 1. Для некоторого узла $x \in V$ транспортного графа G требуется выделить его окружение, т. е. некоторый подграф, обладающий свойством максимально сильно связности. Такая задача может иметь следующую интерпретацию. Если вершина $v \in V$ является в некотором смысле критической точкой транспортной сети, т. е. оказывает существенное негативное влияние на окружающую транспортную систему и требует внимания, то вместе с ней необходимо рассматривать ближайшее окружение, максимально сильно связанное с этой критической точкой. Данное утверждение носит эвристический характер. Практика транспортного моделирования подтверждает полезность такой точки зрения.

Назовем множество вершин $\Gamma^{+k}(v)$ прямым отображением k -го порядка [6] для некоторой вершины графа $v \in V$, если

$$\begin{aligned} \Gamma^{+0}(v) &= v; \\ \Gamma^{+1}(v) &= \{u \in V : \forall (v, u) \in E\}; \\ \Gamma^+(\{v_1, \dots, v_m\}) &= \bigcup_{i=1}^m \Gamma^{+1}(v_i); \\ \Gamma^{+k}(v) &= \Gamma^+(\Gamma^{+(k-1)}(v)). \end{aligned}$$

Множество вершин $\Gamma^{-k}(v)$ является обратным отображением k -го порядка для $v \in V$, если

$$\begin{aligned} \Gamma^{-0}(v) &= v; \\ \Gamma^{-1}(v) &= \{u \in V : \forall (u, v) \in E\}; \\ \Gamma^-(\{v_1, \dots, v_p\}) &= \bigcup_{i=1}^p \Gamma^{-1}(v_i); \\ \Gamma^{-k}(v) &= \Gamma^-(\Gamma^{-(k-1)}(v)). \end{aligned}$$

Соответственно, прямым и обратным транзитивными замыканиями графа G относительно $x \in V$ являются:

$$\begin{aligned} T^+(v) &= \bigcup_{i=1}^k \Gamma^{+i}(v); \\ T^-(v) &= \bigcup_{i=1}^k \Gamma^{-i}(v). \end{aligned}$$

Здесь k выбирается исходя из условия наступления стабилизации этих множеств.

Далее рассмотрим максимально сильно связный подграф для графа G или МСС-подграф $\bar{G}(v)$ относительно вершины $v \in V$, удовлетворяющие следующим условиям:

$$\begin{aligned}\bar{V}(v) &= T^+(v) \cap T^-(v); \\ \bar{E}(v) &= \{(w, u) \in E : \forall w, u \in \bar{V}(v)\}.\end{aligned}$$

Введенное определение позволяет сформулировать общий алгоритм разбиения транспортного графа на максимально сильно связные непересекающиеся подграфы относительно выделенных критических точек $\{v_1, \dots, v\}$ транспортной инфраструктуры. Этот алгоритм является вариантом алгоритма Мальгранжа [7]. Смысл его ясен из приведенных выше определений и состоит в том, чтобы для множества критических точек $\{v, \dots, v_k\}$ последовательно построить максимально сильно связные подграфы. Каждый такой подграф заслуживает внимания с точки зрения ликвидации негативного влияния соответствующего критического объекта.

Сформулированная выше задача 1 и способ ее решения дают возможность локализовать область исследования при имитационном моделировании транспортных систем на макроуровне и существенно сократить затраты на вычисления.

Задача 2. Пусть для некоторой критической точки $v \in V$ задан МСС-подграф $\bar{G}(v) \subset G$. Далее будем предполагать, что v – некоторый фиксированный узел, и для простоты обозначений данный аргумент опускать. Определим следующие множества:

$$\begin{aligned}E_{in} &= \{(v, u) \in E : \forall v \in V \setminus \bar{V}, u \in \bar{G}\}; \\ E_{out} &= \{(v, u) \in E : \forall u \in V \setminus \bar{V}, v \in \bar{G}\}; \\ \bar{B} &= \{v \in \bar{V} : \forall u \in V \setminus \bar{V}, (v, u) \in E\}.\end{aligned}$$

Множество дуг E_{in} являются входами в систему \bar{G} , а E_{out} , соответственно, выходами. \bar{B} – множество граничных вершин \bar{G} . С содержательной точки зрения E_{in} несет на себе значения внешних (экзогенных) переменных, а E_{out} – последствия действий внутренних (эндогенных) и внешних переменных. При транспортном микромоделировании отдельных фрагментов уличной дорожной сети подобным образом может определяться, например, интенсивность входящего и, соответственно, выходящего потока. Выделим пару граничных

вершин $v, u \in \bar{B}$ для системы \bar{G} и рассмотрим максимальный поток между двумя такими вершинами $f(\bar{G}, v, u)$. Величину этого потока будем называть пропускной способностью системы \bar{G} относительно пары (v, u) . Определим минимальную пропускную способность системы \bar{G} в целом следующим образом:

$$f_1(\bar{G}) = \min_{v, u} f(\bar{G}, v, u). \quad (1)$$

Этот критерий характеризует транспортную магистраль \bar{G} с минимальной пропускной способностью. Другим полезным критерием может быть средняя пропускная способность:

$$f_2(\bar{G}) = \frac{1}{|E_{in} \times E_{out}|} \sum_{v \in E_{in}, u \in E_{out}} f(\bar{G}, v, u). \quad (2)$$

Таким образом, задачу 2 можно сформулировать как задачу определения пропускной способности системы \bar{G} . В связи с данной постановкой основной проблемой является определение максимального потока в сети. Ее решение может быть рассмотрено с двух позиций. Первая предполагает использование структуры нагруженного графа и вычисление значения максимального потока алгоритмически, например с использованием алгоритма Форда – Фалкерсона [7, 8]. Второй подход может быть реализован на основе имитационной транспортной модели путем нагрузочного эксперимента с увеличением входного потока до критической величины.

Задача 3. Пусть задан некоторый граф $G(x) = (V(x), E(x), C_p(x), C_f)$, где $x \in X$, $\dim X = n$ является некоторой зависимой переменной, значение которой связано со структурой и параметрами транспортного графа. Будем считать, что $x_i \in \{-1, 1\}$, $i = 1, \dots, n$, т. е. является фактором, принимающим значение на двух уровнях. Содержательно каждый такой фактор можно интерпретировать как некоторое заранее известное мероприятие, связанное с изменением структуры $(V(x), E(x))$ транспортной сети $G(x)$, либо с изменением ее параметров $C_p(x)$ на множестве допустимых значений X . Значение $x_i = 1$ соответствует тому, что i -е мероприятие реализуется, при другом значении – нет. Таким образом, вектор $x \in X$ представляет собой набор совместимых мероприятий для изменения транспортной сети. Например, может быть ликвидирован или добавлен новый транспортный узел, транспортная коммуникация либо изменена пропускная способность транс-

портной коммуникации на заранее известное значение. Булевский тип переменной $x \in X$ выбран из соображения общности, поскольку речь идет об изменении как структуры транспортной сети, так и параметров, значение которых задается на дискретном множестве. Таким образом, множество X является подмножеством булева пространства \mathcal{B} . Количество элементов \mathcal{B} равно 2^n .

Пусть $f(G(x), u, v)$ – максимальный поток в сети G относительно выделенных узлов u, v , зависящий от $x \in X \subseteq \mathcal{B}$. Рассмотрим следующую оптимизационную задачу:

$$f(G(x^*), u, v) = \max_{x \in X} f(G(x), u, v). \quad (3)$$

Данная задача может быть интерпретирована как задача структурной и параметрической адаптации транспортной сети. Заметим, что выражение (3) зависит от булевых переменных, а значение целевой функции по определению является вещественным. Такие задачи относятся к классу задач условной псевдобулевой оптимизации. Обзор основных подходов к решению данного класса задач приведен в [6].

Можно рассмотреть дополнительный критерий, учитывающий стоимость набора мероприятий.

Результаты исследования

Сформулированный выше комплекс задач позволяет применить современные эффективные методы математического моделирования для решения проблемы локальной адаптации транспортной инфраструктуры.

Рассмотрим оптимизационную задачу (3) с учетом ее специфики, которая состоит в следующем. Стоимость вычисления целевой функции f для данного класса задач высока, поскольку предполагает нахождение максимального потока в сети. Если эту задачу решать, например, с помощью алгоритма Форда – Фалкерсона, то временная сложность составит $O((|V| + |E|) \cdot |E|)$, где $|V|$ – количество вершин графа, $|E|$ – количество ребер в графе [7, 8]. Использование имитационной модели в качестве функции f также будет иметь высокую стоимость, поскольку предполагает проведение нагружочного имитационного эксперимента. Всякое изменение значения $x \in X$ потребует перестройки структуры графа $G(x)$, а

значит, перенастройки модели. Из сказанного следует, что для практического решения задачи (3) следует выбирать методы, экономно использующие ресурс, связанный с количеством вычислений целевой функции.

Для решения задачи (3) применим следующую процедуру:

1. В качестве начальной популяции рассмотрим булево пространство \mathcal{B} , которое содержит 2^n вершин n -мерного гиперкуба.

2. Выберем $n + 1$ n -мерных векторов из \mathcal{B} , которые образуют строки матрицы $X = \{x_{ij}\}$, $i = 1, \dots, n + 1$, $j = 1, \dots, n$, удовлетворяющие условиям симметричности $\sum_{k=1}^{n+1} x_{ik} = 0$, $k = 1, \dots, n + 1$ и ортогональности $\sum_{k=1}^n x_{ik} x_{jk} = 0$, $\forall i, j = 1, \dots, n + 1$. Такая система векторов образует правильный симплекс на $n + 1$ вершинах n -мерного гиперкуба \mathcal{B} . В теории планирования экспериментов подобная конфигурация известна как дробная реплика 2^{n-p} для полного факторного плана 2^n [9]. Другое важное свойство такой конфигурации – максимальное взаимное расстояние Хемминга между вершинами симплекса.

3. Вычислим $y_i = f(x_i)$, $x_i = \{x_{ij}\}_{j=1}^n$, $i = 1, \dots, n + 1$.

4. Пусть $x^- \in X$ – наихудшая в смысле функции f точка симплекса X , а точки $x^+, x^{++} \in X$ – две наилучшие точки. Перестроим симплекс X , заменив x^- на другую точку, являющуюся комбинацией x^+, x^{++} . Переходим к пункту 3.

Процедура заканчивается, когда не наблюдается увеличение f .

Данная процедура является некоторым вариантом генетического алгоритма [6], по которому родители $x^+, x^{++} \in X$ скрещиваются таким образом, чтобы их потомок вновь был вершиной правильного симплекса, т. е. удовлетворял условиям симметричности и ортогональности. Для увеличения разнообразия среди всех возможных вариантов скрещивания можно ввести рандомизацию.

Данный подход применялся для решения практических задач на транспортной сети г. Новосибирска. Вариант выбора мероприятий указан в табл. 1, эффект от их внедрения – в табл. 2.

Таблица 1

Оцениваемые мероприятия по повышению пропускной способности на ул. Станционной

Код мероприятия	Примыкание улицы	Мероприятие
M1	Порт-Артурская	Ликвидация левого поворота с ул. Порт-Артурской на ул. Станционную
M2		Строительство переходно-скоростных полос на нечетной и четной сторонах ул. Станционной до и после пересечения с ул. Порт-Артурской, перенос остановки общественного транспорта
M3		Уширение ул. Станционной с четырех до шести полос на участке ул. Порт-Артурская – ул. Сибсельмашевская с организацией места для разворота
M4	Бетонный переезд	Уширение ул. Бетонный переезд по направлению к ул. Станционной на одну полосу и добавление постоянной стрелки направо
M5		Уширение ул. Станционной на одну полосу на участке ул. Бетонный переезд – переезд через ж.-д. пути у здания по адресу: ул. Станционная, 51к1, по направлению в город
M6	2-я Станционная	Уширение ул. Станционной на одну полосу на участке ул. Бетонный переезд – ул. 2-я Станционная
M7		Уширение ул. Станционной на одну полосу на участке ул. 2-я Станционная – ул. Сибсельмашевская по направлению из города
M8		Строительство путепровода 2-я Станционная – Станционная
M9	Бетонный переезд	Строительство путепровода на ул. Бетонный переезд через Транссиб и съездов на ул. Станционную (данное мероприятие не предполагает пересечения ул. Бетонный переезд с Транссибирской магистралью и ул. Станционной)

Таблица 2

Сравнение значений показателей интенсивности для двух вариантов моделирования на участках между ключевыми узлами в утренний час

Перекресток, направление	Существующая ОДД*, авт./ч	Эффект от мероприятий, авт./ч	Изменение, %
Ул. Порт-Артурская, со стороны ул. Дукача	1 546	1 638	6
Ул. Порт-Артурская, в сторону ул. Дукача	1 219	1 362	12
Ул. 2-я Станционная, со стороны ул. Порт-Артурской	1 170	1 374	17
Ул. 2-я Станционная, в сторону ул. Порт-Артурской	1 483	1 483	0
Ул. Бетонный переезд, со стороны ул. 2-й Станционной	1 985	2 246	13
Ул. Бетонный переезд, в сторону ул. 2-й Станционной	2 149	2 273	6
Ул. Энергетиков, на площадь Энергетиков	818	892	9
Ул. Энергетиков, на Центральный мост	1 223	1 289	5
Ул. Энергетиков, с Центрального моста	1 672	1 673	0
Ул. Энергетиков, с площади Энергетиков	1 265	1 218	-4

* ОДД – организация дорожного движения.

Выводы

В работе рассмотрены «экономные» в смысле количества вычислений целевой функции методы комбинаторной оптимизации для адаптации критических объектов транспортной инфраструктуры. Сформулированы три задачи, необходимые для решения проблемы в целом.

Первая из них заключается в выделении границ локальной области, на которую распространяется влияние критического объекта. Локализация позволяет существенно сократить размерность оптимизационной задачи.

Вторая задача формализует понятие границы исследуемой транспортной подсистемы

и выделяет внешние и внутренние факторы, влияющие на ее пропускную способность. Понятие пропускной способности привязано к понятию максимального потока в транспортном графе, что позволяет использовать известные классические алгоритмы вычисления максимального потока.

Третья задача по существу является формулой задачи максимизации пропускной способности транспортной системы. Альтернативами являются допустимые комбинаторные конфигурации из предлагаемого набора мероприятий по реновации транспортной системы.

Дальнейшие исследования предполагают расширенную постановку, при которой в качестве критерия рассматривается отношение прогнозируемого потока к пропускной способности сети с учетом стоимости мероприятий.

Разработанный подход применен для решения практических задач на транспортных объектах г. Новосибирска.

Список источников

1. Трофименко Ю. В., Якимов М. Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов : монография. Москва : Логос, 2013. 464 с.
2. Транспортное планирование и моделирование : сборник трудов Международной научно-практической конференции (26–27 мая 2016 г.) / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2016. 160 с.
3. Якимов М. Р., Попов Ю. А. Транспортное планирование: практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в программном комплексе PTV Vision® VISUM : монография. Москва : Логос, 2014. 200 с.
4. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский [и др.] ; под ред. А. В. Гасникова. Москва : Московский физико-технический институт (государственный университет), 2010. 360 с.
5. Харари Фрэнк. Теория графов / перевод с английского и предисловие В. П. Козырева ; под редакцией Г. П. Гаврилова. 2-е изд. Москва : УРСС, 2003. 300 с.
6. Германчук М. С., Козлова М. Г., Лукьяненко В. А. Псевдобулевые модели условной оптимизации для класса задач многих коммивояжеров // Автоматика и телемеханика. 2021. № 10. С. 25–45.
7. Алгоритмы: построение и анализ / Томас Кормен [и др.] ; [под редакцией И. В. Красикова ; перевод с английского И. В. Красикова, Н. А. Ореховой, В. Н. Романова]. 2-е изд. Москва [и др.] : Вильямс, 2012. 1290 с.
8. Басакер Р., Саати Т. Конечные графы и сети / перевод с английского В. Н. Буркова, С. Е. Ловецкого, В. Б. Соколова ; под редакцией А. И. Теймана. Москва : Наука, 1974. 366 с.
9. Налимов В. В. Теория эксперимента. Москва : Наука, 1971. 208 с.

References

1. Trofimenco Yu.V., Yakimov M. R. Transport planning: the formation of effective transport systems of large cities: monograph. Moscow: Logos; 2013. 464 p. (In Russ.).
2. Transport planning and modeling: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. May 26–27, 2016. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2016. 160 p. (In Russ.).
3. Yakimov M. R., Popov Yu. A. Transport planning: practical recommendations for creating transport models of cities in the software package PTV Vision® VISUM: monograph. Moscow: Logos; 2014. 200 p. (In Russ.).
4. Gasnikov A. V., Klenov S. L., Nurminsky E. A. [et al.]; Gasnikov A. V., ed. Introduction in the mathematical modeling of traffic flows: textbook. Moscow: Moscow Institute of Physics and Technology (State University); 2010. 360 p. (In Russ.).
5. Harari Frank; Gavrilov G. P., ed. Graph Theory. Translated from English by V. P. Kozyrev. Moscow: Unitorial URSS; 2003. 300 p. (In Russ.).
6. Germanchuk M. S., Kozlova M. G., Luk'yanenko V. A. Pseudo-Boolean Models of Conditional Optimization for a Class of Many Commuting Problems. *Automation and telemechanics*. 2021;(10):25–45. (In Russ.).
7. Thomas Kormen [et al.]; Krasikov I. V., ed. Algorithms: construction and analysis. Translated from English by I. V. Krasikov, N. A. Orekhova, V. N. Romanov. 2nd edition. Moscow [et al.]: Williams; 2012. 1290 p. (In Russ.).
8. Basaker R., Saati T.; Teyman A. I., ed. Finite graphs and networks. Translated from English by V. N. Burkov, S. E. Lovetsky, V. B. Sokolov. Moscow: Nauka; 1974. 366 p. (In Russ.).
9. Nalimov V. V. The theory of experiment. Moscow: Nauka; 1971. 208 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В. И. Хабаров – декан факультета «Бизнес-информатика», заведующий кафедрой «Информационные технологии на транспорте» Сибирского государственного университета путей сообщения, профессор кафедры теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор, академик Российской академии транспорта.

С. М. Петров – ведущий инженер-программист факультета «Бизнес-информатика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Р. И. Макаров – аспирант кафедры «Информационные технологии на транспорте» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. I. Khabarov – Dean of the Information Technology in Business Faculty, Head of the Information Technologies in Transport Department, Siberian Transport University, Professor of the Theoretical and Applied Information Science Department, Novosibirsk State Technical University, Doctor of Engineering, Professor, Academician of Russian Academy of Transport.

S. M. Petrov – Leading Software Engineer of the Information Technology in Business Faculty, Siberian Transport University.

R. I. Makarov – Postgraduate Student of the Information Technologies in Transport Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 13.03.2023; одобрена после рецензирования 17.03.2023; принятая к публикации 18.03.2023.

The article was submitted 13.03.2023; approved after reviewing 17.03.2023; accepted for publication 18.03.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 93–101.
The Siberian Transport University Bulletin. 2023. No. 1 (64). P. 93–101.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 625.031.3

doi 10.52170/1815-9265_2023_64_93

Моделирование выправки железнодорожного пути в процессе эксплуатации

Петр Николаевич Холодов¹, Вячеслав Анатольевич Подвербный^{2✉}

^{1,2} Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

¹ petruha_yy@mail.ru

² vpodverbnyi@mail.ru✉

Аннотация. Железнодорожный путь является объектом капитального строительства. После введения железнодорожного пути в эксплуатацию со временем его пространственные данные и геометрические параметры меняются. Это связано с воздействиями, вызванными в первую очередь проходящим по нему подвижным составом. При последующей эксплуатации через определенные межремонтные сроки и с соблюдением критериев назначения ремонтов проводятся работы по восстановлению геометрии пути и при необходимости приведению земляного полотна в нормативное состояние. Эти работы связаны со смещением пути в продольном профиле и плане для приведения железнодорожной линии также в нормативное состояние.

С учетом увеличения объемов грузоперевозок и скоростей движения поездов требования к содержанию железнодорожных путей становятся более строгими. Возникает необходимость увеличения радиусов участков пути кривых в плане, длин переходных кривых и прямых вставок между смежными кривыми.

При проектировании ремонтов и реконструкции железнодорожных линий работы необходимо производить в соответствии с нормативными требованиями. Выполнение этого условия возможно с фиксированием осей железнодорожных путей в прямоугольных системах координат. В статье предложена программа, позволяющая генерировать положение оси пути в плане в координатном пространстве при заданном наборе исходных данных. Программой предусмотрена возможность целенаправленного смещения координат точек оси пути от правильной геометрической формы для моделирования поведения пути в процессе эксплуатации. Через заданное расстояние создаются наборы точек, соответствующие поперечному очертанию земляного полотна, по которым с помощью специализированных программ строится цифровая модель рельефа местности.

Ключевые слова: моделирование, ось пути, железнодорожная линия, координаты точек, цифровая модель рельефа, выправка пути

Для цитирования: Холодов П. Н., Подвербный В. А. Моделирование выправки железнодорожного пути в процессе эксплуатации // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 93–101. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_93.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Modeling of railway track alignment during operation

Peter N. Kholodov¹, Vyacheslav A. Podverbny^{2✉}

^{1,2} Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

¹ petruha_yy@mail.ru

² vpodverbnyi@mail.ru✉

Abstract. The railway track is an object of capital construction. After the railway track is put into operation, its spatial data and geometric parameters change over time. This is due to the effects caused, first of all, by rolling stock passing through it. During subsequent operation after certain repair periods and in compliance with the repair assignment criteria, work is carried out to restore the geometry of the track and, if necessary, the roadbed to a standard state. These works are associated with the displacement of the track in the longitudinal profile and plan to give the railway line a regulatory state.

Taking into account the increase in cargo transportation and train speeds, the requirements for the maintenance of railway tracks become stricter. You need to increase the radii of the path portions of curves in plan view, extend the spiral lengths, and extend the straight inserts between adjacent curves.

When designing repairs and, if necessary, reconstructions of railway lines, work must be carried out in accordance with regulatory requirements. This condition can be fulfilled by fixing the axes of the railway tracks in rectangular coordinate systems. The article proposes a program that allows you to generate the position of the path axis in plan in coordinate space with a given set of source data. The program provides for the ability to purposefully shift the coordinates of the points of the path axis from the correct geometric shape to simulate the behavior of the path during operation. At a given distance, sets of points are created corresponding to the transverse outline of the roadbed, along which a digital terrain model is built using specialized programs.

Keywords: modeling, track axis, railway line, point coordinates, digital terrain model, track alignment

For citation: Kholodov P. N., Podverbnii V. A. Modeling of railway track alignment during operation. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2023;(64):93–101. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_93.

Введение

В процессе эксплуатации под действием сил различного характера (воздействия подвижного состава, атмосферных осадков, температурного режима работы рельсов и пр.) положение оси пути может меняться.

Под осью пути подразумевается линия, проходящая посередине рельсовой колеи в плоскости поверхности катания рельсов на одинаковом расстоянии от осей симметрии рельсов, образующих данную колею, и пред назначенная для построения проектных показателей железнодорожного пути и объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Положение оси пути определяется для каждого пути в пространстве в высокоточной координатной системе, а при ее отсутствии – в заданной системе координат [1].

Существующие железнодорожные пути сдаются в эксплуатацию после их строительства на основе разработанного полного комплекта рабочей документации. Основные магистральные линии были возведены много лет назад по действующей на то время нормативной документации. Со временем увеличились объемы перевозок грузов, изменились конструкции подвижного состава, верхнего строения пути и другие факторы, что привело к ужесточению требований, предъявляемых к железнодорожному пути [2]. Эти требования отражены в современной нормативной документации, например [1].

Кроме того, в процессе эксплуатации приходят в негодность некоторые элементы верхнего строения пути, в том числе увеличивается загрязненность балласта. Поэтому при определенном межремонтном сроке или до

стижении критериев назначения ремонтов выполняют ремонты пути, а при необходимости увеличения пропускной и провозной способности выполняется реконструкция пути.

Ремонт железнодорожного пути – это комплекс строительных работ и организационно-технических мероприятий по устранению физического и морального износа, а также работ, не связанных с изменением основных технических показателей железнодорожного пути или его назначения [1].

Реконструкция железнодорожного пути – комплекс строительных работ железнодорожного пути и организационно-технических мероприятий, связанных с изменением основных технико-экономических показателей или его назначения [1].

Моделирование плана оси пути

Авторами разработана программа «Генератор результатов геодезической съемки железнодорожной линии» (далее – программа-генератор) [3], которая позволяет генерировать положение оси плана пути в пространстве координат на основе следующих исходных данных:

- протяженность участка, км;
- минимальная и максимальная длина прямой вставки, м;
- минимальный и максимальный радиусы кривых, м;
- минимальное и максимальное расстояние между точками, м;
- координаты (X и Y) начала пути;
- пикетаж начала;
- максимальное смещение, см, и другие параметры.

Внешний вид программы представлен на рис. 1.

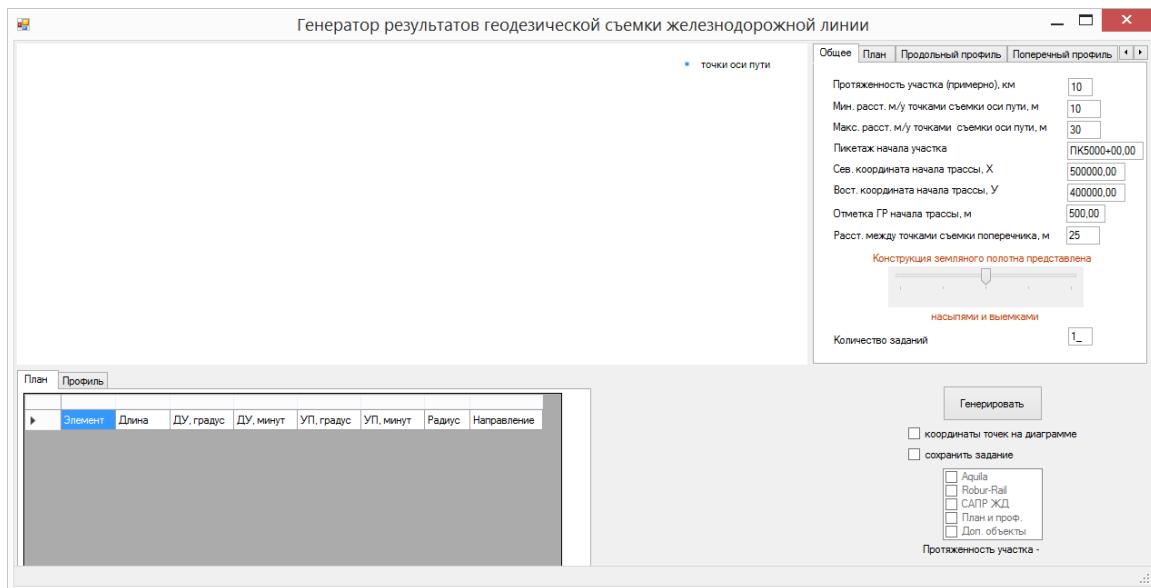


Рис. 1. Внешний вид программы-генератора

Данная программа-генератор является усовершенствованной версией ранее созданной программы для генерации случайного плана линии в прямоугольных координатах с заданным максимальным смещением [4, 5]. В программе-генераторе, кроме оси пути, генерируются координаты точек поперечных профилей и, помимо координат X и Y , добавлена высотная координата Z и большой набор параметров настройки исходной информации (представлен на рис. 2). В дополнение к оси пути вдоль трассы генерируются точки в координатах для создания поперечных профилей с заданным набором параметров (рис. 2, ε).

Для наглядности в программе отображен сгенерированный план оси пути (рис. 3).

В программе реализованы алгоритмы и формулы расчета [6, 7].

При сохранении полученного набора данных программа-генератор создает в указанном месте папку (или папки, если указано количество заданий более одного) со следующими файлами (если они отмечены в соответствующем пункте меню, рис. 4):

- «Slv путь» – файл с данными плана пути для импорта в программу Aquila [8];
- «Параметры плана» – файл Microsoft Excel с таблицей параметров плана оси пути;
- «Параметры профиля» – файл Microsoft Excel с таблицей параметров продольного профиля оси пути;

• «Поперечники_Robur» – файл с координатами точек поперечных профилей для импорта в программу Robur Rail;

• «Путь_Robur» – файл с координатами точек оси пути для импорта в программу Robur Rail;

• «Съемка_САПРЖД» – файл с координатами точек железнодорожного пути, включая поперечные профили, для импорта в программу САПР ЖД.

Программа-генератор основана на следующем алгоритме:

1) по заданным параметрам плана (см. рис. 2, б) случайным образом устанавливаются:

а) дирекционный угол и протяженность первого прямого участка трассы;

б) угол поворота, направление, радиус круговой кривой и длина переходных кривых;

в) дирекционный угол и протяженность последующего прямого участка пути (после кривого участка пути в плане);

г) процесс б–в повторяется до тех пор, пока суммарная протяженность участка пути не достигнет заданного значения (см. рис. 2, а);

д) по установленным параметрам плана трассы определяются координаты X , Y через заданное в настройках программы расстояние;

2) по заданным параметрам продольного профиля (см. рис. 2, в) случайным образом устанавливаются на всем протяжении трассы значения продольных уклонов и длин элементов, по которым определяются отметки головок рельсов в тех же точках, что и были определены координаты X , Y ;

a)

Общее	План	Продольный профиль	Поперечный профиль	←	→
Протяженность участка (примерно), км	10				
Мин. расст. м/у точками съемки оси пути, м	10				
Макс. расст. м/у точками съемки оси пути, м	30				
Пикетаж начала участка	ПК5000+00.00				
Сев. координата начала трассы, X	500000,00				
Вост. координата начала трассы, У	400000,00				
Отметка ГР начала трассы, м	500,00				
Расст. между точками съемки поперечника, м	25				
Конструкция земляного полотна представлена  насыпями и выемками					
Количество заданий	1				

б)

Общее	План	Продольный профиль	Поперечный профиль	←	→
Минимальная длина прямой вставки, м	50				
Максимальная длина прямой вставки, м	1000				
Минимальный радиус кривых, м	300				
Максимальный радиус кривых, м	4000				
Макс. поперечное смещение, см	00				
Макс. изм. поперечного смещения, см/100м	00				

в)

Общее	План	Продольный профиль	Поперечный профиль	←	→
Минимальная длина элемента, м	25				
Максимальная длина элемента, м	1000				
Нормативная (мин) длина элемента, м	200				
Ограничивающий уклон, промилле	10,0				
Наиб. алг. разн. смежн. уклонов , промилле	10,0				
Максимальное верт. смещение, см	00				
Макс. изм. верт. смещения, см/100м	00				

г)

Общее	План	Продольный профиль	Поперечный профиль	←	→
Ширина балласта поверху, м	3,60				
Крутизна откосов балласта, 1:п	1,5				
Максимальная высота насыпи, м	12,00				
Максимальная глубина выемки, м	12,00				
Макс. изм. выс. нас./глуб. выемки, м/100м	3,0				
Крутизна откосов земляного полотна, 1:п	1,5				
Глубина кюветов в выемке, м	0,60				
Ширина по дну кюветов в выемке, м	0,40				
Бровка земляного полотна, м	0,50				
Макс. поперечная крутизна рельефа, 1:п	3,0				
Макс. изм. попер. крут. рельефа, 0,001/100м	0,050				
Расстояние до границы ПП от ПН/БВ, м	50				
Расстояние между поперечниками, м	100				

д)

Поперечный профиль	Верхнее строение пути	Кодировка	←	→
Тип рельса	P65 (180 мм)	▼		
Тип шпал	Деревянные I типа (180 мм)	▼		
Тип скрепления	ДО (18+8=26 мм)	▼		
Толщина балласта, см	40			
Расстояние от СГР до ВБС, см	23			
Расстояние от СГР до НБС, см	78			

е)

Поперечный профиль	Верхнее строение пути	Кодировка	←	→
Robur-Rail		САПР ЖД		
		ЕСКПД симв.		
Точка поперечника	1	RT		
Бровка балласта	2	BB		
Подошва балласта	3	PB		
Бровка насыпи	4	BZ		
Подошва насыпи	5	PZ		
Бровка кювета	6	BKV		
Дно кювета	7	DKV		
Подошва выемки	11	PV		
Бровка выемки	12	BV		
СГР	18	1-065D		

Рис. 2. Вид вкладок меню с исходными данными для генерации:

а – «Общее»; б – «План»; в – «Продольный профиль»; г – «Поперечный профиль»;
д – «Верхнее строение пути»; е – «Кодировка»

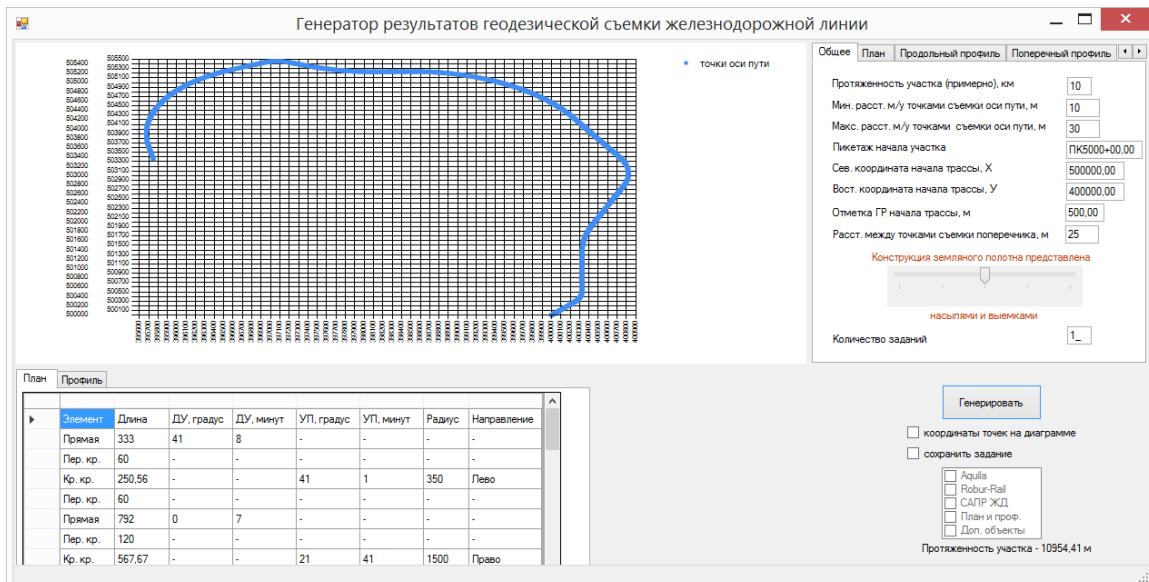


Рис. 3. Пример сгенерированного варианта

3) по заданным параметрам поперечного профиля и верхнего строения пути (см. рис. 2, *г, д*) случайным образом устанавливаются на всем полученном протяжении трассы через расстояния, заданные в настройках программы, следующие параметры:

а) конструкция земляного полотна (насыпь, выемка, «нулевое место»), значения рабочих отметок (высоты насыпей, глубины выемок), значения поперечного уклона местности;

б) в пределах поперечного профиля через заданное в настройках программы расстояние определяются координаты точек *X*, *Y* и их высотная отметка;

4) по заданным кодировкам (см. рис. 2, *е*) каждой точке присваивается обозначение;

5) если в настройках программы (см. рис. 2, *б, в*) заданы значения максимальных поперечных и вертикальных смещений с их максимальным изменением на 100 м протяженности трассы, то координаты точек *X*, *Y* и их высотные отметки будут, соответственно, ортогонально смещены на установленное расстояние.

Анализ и выправка железнодорожного пути

Программа-генератор разработана для дальнейшей выправки в одной из следующих программ:

1) путем импорта созданных файлов:

- Aquila – разработчик В. А. Бучкин [8] – только выправка плана пути;

- Robur-Rail – разработчик НПФ «Топоматик» [8];

- САПР ЖД – правообладатель АО «Росжелдорпроект» [9];

2) с помощью конвертации созданных файлов:

- RWPlan – разработчик И. П. Корженевич [10];

- «Наноплан» – разработчик А. А. Мамитко [11, 12] и др.

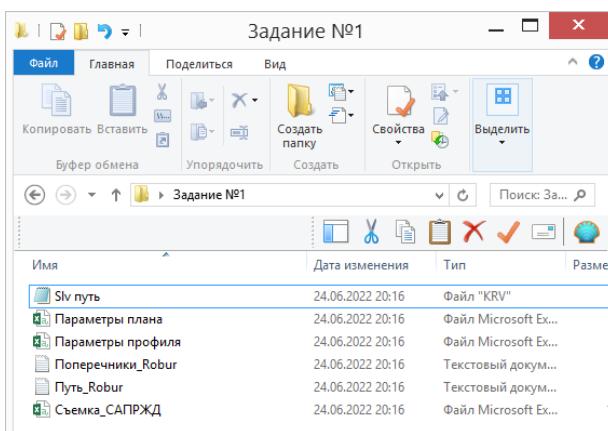
В качестве примера, сгенерированного в программе-генераторе, рассмотрим возможность выправки пути, используя программный комплекс Robur-Rail.

Импорт данных производится с помощью специального модуля программы и представлен на рис. 5.

После импорта данных в программе отображаются подгруженные точки съемки, которые с помощью стандартных процедур программы Robur-Rail раскодируются и преобразуются в ось пути и точки на поперечных профилях. По точкам поперечных профилей строится цифровая модель рельефа. Пример построенной цифровой модели рельефа с участком железнодорожного пути приведен на рис. 6.

С помощью модулей программы Robur-Rail анализируется существующее состояние пути в плане и профиле. При наличии отступлений от норм производится выправка железнодорожного пути в плане и профиле с проектированием поперечных профилей. Пример поперечного профиля приведен на рис. 7.

а)



б)

Slv путь — Блокнот		
Файл	Правка	Формат
Путь		
5000 0 5105	44.73	
557		
5000 .00	500000.00	400000.00
5000 10.00	50009.61	39997.25
5000 28.00	50026.92	39992.29
5000 52.00	50049.99	39985.68
5000 65.00	50062.49	39982.10
5000 94.00	50080.37	39974.12
5001 16.00	50011.52	39968.06
5001 29.00	500124.01	39964.48
5001 55.00	500149.01	39957.32
5001 72.00	500165.35	39952.64
5001 83.00	500175.93	39949.61
5002 5.00	500197.08	39943.55
5002 16.00	500207.65	39940.52
5002 43.00	500233.61	39933.09
5002 60.00	500249.95	39928.41
5002 82.00	500271.18	39922.35
5002 94.00	500282.63	39919.04
5003 4.00	500292.25	39916.29
5003 26.00	500313.40	39910.23
5003 40.00	500326.86	39906.38
5003 57.00	500343.20	39981.70
5003 71.00	500356.66	39987.84

в)

Элемент							
1	Элемент	Длина	ДУ, градус	ДУ, минут	УП, градус	УП, минут	Радиус Направление
2	Прямая	734	344	1	-	-	-
3	Пер. кр.	110	-	-	-	-	-
4	Кр. кр.	487,24	-	-	55	50	500 Лево
5	Пер. кр.	110	-	-	-	-	-
6	Прямая	635	288	11	-	-	-
7	Пер. кр.	80	-	-	-	-	-
8	Кр. кр.	2240,48	-	-	71	19	1800 Лево
9	Пер. кр.	80	-	-	-	-	-
10	Прямая	835	216	52	-	-	-
11	Пер. кр.	20	-	-	-	-	-
12	Кр. кр.	2046,40	-	-	78	10	1500 Лево
13	Пер. кр.	20	-	-	-	-	-
14	Прямая	313	138	42	-	-	-
15	Пер. кр.	40	-	-	-	-	-
16	Кр. кр.	679,95	-	-	77	55	500 Лево
17	Пер. кр.	40	-	-	-	-	-
18	Прямая	185	60	47	-	-	-
19	Пер. кр.	90	-	-	-	-	-
20	Кр. кр.	1836,67	-	-	52	37	2000 Право
21	Пер. кр.	90	-	-	-	-	-
22	Прямая	212	113	24	-	-	-

г)

Элемент	
1	Длина Уклон
2	727,00 -9,5
3	875,00 3,7
4	244,00 -0,5
5	637,00 8,0
6	739,00 6,3
7	751,00 9,9
8	228,00 0,5
9	264,00 4,6
10	655,00 -0,7
11	762,00 5,1
12	358,00 1,7
13	845,00 -6,7
14	166,00 -4,0
15	390,00 2,7

д)

Поперечники_Robur — Блокнот					
Файл	Правка	Формат	Вид	Справка	
Номер_точки Сев_коорд Вост_коорд Отметка Код					
1	500000,495643904	400001,730415303	499,77	2	
2	500000,660858539	400002,307220404	499,37	3	
3	500000,798537401	400002,787891321	499,37	6	
4	500001,046359353	400003,653098973	498,77	7	
5	500001,156502443	400004,037635707	498,77	11	
6	500010,280346386	400035,891228684	520,259674952199	12	
7	500017,164289498	400059,924774557	528,465924952199	1	
8	500024,04823261	400083,95832043	536,540924952199	1	
9	499999,504356096	399998,269584697	499,77	2	
10	499999,339141461	399997,692779596	499,37	3	
11	499999,201462599	399997,212108679	499,37	6	
12	499998,953640647	399996,346901027	498,77	7	
13	499998,843497557	399995,962364293	498,77	11	
14	499995,888454283	399985,645557827	505,324434664861	12	
15	499989,004511172	399961,612032397	497,180684664861	1	
16	499982,12056806	399937,578486524	488,943184664861	2	
17	500096,629827397	399974,194642856	498,82	2	

е)

Путь_Robur — Блокнот					
Номер_точки Сев_коорд Вост_коорд Отметка Код					
1 500000,499997,246422755	499,905	18			
2 500008,613418349	399997,289983715	499,734	18		
3 500026,917571378	399992,6813987516	499,506	18		
4 500049,089775416	399985,681398728	499,3825	18		
5 500062,48721927	399982,10174791	499,3825	18		
6 500090,366132483	399974,1163739	499,107	18		
7 500111,515652851	399968,058503962	498,898	18		
8 500121,013096705	399964,478835344	498,7745	18		
9 500149,007984413	399957,319552708	498,5275	18		
10 500165,350795607	399952,638471392	498,366	18		
11 500175,925555791	399949,609536423	498,2615	18		
12 500197,07507616	399943,551666484	498,0525	18		
13 500207,649836343	399948,522731515	497,948	18		
14 500233,606065887	399933,088072955	497,6915	18		
15 500249,94887708	399928,406991639	497,53	18		
16 500271,098397449	399922,3491217	497,321	18		
17 500282,634499462	399919,044829007	497,207	18		
18 500292,247917817	399916,291251762	497,112	18		
19 500313,397438186	399910,233381824	496,903	18		
20 500326,856223874	399906,378373681	496,77	18		
21 500343,199035068	399901,697292365	496,6085	18		
22 500356,657802757	399897,84228423	496,4755	18		
23 500368,193922776	399894,537991529	496,3615	18		
24 500386,45941764	399889,306194764	496,181	18		

Рис. 4. Результат генерации программы:

- а – созданные файлы; б – содержимое файла «Slv путь»; в – содержимое файла «Параметры плана»; г – содержимое файла «Параметры профиля»; д – содержимое файла «Поперечники_Robur»; е – содержимое файла «Путь_Robur»

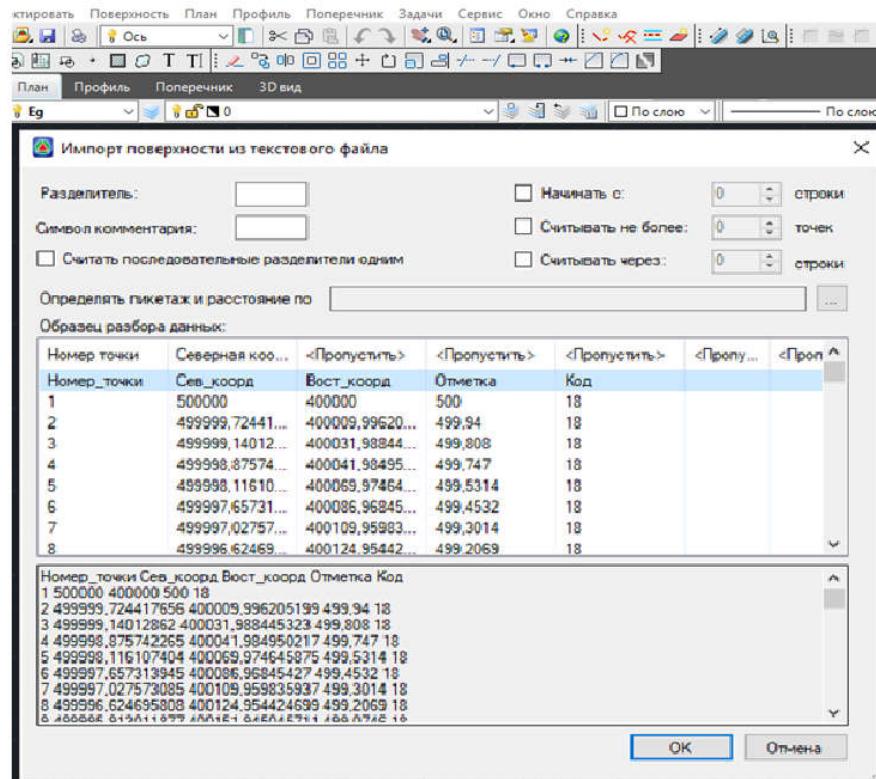


Рис. 5. Импорт данных в программу Robur-Rail

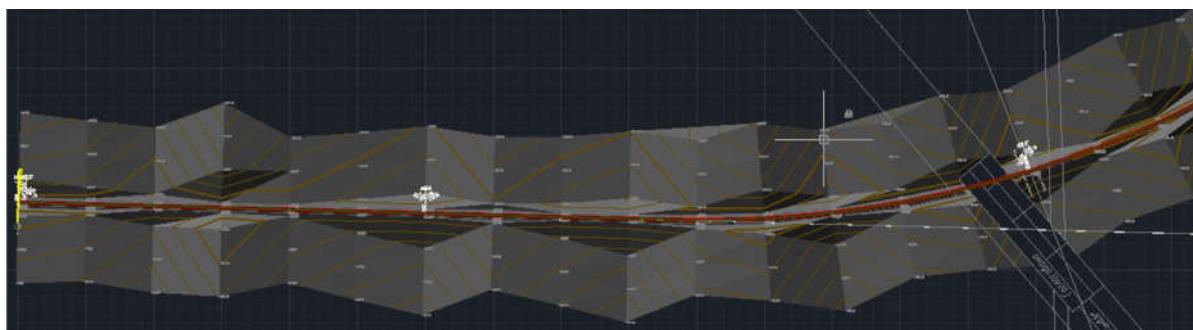


Рис. 6. Участок железнодорожного пути

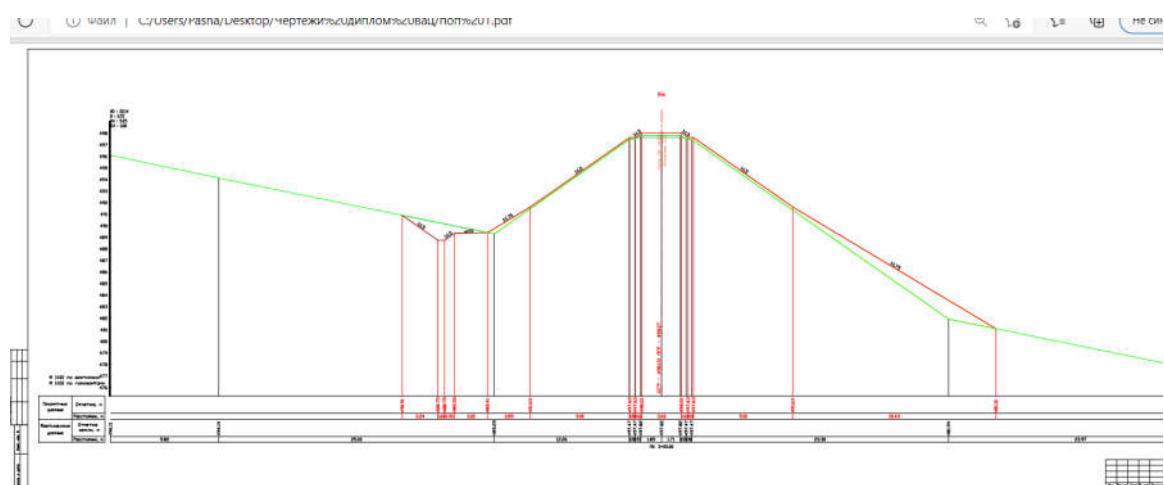


Рис. 7. Пример поперечного профиля

В программе Robur-Rail имеется возможность создания различных чертежей и расчетных ведомостей.

Выводы

Используя разработанную программу-генератор, можно моделировать железнодорожный путь в трехмерной плоскости.

При задании смещения получается модель «сбитого» пути в плане и продольном профиле. С помощью существующих программ для выправки пути можно проводить анализ

влияния улучшения параметров пути на получаемые сдвиги в плане и профиле.

В дальнейшем планируется доработать программу-генератор, добавив информацию по геологии участка через описание скважин и шурfov, в заданных местах. Такая информация на сгенерированном участке железнодорожного пути позволила бы анализировать земляное полотно на наличие слабого основания с последующим проектированием защитных мероприятий.

Список источников

1. СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь : утвержден и введен в действие приказом Министерства транспорта Российской Федерации 06 июля 2015 г. № 209. Москва, 2015. 71 с.
2. Крейнис З. Л., Коршикова Н. П. Техническое обслуживание и ремонт железнодорожного пути. Москва : Учебно-методический кабинет Министерства путей сообщения России, 2001. 768 с.
3. Авторское свидетельство 2022612690. Генератор результатов геодезической съемки железнодорожной линии : № 2022612059 : заявл. 15.02.2022 : опубл. 28.02.2022 / Холодов П. Н. 1 с.
4. Авторское свидетельство 2018612509. Программа для генерации случайного плана линии в прямоугольных координатах с заданным максимальным смещением : № 2014610568 : заявл. 28.12.2017 : опубл. 19.02.2018 / Холодов П. Н., Титов К. М., Подвербный В. А. 1 с.
5. Холодов П. Н., Титов К. М., Подвербный В. А. Моделирование плана оси железнодорожного пути и его изменения в процессе эксплуатации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 61, № 1. С. 74–81.
6. Брынь М. Я., Канашин Н. В., Полетаев В. И. Расчет элементов и разбивка железнодорожных кривых : учебное пособие. Санкт-Петербург : Издательство Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, 2008. 37 с.
7. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование. Москва : Физматлит, 2002. 472 с.
8. Бучкин В. А. Методология автоматизированного проектирования реконструкции плана и профиля железных дорог : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.06. Москва, 2001. 279 с.
9. Бучкин В. А., Рыжик Е. А., Ленченкова Е. П. Сравнительный анализ программных комплексов // Мир транспорта. 2013. Т. 11, № 2 (46). С. 112–121.
10. Корженевич И. П. Программа расчетов переустройства (выправки) плана одного железнодорожного пути – Желдорплан // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. 2006. № 3. С. 13–16.
11. Свидетельство № 2011619174. Проектирование и расчет параметров плана железнодорожного пути (Наноплан) : заявл. 06.10.2011 : зарегистр. 25.11.2011 / Мамитко А. А. 1 с.
12. Мамитко А. А. Автоматическое построение структуры плана линии железнодорожного пути // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Иркутск, 2013. С. 516–521.

References

1. SP 238.1326000.2015. Railway track: approved and put into effect by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation on July 06, 2015 No. 209. Moscow; 2015. 71 p. (In Russ.).
2. Kreynis Z. L., Korshikova N. P. Maintenance and repair of the railway track. Moscow: Educational-methodical cabinet of the Ministry of Railways of Russia; 2001. 768 p. (In Russ.).
3. Kholodov P. N. Copyright certificate 2022612690. Generator of the results of geodetic survey of the railway line: No. 2022612059: Applied 15.02.2022; published 28.02.2022. 1 p. (In Russ.).
4. Kholodov P. N., Titov K. M., Podverbnny V. A. Copyright certificate 2018612509. Program for generating a random line plan in rectangular coordinates with a given maximum offset: No. 2014610568: Applied 28.12.2017; published 19. 02.2018. 1 p. (In Russ.).

5. Kholodov P. N., Titov K. M., Podverbnyy V. A. Modeling of the railway track axis plan and its changes during operation. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2019;61(1):74–81. (In Russ.).
6. Bryn M. Ya., Kanashin N. V., Poletaev V. I. Calculation of elements and breakdown of railway curves: a textbook. Saint Petersburg: Publishing House of the Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University; 2008. 37 p. (In Russ.).
7. Golovanov N. N. Geometric modeling. Moscow: Publishing house of physical and mathematical literature; 2002. 472 p. (In Russ.).
8. Buchkin V. A. Methodology of computer-aided design for the reconstruction of the plan and profile of railways. Dissertation for the degree of Candidate of Engineering. Moscow; 2001. 279 p. (In Russ.).
9. Buchkin V. A., Ryzhik E. A., Lenchenkova E. P. Comparative analysis of software systems. *World of Transport*. 2013;11(46):112–121. (In Russ.).
10. Korzhenevich I. P. Program of Calculations for Reorganization (Alignment) of the Plan for A Railway Track – Zheldorplan. *Automated survey and design technologies*. 2006;(3):13–16. (In Russ.).
11. Mamitko A. A. Certificate No. 2011619174. Design and calculation of the parameters of the railway track plan (Nanoplan): Applied 06.10.2011: registered 25.11.2011. 1 p. (In Russ.).
12. Mamitko A. A. Automatic construction of the railway line plan structure. *Transport Infrastructure of the Siberian Region: Proceedings of the Fourth All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. Irkutsk; 2013. P. 516–521. (In Russ.).

Информация об авторах

П. Н. Холодов – доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей» Иркутского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

В. А. Подвербный – профессор кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей» Иркутского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

Information about the authors

P. N. Kholodov – Associate Professor of the Construction of Railways, Bridges and Tunnels Department, Irkutsk State Transport University, Candidate of Engineering.

V. A. Podverbnyy – Professor of the Construction of Railways, Bridges and Tunnels Department, Irkutsk State Transport University, Doctor of Engineering.

Статья поступила в редакцию 13.10.2022; одобрена после рецензирования 28.10.2022; принята к публикации 09.01.2023.

The article was submitted 13.10.2022; approved after reviewing 28.10.2022; accepted for publication 09.01.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 625.172

doi 10.52170/1815-9265_2023_64_102

Анализ структуры технико-экономических затрат по видам восстановления целостности пласти бесстыкового пути

Дмитрий Валерьевич Величко¹, Максим Александрович Карюкин^{2✉}

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

¹ vdv.nsk@mail.ru

² m.caryuckin@yandex.ru✉

Аннотация. Для обеспечения условий безопасного и бесперебойного движения поездов, а также прогнозирования более точных экономических потерь, связанных с ограничением скоростей движения или простое поездов, остается актуальной задача разработки расчета для оперативного определения потребности в работах по техническому обслуживанию и ремонту пути. Расчет должен учитывать такие основные показатели, как количество пар обращающихся поездов в сутки, масса поездов брутто, тип и масса используемых локомотивов.

В статье рассматривается анализ расчета стоимости восстановления целостности пласти, учитывающего экономические затраты, необходимые для ликвидации причин ограничения скорости подвижного состава, затраты на текущее содержание, стоимость необходимых для замены элементов верхнего строения пути и затраты в случае простоя или ограничения скорости движения.

Подробно представлена структура предложенного расчета. С учетом существующей технической документации и распоряжений, действующих на Западно-Сибирской железной дороге, рассмотрены примеры использования расчета в условиях Транссибирской магистрали, Среднесибирской магистрали и малодеятельных линий.

На основе проведенных расчетов определено, что динамика изменения итоговых затрат на восстановление рельсовой пласти в большей степени зависит от расходов на краткосрочное восстановление.

В зависимости от количества пар поездов, обращающихся на участке восстановления рельсовой пласти, меняется количество поездов (от одного до четырех пассажирских и от трех до десяти грузовых), попадающих под ограничение скорости движения. Увеличивается их общее время в пути, а следовательно, и расходы на потребляемую электроэнергию.

Ключевые слова: бесстыковой путь, рельс, текущее содержание, восстановление целостности, рельсовая пласти, экономические затраты

Для цитирования: Величко Д. В., Карюкин М. А. Анализ структуры технико-экономических затрат по видам восстановления целостности пласти бесстыкового пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 102–108. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_102.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Technical and economic costs structure analysis by types of the continuous welded rails length integrity restoration

Dmitry V. Velichko¹, Maxim A. Karyukin^{2✉}

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

¹ vdv.nsk@mail.ru

² m.caryuckin@yandex.ru✉

Abstract. In order to ensure the conditions for safe and uninterrupted train traffic, as well as to predict more accurate economic losses associated with limiting the speed of movement or downtime of trains, the task of developing a calculation for promptly determining the need for maintenance and repairs of the track remains urgent. The calculation should take into account such basic data as: the number of train pairs in circulation per day, the gross mass of trains, the type and mass of locomotives used.

The article considers the cost calculation analysis of rail length integrity restoration, taking into account the economic costs necessary to eliminate the causes of the rolling stock speed limit, the costs of current maintenance,

the cost of the permanent way elements necessary for replacement and the costs in cases of downtime or speed limit.

The structure of the proposed calculation is presented in detail. Using the example of existing technical documentation and taking into account the orders in force on the West Siberian Railway, examples of the use of calculation in the conditions of Trans-Siberian railway, the Central Siberian Railway and low-activity lines are considered.

Based on the calculations carried out, it was determined that the dynamics of changes in the final costs of restoring the rail length largely depends on the costs of short-term restoration.

Depending on the number of pairs of trains running along the section of the rail length restoration, the number of trains (from one to four passenger and from three to ten freight) falling under the speed limit changes.

Keywords: continuous welded rails, rail, current maintenance, the integrity restoration, rail length, economic costs

For citation: Velichko D. V., Karyukin M. A. Technical and economic costs structure analysis by types of the continuous welded rails length integrity restoration. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):102–108. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_102.

Введение

В современных экономических условиях одной из важнейших задач ведения путевого хозяйства является ресурсосбережение и технико-экономическая эффективность [1]. При этом сохраняется проблема недостаточного объема работ по сварке плетей машинами ПРСМ, направленных на ликвидацию мест временного восстановления. Темп прироста мест временного восстановления целостности плети сохраняется [2]. Таким образом, процент окончательно восстановленных мест от потребного количества составляет около 36 %.

Рельс – самый материалоемкий элемент верхнего строения пути [3]. Внезапный отказ в работе рельса влечет за собой дополнительные экономические затраты, связанные с ограничением скоростей движения поездов или их простоем. Основная причина отказов рельса – развитие внутренних дефектов.

По данным Новосибирского центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры, в 2020–2021 гг. наиболее распространеными дефектами рельсов являются дефекты со следующими кодами: 21.2, 30.1, 30.2, 53.1, 99.1. Количество выявленных дефектов данных кодов и их процентное соотношение к общему числу дефектов приведены в табл. 1.

При обнаружении в рельсовой плети остродефектного рельса, например по коду 21.2 с выходом трещины на поверхность катания [4], должны быть приняты меры по его

устранению и восстановлению рельсовой плети для безопасного пропуска поездов, т. е. организованы работы по краткосрочному, временном и окончательному восстановлению целостности плети бесстыкового пути.

Краткосрочное восстановление заключается в установке шестидырных накладок, сжатых струбцинами. Время их нахождения в пути – не более 3 ч, в течение которых должно быть организовано временное или окончательное восстановление [5].

При временном восстановлении из рельсовой плети должна быть вырезана часть рельса с дефектом и вместо нее уложен рельс длиной 8–11 м. Расстояние от края дефекта или от конца трещины до ближайшего пропила или до ближайшего сварного стыка должно быть не менее 3 м. Концы укладывающегося рельса соединяются с образовавшимися концами рельсовой плети шестидырными накладками, стягиваемыми полным комплектом болтов [5].

Окончательное восстановление рельсовых плетей заключается в вваривании электроконтактным способом в рельсовую плеть заранее подготовленного рельса без болтовых отверстий взамен временного или сваривании алюминотермитной сваркой временно уложенного рельса длиной 8–11 м с болтовыми отверстиями с образовавшимися концами рельсовой плети [5]. Вваривание рельса производится электроконтактным способом при помощи машин ПРСМ и МРК-01.

Таблица 1

Наиболее распространенные дефекты в 2020–2021 гг.

Год	Количество дефектов рельсов, шт.	Количество выявленных дефектов рельсов по основным кодам, шт. / % от общего числа дефектов				
		21.2	30.1	30.2	53.1	99.1
2020	2 644	442 / 16,7	159 / 6,1	351 / 13,3	122 / 4,6	407 / 15,4
2021 (11 месяцев)	2 260	283 / 12,5	154 / 6,8	291 / 12,9	212 / 9,4	474 / 21,0

Для возможности быстрой замены остродефектных / дефектных рельсов после их обнаружения [6] рельс изымается из покилометрового запаса (ПКЗ) и укладывается для устранения неисправности. Как известно, перед укладкой в ПКЗ рельсы проверяются дефектоскопными средствами и маркируются белой несмываемой краской на шейке и головке рельса на расстоянии 1 м от левого торца: на головке указывается (цифрами) группа, тип рельса и его длина; на шейке – группа и пропущенный тоннаж в миллионах тонн брутто.

Также не стоит забывать, что по типу, группе годности, длине, вертикальному и боковому износу укладываемые в ПКЗ рельсы должны соответствовать рельсам, лежащим в пути (разница в износе не более 1 мм).

Материалы и методы исследования

Анализ предложенного расчета технико-экономических затрат на восстановление целостности плети бесстыкового пути проводится с целью определения степени влияния учтенных в нем факторов и работ на итоговую стоимость восстановления.

Данный расчет затрат является универсальным и позволяет оперативно определить экономические затраты на восстановление рельсовой плети для участков движения поездов с различными эксплуатационными условиями.

В общем виде затраты на восстановление рельсовой плети при выявлении остродефектного рельса определяются по следующему выражению:

$$\mathcal{E}_{\text{вос.рел}}^{\text{остр}} = \mathcal{E}_{\text{кр.вос}} + \mathcal{E}_{\text{вр.вос}} + \mathcal{E}_{\text{ок.вос}}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{\text{кр.вос}}$ – затраты на краткосрочное восстановление рельсовых плетей, р.; $\mathcal{E}_{\text{вр.вос}}$ – затраты на временное восстановление рельсовых плетей, р.; $\mathcal{E}_{\text{ок.вос}}$ – затраты на окончательное восстановление рельсовых плетей, р.

Затраты на краткосрочное восстановление рельсовой плети

$$\mathcal{E}_{\text{кр.вос}} = C_{\text{нак}} + \mathcal{E}_{\text{tc}} + \mathcal{E}_{\text{орп}}^{\text{пас}} + \mathcal{E}_{\text{орп}}^{\text{гр}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{нак}}$ – стоимость одной шестиштырной накладки 1Р-65, равная 3 366,94 р.; \mathcal{E}_{tc} – стоимость работы монтеров пути по выполнению краткосрочного восстановления, р.; $\mathcal{E}_{\text{орп}}^{\text{пас}}$,

$\mathcal{E}_{\text{орп}}^{\text{гр}}$ – стоимость из-за ограничения скоростей движения пассажирских и грузовых поездов по предупреждениям, р.

Стоимость работы обслуживающего персонала при выполнении любого вида восстановления рельсовой плети рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{tc}} = n_p H T_p \alpha, \quad (3)$$

где n_p – число рабочих (монтеров пути) при выполнении данной операции, чел.; H – оперативное время на выполнение объема работ, чел.-ч; T_p – тарифная ставка по оплате труда рабочим, р./ч; α – коэффициент для учета затрат на пропуск поездов и отдых рабочих.

Так как в месте повреждения устанавливают шестиштырные накладки, сжатые струбцинами, то поезда в течение 3 ч пропускаются по этому месту со скоростью 25 км/ч.

Расходы, вызванные снижением скоростей движения поездов по участку с выданным предупреждением [7], определяются по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{орп}} = \sum n_{\text{пп}} (d_1 + d_2), \quad (4)$$

где $\sum n_{\text{пп}}$ – число поездов, проследовавших по участку за время действия предупреждения, шт.; d_1 – затраты, связанные с энергетическими потерями одного поезда (из-за торможения и разгона) при изменении скорости V_x до установленной ограничением $V_{\text{пп}}$, р.; d_2 – затраты, связанные с потерей времени в связи с задержкой одного поезда, р.

$$d_1 = 3,8 \varepsilon (P + Q)(V_x^2 - V_{\text{пп}}^2) \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

где ε – расходная ставка на 1 тс·км механической работы локомотива, для электрической тяги $\varepsilon = 41,07$ р.; P – масса локомотива для ЭП1 и ВЛ80Р, равная 132 и 192 т соответственно; Q – масса поезда брутто для ЭП1 и ВЛ80Р, равная 800 и 6 000 т соответственно.

$$d_2 = C_{\text{пп}} \left[\left(\frac{1}{V_{\text{пп}}} - \frac{1}{V_x} \right) L_{\text{пп}} + \Delta t_t + \Delta t_p \right], \quad (6)$$

где $C_{\text{пп}}$ – стоимость 1 чостоя поезда, для грузового $C_{\text{пп}} = 1 716,64$ р., для пассажирского $C_{\text{пп}} = 539,81$ р.; $L_{\text{пп}}$ – длина участка, на котором действует предупреждение об ограничении скорости, км; Δt_t , Δt_p – время на торможение и разгон поезда, ч, при изменении скорости с $V_x = 100$ км/ч до $V_{\text{пп}} = 15-40$ км/ч.

Величина $\Delta t_t + \Delta t_p$ для пассажирского поезда составляет 0,0254 ч, для грузового поезда – 0,017 ч.

$$L_{np} = 2 \cdot 0,05 + l_{np} + 2A + l_n, \quad (7)$$

где 0,05 – расстояние от конца фронта работ до сигнала остановки, км; l_{np} – длина препятствия, равная 0,01 км; A – расстояние от сигнальных знаков «Начало опасного места» («Конец опасного места») до сигналов уменьшения скорости, согласно [8] $A = 1,0$ км; l_n – длина состава с локомотивом, для грузового $l_n = 0,95$ км, для пассажирского $l_n = 0,3$ км.

$$\sum n_{np} = \frac{N_{max} t_{np}}{24}, \quad (8)$$

где N_{max} – максимальное количество пассажирских и грузовых поездов, прошедших в течение суток, равное 20 и 60 шт. соответственно; t_{np} – продолжительность действия предупреждения, ч.

Затраты на временное восстановление рельсовой плети

$$\mathcal{E}_{bp.voc} = \sum C_i + \mathcal{E}_{tc} + \mathcal{E}_{np}^{rp} + \mathcal{E}_{np}^{pac} + T \mathcal{E}_{MPT}, \quad (9)$$

где $\sum C_i$ – суммарная стоимость материалов, необходимых для временного восстановления, р.; \mathcal{E}_{tc} – стоимость работы монтеров пути по выполнению временного восстановления, р.; \mathcal{E}_{np}^{rp} , \mathcal{E}_{np}^{pac} – стоимостьостояния грузовых и пассажирских поездов соответственно за время «окна», р.; T – время эксплуатации машины МПТ, ч; \mathcal{E}_{MPT} – стоимость эксплуатации машины МПТ, равная 2 793 р./ч;

Время «окна» для выполнения временного восстановления рельсовой плети составляет 0,62 ч.

Стоимостьостояния пассажирского и грузового поездов составляет 539,81 и 1 716,64 р./ч соответственно.

Суммарная стоимость материалов, необходимых для замены элементов верхнего строения, при временном восстановлении плети

$$\sum C_i = C_{накл} + C_{рел.вст} + C_{болт} + C_{гайка} + C_{шайба}, \quad (10)$$

где $C_{накл}$ – стоимость двух шестидырных накладок 1Р-65, равная 3 366,94 р./шт.; $C_{рел.вст}$ – стоимость 10 м рельсовой вставки, равная 13 220,60 р.; $C_{болт}$ – стоимость восьми болтов М-27-160, равная 102,99 р./шт.; $C_{гайка}$ – стоимость восьми гаек, равная 34,64 р./шт.; $C_{шайба}$ – стоимость восьми шайб, равная 15,92 р./шт.

Затраты на окончательное восстановление рельсовой плети

$$\mathcal{E}_{ок.voc} = C_p + \mathcal{E}_{tc} + \mathcal{E}_{np}^{rp} + \mathcal{E}_{np}^{pac} + \mathcal{E}_{ПРСМ}, \quad (11)$$

где C_p – стоимость 12,5 м рельсовой рубки, равная 15 864,72 р.; \mathcal{E}_{tc} – стоимость работы монтеров пути по выполнению окончательного восстановления, р.; \mathcal{E}_{np}^{rp} , \mathcal{E}_{np}^{pac} – стоимостьостояния грузовых и пассажирских поездов соответственно за время «окна», р.; $\mathcal{E}_{ПРСМ}$ – стоимость работы машины ПРСМ-3 по сварке одного стыка, равная 47 321 р.

Стоимостьостояния пассажирского и грузового поездов не изменяется: 539,81 и 1 716,64 р./ч соответственно.

Характеристика обслуживающего персонала, выполняющего работы по краткосрочному, временному и окончательному восстановлению рельсовой плети, согласно [9, 10] приведена в табл. 2.

Результаты исследования

В табл. 3 приведены примеры расчета экономических затрат для различных вариантов обращения поездов в границах Западно-Сибирской железной дороги. Расчет затрат при восстановлении рельсовой плети на участке

Таблица 2

Характеристика обслуживающего персонала, выполняющего работы по краткосрочному, временному и окончательному восстановлению рельсовой плети

Обслуживающий персонал	Число работающих, чел.	Разряд	Тарифная ставка по оплате труда рабочим, р./ч	Оперативное время на учтенный объем, чел.-ч
<i>Краткосрочное восстановление</i>				
Монтер пути	4	4	103,67	0,875
<i>Временное восстановление</i>				
Монтер пути	8	4	103,67	1,5
<i>Окончательное восстановление</i>				
Монтер пути	8	3	89,41	3
Дефектоскопист	1	5	116,28	2,3

Таблица 3

Примеры расчета затрат на восстановление рельсовой плети

Параметры	Вариант расчета				
	1	2	3	4	5
Исходные данные:					
$Q_{\text{пас}}, \text{т}$	1 380	1 380	1 140	1 140	5 400
$Q_{\text{гр}}, \text{т}$	126 000	7 000	9 000	8 000	6 000
$N_{\text{пас}}, \text{шт.}$	30	30	5	5	1
$N_{\text{гр}}, \text{шт.}$	70	70	75	75	20
<i>Краткосрочное восстановление</i>					
Расходы, вызванные снижением скоростей движения поездов, р.:					
$\mathcal{E}_{\text{орп}}^{\text{пас}}$	13 221,68	13 221,68	2 789,46	2 789,46	1 499,58
$\mathcal{E}_{\text{орп}}^{\text{гр}}$	105 325,44	59 900,87	84 582,14	75 569,33	17 263,11
Расходы на восстановление $\mathcal{E}_{\text{вр.вос}}, \text{р.}$	12 5734,2	80 309,68	94 558,74	85 545,93	36 397,89
<i>Временное восстановление</i>					
Стоимость простоя поездов, р.:					
$\mathcal{E}_{\text{орп}}^{\text{пас}}$	334,68	334,68	334,68	334,68	334,68
$\mathcal{E}_{\text{орп}}^{\text{гр}}$	2 128,63	21,28,63	2 128,63	2 128,63	1 064,32
Расходы на восстановление $\mathcal{E}_{\text{вр.вос}}, \text{р.}$	26 932,91	26 932,91	26 932,91	26 932,91	25 868,59
<i>Окончательное восстановление</i>					
Стоимость простоя поездов, р.:					
$\mathcal{E}_{\text{орп}}^{\text{пас}}$	3 724,69	3 724,69	121,56	1 241,56	1 241,56
$\mathcal{E}_{\text{орп}}^{\text{гр}}$	27 637,90	23 637,90	31 586,18	31 586,18	7 896,54
Расходы на восстановление $\mathcal{E}_{\text{ок.вос}}, \text{р.}$	97 564,92	97 564,92	99 030,06	99 030,06	75 340,43
<i>Итого</i>	250 232,07	204 807,50	220 521,71	211 301,56	137 606,92

Транссибирской магистрали по I и II пути отражен в вариантах 1 и 2, Среднесибирской магистрали по I и II пути – в вариантах 3 и 4, малодеятельной линии – в варианте 5.

Так как доля обращения пригородных поездов в сравнении с пассажирскими и грузовыми мала, в расчете они не рассматриваются.

Например, в среднем по участку Транссибирской магистрали в пределах Западно-Сибирской железной дороги обращается 100 пар поездов (по данным на период с 13.12.2020 по 11.12.2021). Округлив количество пар пассажирских и грузовых поездов (за счет упразднения пригородных), получим 30 пар пассажирских и 70 пар грузовых поездов (см. вариант 1 в табл. 3).

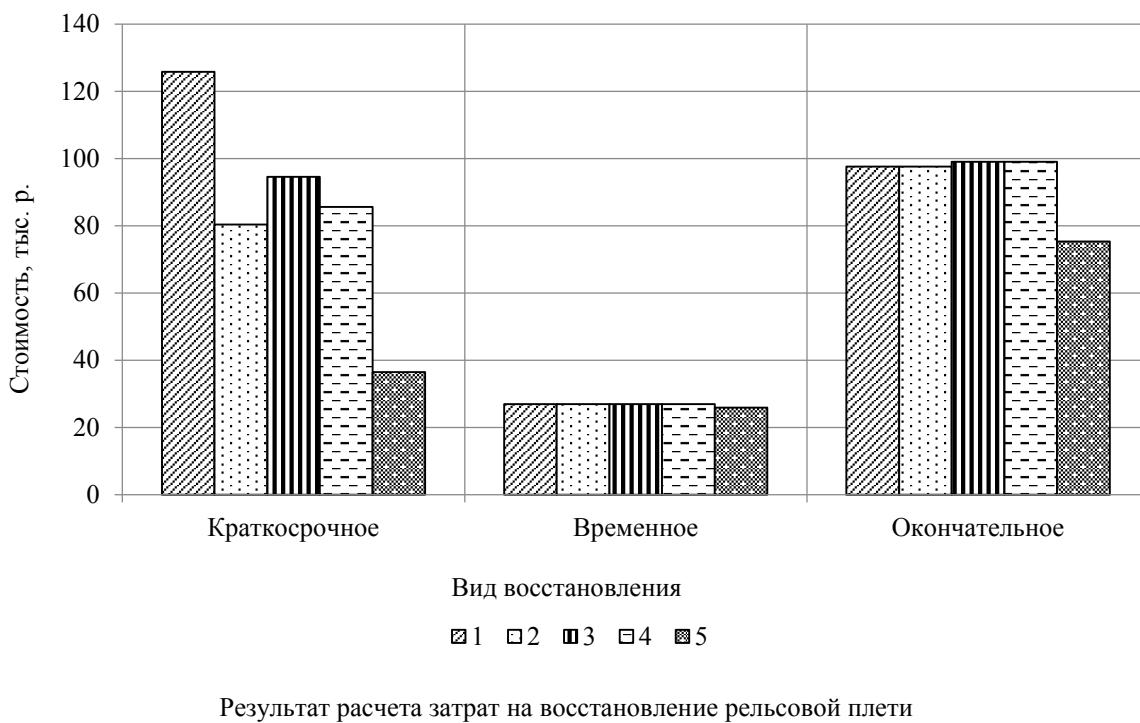
Для более удобного восприятия результатов расчета представим данные в виде гистограммы (рисунок).

На основе проведенных расчетов можно утверждать, что динамика изменения итоговых затрат на восстановление рельсовой плети в

большей степени зависит от расходов на краткосрочное восстановление.

Вследствие уменьшения скорости движения поездов по участку восстановления увеличивается их общее время в пути и, соответственно, расходы на потребляемую электроэнергию. Таким образом, расходы на кратковременное восстановление проявляют наибольшую динамику изменения, поскольку в данном случае учитываются затраты, связанные с энергетическими потерями одного поезда при торможении и разгоне на участке ограничения скорости. Доля затрат от общей стоимости составляет от 26 до 50 %.

Расходы на временное восстановление оказывают наименьшее влияние на динамику изменения итоговой стоимости восстановления плети. Затраты на приобретение элементов верхнего строения пути, работу персонала и эксплуатацию машин МПТ остаются постоянными, а длительность «окна» составляет 0,62 ч, что ведет к задержке в среднем одного



пассажирского и одного грузового поездов. Затраты на их простой сводятся к минимуму, поэтому расходы на временное восстановление зачастую остаются неизменными и составляют 11–19 % от общей стоимости работ.

Расходы на окончательное восстановление имеют незначительное влияние на изменение итоговой стоимости восстановления плети. Основная доля расходов – затраты на работу обслуживающего персонала и работу машины ПРСМ. Влияние затрат на задержку поездов минимально, следовательно, и динамика изменения данных расходов меньше, чем при краткосрочном восстановлении. При этом данные затраты остаются наиболее высокими и составляют 39–55 % от общей стоимости.

Выводы

В результате анализа предложенного расчета итоговая стоимость восстановления

плети наиболее зависит от затрат на краткосрочное восстановление.

В зависимости от количества пар поездов, обращающихся на участке восстановления рельсовой плети, меняется количество поездов (от одного до четырех пассажирских и от трех до десяти грузовых), попадающих под ограничение скорости движения. Увеличивается их общее время в пути и, соответственно, расходы на потребляемую электроэнергию.

Доля затрат, связанных с энергетическими потерями, и затрат, связанных с потерей времени в связи с задержкой поездов, от стоимости всего краткосрочного восстановления составляет около 67 %.

В связи с вышесказанным можно утверждать, что данные затраты оказывают наибольшее влияние на динамику изменения итоговой стоимости восстановления плети.

Список источников

1. Величко Д. В. Особенности эксплуатации бесстыкового пути при превышении нормативного тоннажа // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2010. № 22. С. 49–53.
2. Анализ технического состояния бесстыкового пути на Западно-Сибирской железной дороге / Д. В. Величко, Д. Г. Шелеметьев, Е. С. Антерейкин, А. А. Николаенко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3. С. 5–11.
3. Щепотин Г. К. Влияние грузонапряженности и осевых нагрузок на долговечность рельсов в регионах с холодным климатом // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1 (56). С. 12–19.

4. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436/р : с изменениями от 01.04.2021. Москва : ОАО «РЖД», 2021. 87 с.

5. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544/р : редакция от 19.10.2020. Москва : ОАО «РЖД», 2020. 129 с.

6. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288/р. Москва : ОАО «РЖД», 2016. 289 с.

7. Щепотин Г. К., Величко Д. В., Славиковская Э. А. Технико-экономическая оценка эффективности бесстыкового пути в условиях Сибири : методическое пособие. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2006. 50 с.

8. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утверждены приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250. Москва, 2022. 514 с.

9. Нормы времени на работы по текущему содержанию пути. Часть 2. Работы по рельсам и скреплениям : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 11.01.2018 № 22/р. Москва : ОАО «РЖД», 2018. 393 с.

10. Правила и технологии выполнения основных работ при текущем содержании пути : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 30.11.2018 № ЦДИ-1511. Москва : ОАО «РЖД», 2018. 128 с.

References

1. Velichko D. V. Features of the operation of a jointless track when exceeding the standard tonnage. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2010;(22):49–53. (In Russ.).
2. Velichko D. V., Sheremetev D. G., Antereikin E. S., Nikolaenko A. A. Analysis of the technical condition of continuous welded rails on the West Siberian Railway. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2017;(3):5–11. (In Russ.).
3. Shchepotin G. K. Influence of load-carrying capacity and axial loads on the durability of rails in regions with cold climates. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(56):12–19. (In Russ.).
4. Instructions for assessing the condition of the track gauge by track measuring means and measures to ensure the train traffic safety: approved by order of Russian Railways No. 436/r dated February 28, 2020: as amended on April 1, 2021. Moscow: Russian Railways; 2021. 87 p. (In Russ.).
5. Instructions for the device, installation, maintenance and repair of continuous welded rails: approved by order of Russian Railways No. 2544 dated December 14, 2016: as amended on October 19, 2020. Moscow: Russian Railways; 2020. 129 p. (In Russ.).
6. Instructions for the current maintenance of the railway track: approved. by order of Russian Railways No. 2288r dated November 14, 2016. Moscow: Russian Railways; 2016. 289 p. (In Russ.).
7. Shchepotin G. K., Velichko D. V., Slavikovskaya E. A. Technical and economic assessment of the effectiveness of continuous welded rails in Siberia: Methodical manual. Novosibirsk: Siberian Transport University Publishing House; 2006. 50 p. (In Russ.).
8. Rules of technical operation of railways of the Russian Federation: approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 250 dated June 6, 2022. Moscow; 2022. 514 p. (In Russ.).
9. Norms of time for work on the current content of the path. Part 2. Work on rails and fasteners: approved. by order of Russian Railways No. 22r dated January 11, 2018. Moscow: Russian Railways; 2018. 393 p. (In Russ.).
10. Rules and technologies for performing work with the current content of the path: approved. by order of Russian Railways No. CDI-1511 dated November 30, 2018. Moscow: Russian Railways; 2018. 128 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

M. A. Karyukin – Postgraduate Student of the Railway Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 28.11.2022; одобрена после рецензирования 29.12.2022; принятая к публикации 09.01.2023.

The article was submitted 28.11.2022; approved after reviewing 29.12.2022; accepted for publication 09.01.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 691.328:539.37

doi 10.52170/1815-9265_2023_64_109

Методы исследования взаимодействия арматуры с бетоном Часть 2. Численное моделирование

Анатолий Михайлович Попов¹, Антон Сергеевич Самошкин^{2✉},
Виктор Михайлович Тихомиров³

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

¹ 47604@stu.ru

² assamoshkin.stu@gmail.com✉

³ twm@stu.ru

Аннотация. В работе проведен аналитический обзор численных моделей, описывающих процессы сцепления арматуры с бетоном в железобетоне. Рассматривалась реализация математических моделей, основанная на методе конечных элементов. Анализировались две основные группы таких методов. Отличительной особенностью первой группы является наличие в конечно-элементной модели железобетона специальных элементов связи. С помощью этих элементов моделировалась жесткость сцепления при смещении бетона относительно арматуры в продольном и поперечном направлениях. Элементы связи различаются по числу параметров матрицы жесткости. Такой подход к моделированию контакта широко распространен, а некоторые специальные контактные элементы добавлены в библиотеки известных расчетных комплексов. В другой группе методов для упрощения моделирования механических процессов в контактной зоне вводится специальный контактный (пограничный) сплошной слой. При этом конечно-элементная сетка слоя состоит из стандартных изопараметрических конечных элементов, а железобетон представляется сплошной неоднородной средой без разрывов в полях перемещений.

Все рассмотренные способы численного моделирования контактного взаимодействия в железобетоне не описывают реальное напряженно-деформированное состояние в непосредственной окрестности арматурного стержня. Подходы различаются количеством параметров, которые позволяют полностью описать матрицы жесткости специально вводимых конечных элементов. В статье идентификации данных параметров уделено особое внимание. От универсальности и простоты способов идентификации зависит основная характеристика метода – возможность его применения для расчета железобетонных конструкций. Проведен сравнительный анализ рассмотренных технологий с точки зрения их практического применения для расчета параметров напряженно-деформируемого состояния железобетонных конструкций.

Ключевые слова: железобетон, сцепление арматуры с бетоном, численное моделирование, метод конечных элементов, математические модели

Для цитирования: Попов А. М., Самошкин А. С., Тихомиров В. М. Методы исследования взаимодействия арматуры с бетоном. Часть 2. Численное моделирование // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 109–118. DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_109.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Research methods of interaction of reinforcement with concrete Part 2. Numerical models

Anatoly M. Popov¹, Anton S. Samoshkin^{2✉}, Victor M. Tikhomirov³

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

¹ 47604@stu.ru

² assamoshkin.stu@gmail.com✉

³ twm@stu.ru

Abstract. In this paper, an analytical review of numerical models describing the bond-slip of reinforcement to concrete. The implementation of mathematical models based on the finite element method is considered. Two main groups of such methods were analyzed. A distinctive feature of the first group is the presence of special connection elements in the finite element model of reinforced concrete. With the help of these elements, the bond-slip was

modeled when the concrete was displaced relative to the reinforcement in the longitudinal and transverse directions. The connection elements differ in the number of parameters of the stiffness matrix. This approach to contact modeling is widespread, and some special contact elements have been added to the libraries of calculation systems. In another group of methods, to simplify the modeling of mechanical processes in the contact zone, a special contact (boundary) continuous layer is introduced. In this case, the finite element mesh of the layer consists of standard isoparametric finite elements, and the reinforced concrete is represented by a continuous inhomogeneous medium without discontinuities in the displacement fields.

All considered methods of numerical modeling of contact interaction in reinforced concrete do not describe the real stress-strain state in the immediate vicinity of the reinforcing bar. The approaches differ in the number of parameters that make it possible to completely describe the stiffness matrix of specially introduced finite elements. In the article, the identification of these parameters is given special attention. The main characteristic of the method depends on the versatility and simplicity of identification methods – the possibility of its application for the calculation of reinforced concrete structures. A comparative analysis of the considered technologies is carried out from the point of view of their practical application for calculating the parameters of the stress-strain state of reinforced concrete structures.

Keywords: reinforced concrete, interaction of reinforcement with concrete, numerical modeling, finite element method, mathematical models

For citation: Popov A. M., Samoshkin A. S., Tikhomirov V. M. Research methods of interaction of reinforcement with concrete. Part 2. Numerical models. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):109–118. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_64_109.

Введение

В первой части работы был представлен анализ экспериментальных и аналитических методов исследования сцепления арматуры с бетоном [1]. Важным направлением исследований контактного взаимодействия арматуры с бетоном является численная реализация ранее предложенных математических моделей решения этой задачи. Этому и посвящена вторая часть исследования.

В работе описаны направления математического моделирования контактного взаимодействия арматуры с бетоном, приспособленные для численной реализации. При этом не рассмотрены предельно упрощенные модели, в которых между бетоном и арматурой предполагается идеальный контакт и прямое численное решение контактной задачи во всем многообразии процессов, происходящих при смещении арматуры относительно бетона. Для описания этих процессов необходимо идентифицировать большое количество механических параметров, что является отдельной, достаточно трудоемкой исследовательской задачей.

В рассмотренных численных моделях для описания сцепления используется виртуальный элемент – контактный слой (КС), деформирование которого описывает только взаимное смещение арматуры и бетона, что позволяет интегрально учитывать процессы, происходящие в зоне контакта. Такой подход значительно сокращает число неизвестных механических параметров и упрощает геометрию арматуры, которую заменяют стержнем с гладкой цилиндриче-

ской поверхностью. В результате железобетон моделируют средой из трех материалов: арматура, КС и бетон. Численная реализация такой модели позволяет адекватно описывать напряженно-деформированное состояние (НДС) на удалении от зоны контакта [2–11].

Для определения параметров КС используют два разных подхода: итерационно до совпадения результатов моделирования с данными эксперимента; аналитически по результатам базовых испытаний для соответствующей пары арматура – бетон. При этом базовым называется такое испытание, результаты которого позволяют получить информацию о сопротивлении сдвигу арматуры относительно бетона, достаточную для идентификации параметров рассматриваемой модели.

Из всех численных методов наиболее распространенным в научной среде и инженерной деятельности и разработанным является метод конечных элементов (МКЭ). Поэтому в данной работе рассмотрены модели железобетона, реализованные МКЭ. Многие из таких моделей потребовали создания специальных конечных элементов (КЭ), названных интерфейсными или элементами связи.

Модели со специальными конечными элементами

Впервые модель железобетона с учетом контактного взаимодействия арматуры с бетоном предложили в 1967 г. Д. Нго и А. Скорделис [2]. Бетон и арматура моделировались линейно-упругими двумерными и одномерными элементами соответственно, связанными между собой

специальными одномерными элементами. Эти элементы моделировали контактное взаимодействие при смещении бетона относительно арматуры в продольном (x) и поперечном (r) направлениях. По физическому смыслу этот элемент эквивалентен двум упругим пружинам, связывающим узлы бетона и арматуры. Поэтому такой элемент принято называть пружинным. Длина такого элемента связи первоначально равна нулю, узлы бетона и арматуры совпадают. Матрица жесткости элемента связывает напряжения в радиальном σ_r и продольном τ_{bs} направлениях с соответствующими смещениями g_r и g :

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \tau_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_r & 0 \\ 0 & K_{bs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_r \\ g \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где K_r и K_{bs} – постоянные коэффициенты жесткости в поперечном и продольном направлениях соответственно. В работе [2] значение коэффициента K_{bs} подбиралось до совпадения с экспериментальными данными, а значение K_r назначалось достаточно большим, что эквивалентно идеальному контакту в радиальном направлении.

Выражение (1) предполагает линейную зависимость τ_{bs} от g , что соответствует упругому взаимодействию арматуры с бетоном. Это справедливо только в малом диапазоне смещений g (рис. 1). Поэтому в работе [12] были представлены модификации этого элемента связи, в матрице жесткости которого напряжения τ_{bs} со смещением g связаны полиномами третьей степени [13]

$$\tau_{bs}^{(n)}(g) = n_1 g^3 + n_2 g^2 + n_3 g, \quad (2)$$

и четвертой степени [14]

$$\tau_{bs}^{(h)}(g) = h_1 g^4 + h_2 g^3 + h_3 g^2 + h_4 g, \quad (3)$$

где n_i ($i = 1, 2, 3$) и h_i ($i = 1, 2, 3, 4$) – постоянные коэффициенты, определяемые с использованием экспериментальных данных.

На рис. 2 под номером 1 качественно построен график функции (2), а под номером 2 – функции (3). Линия 1 лучше отражает реальную работу бетона в области контакта (см. рис. 1). Однако из-за наличия ниспадающей ветви функцию (2) труднее численно реализовывать, чем зависимость (3).

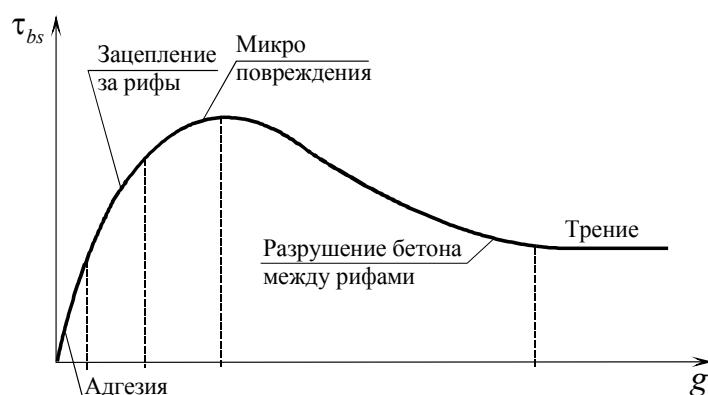


Рис. 1. Стадии работы бетона в зоне сцепления с профилированной арматурой

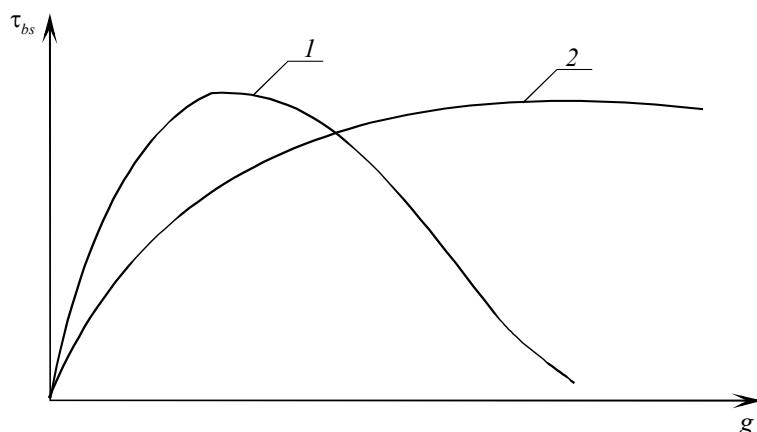


Рис. 2. Графическая интерпретация законов (2) и (3)

Модель с таким интерфейсным элементом была использована для анализа деформирования различных железобетонных конструкций [3–6]. Также в работе [15] были использованы интерфейсные элементы, деформирующиеся по различным нелинейным законам.

Дальнейшее развитие такого подхода было предложено в работах [16, 17]. В этой модели для гладких арматурных стержней учитывалось изменение локальных касательных напряжений $\tau_{bs}^{(u)}$ в зависимости от радиальных напряжений σ_r :

$$\tau_{bs}^{(u)} = c + f\sigma_r,$$

где c – предельные касательные напряжения, при которых разрушаются адгезионные связи арматуры с бетоном; f – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления сдвигу в зависимости от радиального давления.

В 1991 г. пружинный элемент был внесен в библиотеку элементов расчетного комплекса ANSYS [18], где зависимость между силой и смещением соединенных элементов может быть задана любой кривой. В работе [7] было проведено численное исследование вытягивания арматуры из короткого образца. Для определения жесткости пружинного элемента был использован нормальный закон сцепления Холмянского [19]. Распорные (радиальные) усилия в зоне контакта не моделировались. Полученные результаты были хорошо согласованы с опытными данными.

А. К. де Гrot, Г. М. А. Кастерс и Т. Монни предложили двумерный интерфейсный элемент [20]. Авторы основывались на том, что при смещении ребристого стержня в бетоне зарождаются и распространяются трещины, между которыми образуются конусы сжатого бетона, упирающиеся в ребра арматуры и передающие усилия на окружающий бетон. Угол наклона трещин φ , образующих конусы, зависит от геометрических и механических параметров арматуры и бетона. Такой элемент моделировал сопротивление бетона смещению относительно арматуры с учетом заклинивающего воздействия конусов сжатого бетона на арматуру. В этом случае связь между напряжениями и перемещениями в контактном слое записывается выражением

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_3 \\ -k_3 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ g_r \end{bmatrix}, \quad (4)$$

здесь k_i ($i = 1, 2, 3$) – компоненты матрицы жесткости, зависящие от механических и геометрических параметров элемента связи и условий по контакту арматуры с бетоном:

$$k_1 = \zeta + k_2 \operatorname{tg}^2 \varphi; \quad k_2 = \frac{E_{bs} \cos^3 \varphi}{t_{bs}}; \quad k_3 = k_2 \operatorname{tg} \varphi, \quad (5)$$

где ζ – так называемый модуль скольжения, характеризующий жесткость адгезионных связей и величину сил трения между арматурой и бетоном в зоне контакта; E_{bs} , t_{bs} – модуль упругости и толщина контактного слоя соответственно.

Для упрощения дискретизации модели предложено объединить элементы арматуры и связи и ввести комбинированный элемент. Связь между напряжениями и перемещениями в контактном слое для этого комбинированного элемента описывается выражением

$$\mathbf{S}^* = \begin{bmatrix} \sigma_a \\ \tau_{bs} \\ \sigma_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_4 & -c_5 & c_6 \\ -c_5 & c_1 & -c_3 \\ c_6 & -c_3 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_a r / 2 \\ g \\ g_r + r \varepsilon_r \end{bmatrix}, \quad (6)$$

здесь ε_a , ε_r – продольная и поперечная относительные деформации арматуры соответственно; r – радиус арматурного стержня; c_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) – коэффициенты, зависящие от механических параметров бетона и арматуры, а также геометрии поверхности контакта. Связь этих коэффициентов с параметрами модели следующая:

$$\begin{aligned} c_1 &= S + c_2 \operatorname{tg}^2 \varphi; \quad c_2 = \beta \frac{E_s}{r}; \\ c_3 &= c_2 \operatorname{tg} \varphi; \quad c_4 = \frac{2E_s}{r} (1 + 2\beta v_s^2); \\ c_5 &= 2v_s c_2 \operatorname{tg} \varphi; \quad c_6 = 2v_s c_2, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\beta = \left[\frac{t_{bs} E_s}{E_{bs} r \cos^3 \varphi} + (1 + v_s)(1 - 2v_s) \right]^{-1}$; E_s , v_s – модуль упругости и коэффициент поперечной деформации арматуры соответственно.

В соответствии с теми же положениями был разработан трехмерный конечный элемент связи.

Такой подход в двумерной и трехмерной постановке был протестирован при решении практических задач: растяжение центрально-армированной железобетонной призмы и изгиб железобетонной балки сложной формы. Для каждого объекта подбирались линейно

независимые параметры t_{bs} , E_{bs} , φ и ζ итерационным способом.

Подобные интерфейсные элементы применялись в работах других авторов [21, 22]. Для описания их деформирования использовались иные зависимости $\tau_{bs} = f(g)$.

В работе [23] применили новый изопараметрический элемент бетона, внутрь которого встроены специальные одномерные элементы арматуры, расположенные параллельно осям локальной системы координат η и ξ (рис. 3). Функции формы для элементов бетона и арматуры одинаковы. Перемещение стержня при деформировании элемента бетона определяется с помощью функций формы, что обеспечивает совместность перемещений для обоих элементов. Однако такая картина не соответствует действительности. В результате для задач, в которых эффекты сцепления и проскальзывания арматуры относительно бетона являются определяющими при деформировании и разрушении железобетона, сходимость расчетных и экспериментальных данных неудовлетворительна, на что указывают авторы модели. И это несмотря на то, что деформирование и разрушение самого бетона описаны достаточно точно.

Такой подход к моделированию железобетона позволяет сократить число элементов модели и, как следствие, снизить вычислительную трудоемкость. С появлением высокопроизводительных ЭВМ эта модель практически не применяется.

К. Лунгрен [8–10] была предложена так называемая фрикционная модель сцепления, построенная с применением упругопластических соотношений. В ней вводится специальный элемент связи, первоначально не имеющий размера, для которого зависимость между напряжениями и деформациями устанавливается соотношением

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} D_{11} & \frac{|g|}{g} D_{12} \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_r \\ g \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где g_r – радиальное смещение бетона в зоне контакта с арматурой; D_{ij} – коэффициенты матрицы жесткости. Коэффициент D_{12} имеет отрицательное значение, это приводит к тому, что при смещении арматуры относительно бетона элемент расширяется, таким образом, проскальзывание стержня в любом направлении вызывает сжимающие радиальные напряжения σ_r .

Предельное состояние этого элемента описывается функциями F_1 и F_2 . F_1 , так называемая функция трения, устанавливает связь между радиальными напряжениями σ_r и предельными касательными напряжениями по границе бетона и арматуры τ_{bs} , а функция F_2 определяет разрушение интерфейсного элемента в зависимости от смещения g :

$$\begin{aligned} F_1 &= |\tau_{bs}| + \mu \sigma_r = 0; \\ F_2 &= \tau_{bs}^2 + \sigma_r^2 + c_L \tau_{bs} = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где μ – коэффициент трения; c_L – параметр, определяемый по нисходящей ветви диа-

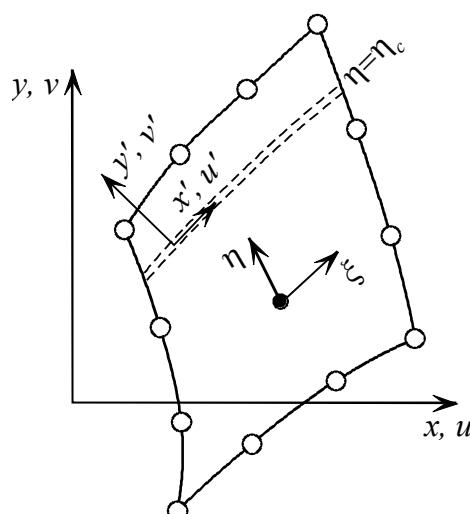


Рис. 3. Общий вид элемента бетона со встроенной арматурой

граммами деформирования бетона при одноосном сжатии. Замкнутая кривая предельного состояния контактного слоя, которую образуют эти функции, представлена на рис. 4.

Для F_1 и F_2 связь пластических деформаций и напряжений при выполнении условия (9) описывается неассоциированным и ассоциированным законами течения соответственно:

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^p = \lambda \frac{\partial G}{\partial S} \quad \text{и} \quad d\boldsymbol{\varepsilon}^p = \lambda \frac{\partial F_2}{\partial S},$$

а в точках пересечений функций F_1 и F_2 (см. рис. 4)

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^p = \lambda_1 \frac{\partial G}{\partial S} + \lambda_2 \frac{\partial F_2}{\partial S},$$

где G – функция нагружения или пластический потенциал:

$$G = \frac{|g|}{g} \tau_{bs} + \kappa \sigma_r = 0,$$

здесь κ – коэффициент упрочнения.

Коэффициент трения варьируется в диапазоне $0,4 \leq \mu \leq 1$. Параметр χ учитывает разрушение бетона ребрами арматуры, поэтому для монотонно возрастающей нагрузки считается постоянным, а при циклической нагрузке – переменным. Коэффициент матрицы жесткости D_{11} в уравнении (8) зависит от перемещений g_r , а коэффициенты D_{12} и D_{22} принимаются постоянными. Параметр c_L зависит от коэффициента упрочнения κ , который определяется по формуле

$$dk = \sqrt{(d\varepsilon_t^p)^2 + (d\varepsilon_r^p)^2}, \quad (10)$$

где ε_t^p и ε_r^p – условная относительная пластическая деформация бетона в зоне контакта параллельно и перпендикулярно арматуре соответственно.

В работе [24] представлена модификация этой модели, которая сглаживает зоны пересечения функций F_1 и F_2 , что устраняет некоторые неточности модели.

С одной стороны, обилие параметров модели позволяет с ее помощью воспроизводить деформирование железобетонных элементов в довольно широком диапазоне, в том числе с учетом циклического нагружения. С другой стороны, идентификация этих параметров затруднительна. Сравнение результатов расчета с опытными данными производилось авторами только на образцах с заделкой порядка нескольких сантиметров. Для расчетов реальных конструкций эта модель не использовалась.

Модели без специальных конечных элементов

Процессы, происходящие в области контакта арматуры с бетоном, можно моделировать и без использования специальных элементов.

Один из таких подходов представлен в работах [25, 26]. Пространство железобетона предложено моделировать тремя сплошными однородными телами с идеальным контактом: бетон 1, арматура 2 и контактный слой 3 (рис. 5). Геометрия арматуры, независимо от типа,

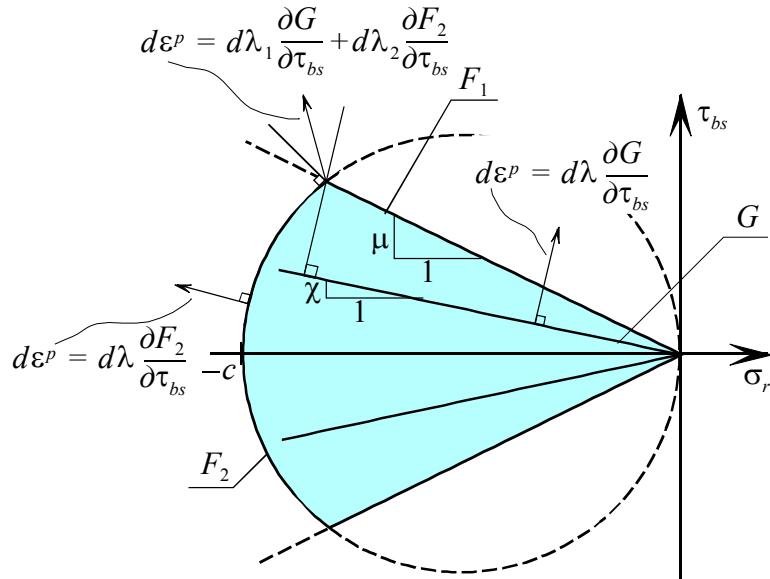


Рис. 4. Диаграмма предельных состояний интерфейсного элемента К. Лунгрен

упрощается до гладкого стержня. Переход всех слоев к неупругой стадии деформирования описывается с помощью известных критериев пластичности. Так, для арматуры и контактного слоя это критерий Хубера – Мизеса, а для бетона – Друкера – Прагера при простом напряженном состоянии бетона или Вилама – Варнке при сложном. С опорой на ТТС М. М. Холмянского [27] были получены соотношения для идентификации механических параметров контактного слоя:

$$k_{bs} = 0,638B; \quad (11)$$

$$E_{bs} = 2\alpha B(1+\nu)t_{bs}n,$$

где k_{bs} – напряжение, при котором начинается неупругое деформирование контактного слоя; E_{bs} – модуль упругости контактного слоя; B и α – параметры сцепления ТТС М. М. Холмянского; ν – коэффициент поперечной деформации; t_{bs} и n – толщина и коэффициент наполнения эпюры деформаций сдвига контактного слоя соответственно.

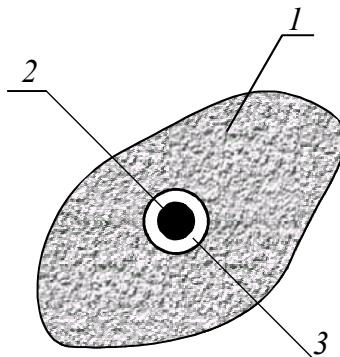


Рис. 5. Общий вид модели с контактным слоем конечного размера

Геометрические параметры КС t_{bs} и n были определены в результате исследования точности численного решения методом конечных элементов:

$$5t_{in} \leq t_{bs} < 0,05D_b;$$

$$0,0834d_a \leq t_{in} \leq 0,125d_a; \quad (12)$$

$$n = 0,78,$$

здесь t_{in} – радиальный размер конечного элемента КС; D_b – диаметр бетонной обоймы; d_a – диаметр арматурного стержня.

Используя эту методику, авторам удалось решить несколько прикладных задач механики железобетона: вытягивание стальной профилированной арматуры из бетона, расти-

жение центрально-армированной железобетонной призмы, предварительное напряжение бетонной обоймы канатом, изгиб железобетонной балки. Результаты численного моделирования по всем задачам были сверены с экспериментальными данными, можно отметить их хорошее соответствие.

Следует отметить, что предложенная модель воспроизводит деформирование железобетона в рабочем диапазоне, когда длина зоны нелинейного контактного взаимодействия меньше длины заделки арматуры в бетоне.

Другой способ КЭ-моделирования не предполагает геометрических и механических упрощений. Моделируется реальная геометрия арматуры. Деформирование бетона описывается с учетом процессов накопления повреждений, разрушения и пластичности. Применение таких моделей описано в работе [28]. Основной проблемой такого подхода является сложность идентификации параметров бетона для моделирования физически нелинейных процессов, происходящих в бетоне при совместном с арматурой деформировании.

Заключение

В работе проведен сравнительный анализ численных моделей, описывающих процессы сцепления в железобетоне. Рассматривалась численная реализация, основанная на методе конечных элементов. Выделена группа методов, в которых контактное взаимодействие бетона с арматурой моделировалось специально разработанными бесконечно малыми элементами связи различного типа. Такой подход к моделированию контакта широко распространен, а некоторые элементы связи добавлены в библиотеки известных расчетных комплексов. Отмечена и другая группа методов, где используется контактный слой конечного размера, механические характеристики которого отличаются от свойств бетона. При этом контактный слой моделируется стандартными изопараметрическими конечными элементами, а модель железобетона представляет собой сплошную неоднородную среду без разрывов в полях перемещений. Оба подхода были использованы для анализа НДС железобетонных конструкций.

Список источников

1. Попов А. М., Самошкин А. С., Тихомиров В. М. Методы исследования взаимодействия арматуры с бетоном. Часть 1. Экспериментальные и аналитические методы // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2. С. 53–60.
2. Ngo D., Scordelis A. C. Finite element analysis of reinforced concrete beams // ACI Journal Proceedings. 1967. Vol. 64, No. 3. P. 152–163.
3. Robins P. J. Reinforced concrete deep beams studied experimentally and by the finite element methods : thesis for the degree of doctor of philosophy. Nottingham : University of Nottingham, 1971. 258 p.
4. Labib F., Edwards A. D. An analytical investigation of cracking in concentric and eccentric reinforced concrete tension members // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1978. Vol. 65, No. 1. P. 53–70.
5. Scordelis A. C., Ngo D., Franklin H. A. Finite element study of reinforced concrete beams with diagonal tension cracks // Special Publication. 1974. Vol. 42. P. 79–102.
6. Nagatomo K., Kaku T. Experimental and analytical study on bond characteristics of reinforcing bars with only a single transverse rib // Transactions of the Japan Concrete Institute. 1985. Vol. 7. P. 333–340.
7. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения / А. В. Бенин, А. С. Семенов, С. Г. Семенов, Б. Е. Мельников // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5. С. 86–99.
8. Lundgren K., Gylltoft K. A model for the bond between concrete and reinforcement // Magazine of Concrete Research. 2000. Vol. 52, No. 1. P. 53–63.
9. Lundgren K. Three-dimensional modelling of bond in reinforced concrete theoretical model, experiments and applications : thesis for the degree of doctor of philosophy. Göteborg, Sweden : Chalmers University of Technology, 1999. 55 p.
10. Lundgren K. Modeling bond between corroded reinforcement and concrete // Fracture Mechanics of Concrete Structures. 2001. No. 1. P. 247–254.
11. Тихомиров В. М., Самошкин А. С. Математическая модель растяжения железобетонных элементов конструкций с учетом разрушения бетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 10/11. С. 13–21.
12. Nilson A. H. Nonlinear analysis of reinforced concrete by the finite element method // ACI Journal Proceedings. 1968. Vol. 65. P. 757–766.
13. Bresler B., Bertero V. V. Influence of load history on cracking in reinforced concrete. Berkeley, California, USA : Department of Civil Engineering; Division of Structural Engineering and Structural Mechanics; University of California, 1966. 20 p.
14. Mirza S. M., Houde J. Study of bond stress-slip relationships in reinforced concrete // ACI Journal Proceedings. 1979. Vol. 76. P. 19–46.
15. Allwood R. J. Reinforcement stresses in a reinforced concrete beam-column connection // Magazine of Concrete Research. 1980. Vol. 32, No. 112. P. 143–146.
16. Parsons S. D. Representation of bond in finite element analyses of reinforced concrete structures : thesis for the degree of doctor of philosophy. Loughborough : Loughborough University of Technology, 1984. 310 p.
17. Allwood R. J., Parsons S. D., Robins P. J. New bond model for reinforced concrete // Proc. Int. Conf. on Computer-Aided Analysis and Design of Concrete Structure. Split, Yugoslavia, 1984. P. 215–230.
18. ANSYS Mechanical APDL theory reference. Release 15.0. Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2013. 952 p.
19. Холмянский М. М. Контакт арматуры с бетоном. Москва : Стройиздат, 1981. 184 c.
20. Groot A. K. de, Kusters G. M. A., Monnier T. Numerical modelling of bond slip behaviour // Heron. 1981. Vol. 26, No. 1b. P. 89.
21. Keuser M., Mehlhorn G. Finite element models for bond problems // Journal of Structural Engineering. 1987. Vol. 113, No. 10. P. 2160–2173.
22. Yankelevsky D. Z. New finite element for bond-slip analysis // Journal of Structural engineering. 1985. Vol. 111, No. 7. P. 1533–1542.
23. Phillips D. V., Zienkiewicz O. C. Finite element non-linear analysis of concrete structures // Proceedings of Institution of Civil Engineers. 1976. Vol. 61. P. 59–88.
24. Grassl P., Davies T. Lattice modelling of corrosion induced cracking and bond in reinforced concrete // Cement and Concrete Composites. 2011. Vol. 33, No. 9. P. 918–924.
25. Самошкин А. С., Тихомиров В. М. Математическая модель деформирования железобетона с учетом контактного взаимодействия его структурных компонентов // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22. Спецвыпуск 1. С. 75–86.

26. Тихомиров В. М., Самошкин А. С. Исследование взаимодействия арматуры с бетоном численными методами // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59, № 1. С. 195–203.
27. Холмянский М. М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность. Москва : Стройиздат, 1997. 576 с.
28. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учета несплошности соединения / А. В. Бенин, А. С. Семенов, С. Г. Семенов, Б. Е. Мельников // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 1. С. 23–40.

References

1. Popov A. M., Samoshkin A. S., Tikhomirov V. M. Research methods of reinforcement with concrete interaction. Part 1. Experimental and analytical methods. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(2):53–60. (In Russ.).
2. Ngo D., Scordelis A. C. Finite element analysis of reinforced concrete beams. *ACI Journal Proceedings*. 1967;64(3):152–163.
3. Robins P. J. Reinforced concrete deep beams studied experimentally and by the finite element methods: thesis for the degree of doctor of philosophy. Nottingham: University of Nottingham; 1971. 258 p.
4. Labib F., Edwards A. D. An analytical investigation of cracking in concentric and eccentric reinforced concrete tension members. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1978;65(1):53–70.
5. Scordelis A. C., Ngo D., Franklin H. A. Finite element study of reinforced concrete beams with diagonal tension cracks. *Special Publication*. 1974;(42):79–102.
6. Nagatomo K., Kaku T. Experimental and analytical study on bond characteristics of reinforcing bars with only a single transverse rib. *Transactions of the Japan Concrete Institute*. 1985;(7):333–340.
7. Benin A. V., Semenov A. S., Semenov S. G., Melnikov B. E. Simulation of degradation of bond between reinforcing bar and concrete. Part 1. Models with account of the discontinuity. *Magazine of Civil Engineering*. 2013;(5):86–99. (In Russ.).
8. Lundgren K., Gylltoft K. A model for the bond between concrete and reinforcement. *Magazine of Concrete Research*. 2000;52(1):53–63.
9. Lundgren K. Three-dimensional modelling of bond in reinforced concrete theoretical model, experiments and applications: Thesis for the degree of doctor of philosophy. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology; 1999. 55 p.
10. Lundgren K. Modeling bond between corroded reinforcement and concrete. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*. 2001;(1):247–254.
11. Tikhomirov V. M., Samoshkin A. S. Mathematical model of reinforced concrete structural elements tension with regard to fracture of concrete. *News of higher educational institutions. Construction*. 2016;10/11:13–21. (In Russ.).
12. Nilson A. H. Nonlinear analysis of reinforced concrete by the finite element method. *ACI Journal Proceedings*. 1968;65:757–766.
13. Bresler B., Bertero V. V. Influence of load history on cracking in reinforced concrete. Berkeley, California, USA: Department of Civil Engineering, Division of Structural Engineering and Structural Mechanics, University of California; 1966. 20 p.
14. Mirza S. M., Houde J. Study of bond stress-slip relationships in reinforced concrete. *ACI Journal proceedings*. 1979;76:19–46.
15. Allwood R. J. Reinforcement stresses in a reinforced concrete beam-column connection. *Magazine of Concrete Research*. 1980;32(112):143–146.
16. Parsons S. D. Representation of bond in finite element analyses of reinforced concrete structures: thesis for the degree of doctor of philosophy. Loughborough: Loughborough University of Technology; 1984. 310 p.
17. Allwood R. J., Parsons S. D., Robins P. J. New bond model for reinforced concrete. *Proc. Int. Conf. on Computer-Aided Analysis and Design of Concrete Structure*. Split, Yugoslavia; 1984. P. 215–230.
18. ANSYS Mechanical APDL theory reference. Release 15.0. Canonsburg, Pennsylvania, USA; 2013. 952 p.
19. Kholmyanskiy M. M. Contacts of reinforcement with concrete. Moscow: Stroizdat; 1981. 184 p. (In Russ.).
20. Groot A. K. de, Kusters G. M. A., Monnier T. Numerical modelling of bond slip behaviour. *Heron*. 1981;26(1b):89.
21. Keuser M., Mehlhorn G. Finite element models for bond problems. *Journal of Structural Engineering*. 1987;113(10):2160–2173.
22. Yankelevsky D. Z. New finite element for bond-slip analysis. *Journal of Structural Engineering*. 1985;111(7):1533–1542.

23. Phillips D. V., Zienkiewicz O. C. Finite element non-linear analysis of concrete structures. *Proceedings of Institution of Civil Engineers*. 1976;(61):59–88.
24. Grassl P., Davies T. Lattice modelling of corrosion induced cracking and bond in reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2011;33(9):918–924.
25. Samoshkin A. S., Tikhomirov V. M. Mathematical model of reinforced concrete deformation with considering contact interaction of its structural components. *Computational Technologies*. 2017;22(1):75–86. (In Russ.).
26. Tikhomirov V. M., Samoshkin A. S. Study of Interaction of Reinforcement with Concrete by Numerical Methods. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2018;59(1):168–175. (In Russ.).
27. Kholmyanskiy M. M. Concrete and Reinforced Concrete. Deformability and Strength. Moscow: Stroyizdat; 1997. 576 p. (In Russ.).
28. Benin A. V., Semenov A. S., Semenov S. G., Melnikov B. E. The Simulation of Bond Fracture between Reinforcing Bars and concrete. Part 2. Models without taking the Bond Discontinuity into account. *Magazine of Civil Engineering*. 2014;(1):23–40. (In Russ.).

Информация об авторах

А. М. Попов – заведующий кафедрой «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.

А. С. Самошкин – доцент кафедры «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

В. М. Тихомиров – профессор кафедры «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, доцент.

Information about the authors

A. M. Popov – Head of the Structural Theoretical Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.

A. S. Samoshkin – Associate Professor of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

V. M. Tikhomirov – Professor of the Structural Mechanics Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Associate Professor.

Статья поступила в редакцию 28.12.2022; одобрена после рецензирования 06.02.2023; принята к публикации 07.02.2023.

The article was submitted 28.12.2022; approved after reviewing 06.02.2023; accepted for publication 07.02.2023.

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 (границы 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: vestnik.stu@yandex.ru.
7. В редакцию представляются 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



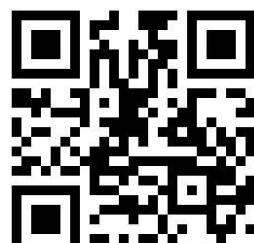
vestnik.stu@yandex.ru



+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*
Редакторы: *Е. Е. Рыжкова, А. О. Елесина, Ю. В. Печенкина*
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: vestnik.stu@yandex.ru

Адрес издателя

630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Телефон/факс: (383) 328-03-81.
E-mail: bvu@stu.ru

Подписано в печать 27.03.2023. Дата выхода в свет 30.03.2023

Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 14,0 уч.-изд. л., 15,0 усл.-печ. л. Заказ № 3804

Цена свободная

Отпечатано в издательстве СГУПС.
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
Тел. (383) 328-03-81; e-mail: bvu@stu.ru



Изательство Сибирского государственного
университета путей сообщения

ISSN 1815-9265
Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения
2023, № 1 (64), 1-120