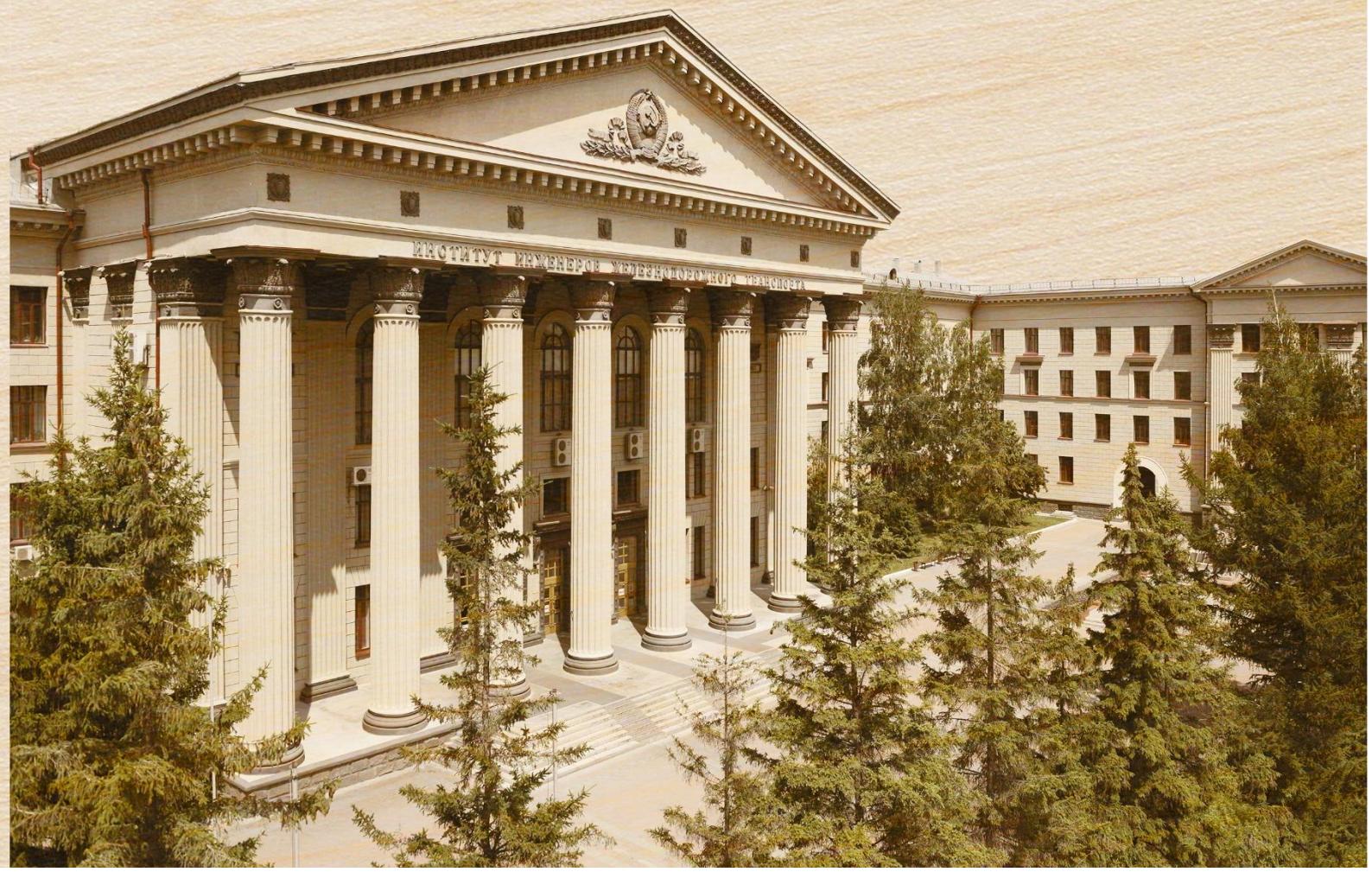


ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 5 (72). 2024 16+



УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

Галай Марина Сергеевна – канд. техн. наук

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

Редактор Е. Е. Рыжкова

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

Макет, верстка Ю. В. Борцовой

Дизайн обложки А. С. Петренко

Сайт журнала:

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

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

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

FOUNDER

The Siberian Transport University

Editors and Editorial Board

Editor-in-Chief

A. L. Manakov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

A. D. Abramov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

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

Executive Secretary

M. S. Galay, Candidate of Engineering

Editors

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

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

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

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

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

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

A. S. Ilinskyh, 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

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 Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg

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

English Text Reviewer

I. Stepachkova, Senior Lecturer

Text Reviewer E. E. Ryzhkova

Managing Editor A. A. Igumnov, Candidate of Engineering

Layout Designer Yu. V. Bortsova

Cover Designer A. S. Petrenko

Main contact details

Siberian Transport University

room 307, 191, Dusi Kovalchuk St.

630049, Novosibirsk, Russia

Phone: (383) 328-04-36

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

E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

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

ISSN: 1815-9265

**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, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям 2.9 «Транспорт» и 2.1 «Строительство и архитектура»

№ 5 (72) · 2024 · ОКТЯБРЬ – ДЕКАБРЬ · 16+

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

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

<i>Масловец А. С., Величко Д. В., Корягин М. Е.</i> Влияние эксплуатационных условий Среднесибирской магистрали на интенсивность отказов рельсов.....	5
<i>Медведев В. И., Сурков М. Д.</i> Разработка программы предупреждения террористических угроз с применением опасных грузов для защиты железных дорог и критически важных объектов транспортной инфраструктуры на основе анализа деструктивных событий	15
<i>Разуваев Д. А., Ашпиз Е. С.</i> Криогенные проблемы эксплуатируемых железнодорожных насыпей восточного участка БАМа и сценарии развития деформаций.....	22
<i>Чеботарева Е. А., Богачев В. А., Богачев Т. В.</i> Устойчивость решений автономных систем дифференциальных уравнений в изучении систем управления вагонопотоками в адрес припортовых железнодорожных станций	35
<i>Павлова В. Л., Калиниченко Е. А., Пирумова И. В., Селюнин И. А.</i> Затухание шума на территории жилой застройки вблизи станции И при различных атмосферных состояниях	45
<i>Воробьев В. С., Яньшина И. В.</i> Графические модели управления организационно-технологическими процессами содержания и ремонта линейно-рассредоточенных объектов	52
<i>Бессоненко С. А., Климов А. А.</i> Корректировка продольного профиля путей подгорочного парка на основе оценки скорости движения отцепов	58
<i>Тесленко И. О., Гришикова Д. Ю., Ольховиков С. Э.</i> Оценка возможности формирования поездов весом 7 100 т с массовым грузом на углепогрузочной станции П	65

Строительство и архитектура

<i>Корнеева И. Г., Пинус Б. И.</i> Энергетические аспекты малоцикловой усталости обычных и фиброармированных бетонов	72
<i>Карюкин М. А., Величко Д. В.</i> Многовариантное моделирование параметров конструкции упругих клемм в виде пружины кручения, с анализом их напряженно-деформированного состояния	80
<i>Попов А. М., Тихомиров В. М., Зиновьев В. Б.</i> Определение углов наклона поверхности тонких пластин методом голограммического муара	90
<i>Карелина Е. Л.</i> Анализ физико-механических характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог в зонах расположения железобетонных водопропускных труб	97
<i>Щербаков В. В., Бунцев И. А., Щербаков И. В., Акимов С. С., Тимофеев Е. Н.</i> Система мобильного лазерного сканирования для железных и автомобильных дорог	106

The Siberian Transport University Bulletin

A scientific journal

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

Nº 5 (72) · 2024 · October – December · 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

<i>A. S. Maslovets, D. V. Velichko, M. E. Koryagin.</i> Influence of the operating conditions of the Middle Siberian Railway on the intensity of rail failures	5
<i>V. I. Medvedev, M. D. Surkov.</i> Development of a program to prevent terrorist threats involving dangerous goods, to protect railways and critical transport infrastructure facilities based on the analysis of destructive events	15
<i>D. A. Razuvayev, E. S. Ashpiz.</i> Cryogenic issues of operating railway embankments in the eastern section of the Baikal-Amur Mainline and deformation development scenarios....	22
<i>E. A. Chebotareva, V. A. Bogachev, T. V. Bogachev.</i> Solutions stability of autonomous systems of differential equations in research of wagon flow control systems for the movement of wagons to port railway stations	35
<i>V. L. Pavlova, E. A. Kalinichenko, I. V. Pirumova, I. A. Selyunin.</i> Noise attenuation in residential areas near the station and under various atmospheric conditions	45
<i>V. S. Vorobyov, I. V. Yanshina.</i> Graphical models for managing organizational and technological processes of maintenance and repair of linearly dispersed objects	52
<i>S. A. Bessonenko, A. A. Klimov.</i> Adjustment of the longitudinal profile of the summit yard tracks based on the assessment of the cuts movement speed	58
<i>I. O. Teslenko, D. Yu. Grishkova, S. E. Olkhovikov.</i> Assessment of the possibility of forming trains weighing 7,100 tons with a mass load at the coal loading station P	65

Building and Architecture

<i>I. G. Korneeva, B. I. Pinus.</i> Energy aspects of low cycle fatigue of conventional and fiber reinforced concrete	72
<i>M. A. Karyukin, D. V. Velichko.</i> Multivariate modeling of design parameters of elastic terminals in the form of a torsion spring, with the analysis of their stress-strain state	80
<i>A. M. Popov, V. M. Tikhomirov, V. B. Zinovyev.</i> Determination of surface inclination angles of thin plates by holographic moiré method.....	90
<i>E. L. Karelina.</i> Analysis of the physical and mechanical characteristics of the roadbed soils in the areas of reinforced concrete culverts.....	97
<i>V. V. Shcherbakov, I. A. Buntsev, I. V. Shcherbakov, S. S. Akimov, E. N. Timofeev.</i> Mobile laser scanning system for railways and highways	106

ТРАНСПОРТ

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 5–14.
The Siberian Transport University Bulletin. 2024. No. 5 (72). P. 5–14.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 625.172

doi 10.52170/1815-9265_2024_72_5

Влияние эксплуатационных условий Среднесибирской магистрали на интенсивность отказов рельсов

Александр Сергеевич Масловец^{1✉}, Дмитрий Валерьевич Величко²,
Марк Евгеньевич Корягин³

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

¹ fvfckjdtw@mail.ru[✉]

² vdv.nsk@mail.ru

³ math@stu.ru

Аннотация. В статье выполнена оценка интенсивности отказов рельсов на участках Среднесибирской магистрали (на примере Кр и Км дистанций пути). Проведен анализ отказов рельсов в зависимости от пропущенного тоннажа, параметров плана и профиля. Рассмотрены математические модели количества отказов рельсов по I и II путям в зависимости от пропущенного тоннажа, средневзвешенного уклона, средневзвешенного радиуса и доли кривых.

Определено влияние пропущенного тоннажа на количество отказов рельсов: по I пути при увеличении тоннажа от 100 до 1 400 млн т среднее количество отказов рельсов увеличивается с 0 до 24 шт./км, по II пути при тоннаже от 100 до 700 шт./км – с 0 до 1,8 шт./км. Однако на протяжении всего срока эксплуатации наблюдается повышение интенсивности роста отказов рельсов от 0,7 до 4,3 шт./км на 100 млн т в зависимости от интервала тоннажа.

Определено влияние конструктивных параметров плана и профиля пути Среднесибирской магистрали (доли кривых, среднего радиуса, среднего продольного уклона) на отказы рельсов. Зависимость количества отказов рельсов по I пути от доли кривых: интенсивность количества отказов рельсов составляет 2,9 шт./км в среднем на каждые 10 % доли кривых. Влияние средневзвешенного радиуса: при уменьшении радиуса кривой с 3 000 до 1 100 м (на примере уровня наработки тоннажа в 1 000 млн т) количество отказов рельсов увеличивается в 3,5 раза (с 4 до 14 шт./км). Влияние средневзвешенного уклона: при увеличении уклона с 1,5 до 3 % при тоннаже в 900 млн т, количество отказов рельсов увеличивается в 3 раза (с 4 до 12 шт./км).

Проведен корреляционно-регрессионный анализ количества отказов рельсов в зависимости от пропущенного тоннажа и параметров плана и профиля пути.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельсы, отказы рельсов, пропущенный тоннаж, доля кривых, средневзвешенный радиус, средневзвешенный уклон, корреляционно-регрессионный анализ

Для цитирования: Масловец А. С., Величко Д. В., Корягин М. Е. Влияние эксплуатационных условий Среднесибирской магистрали на интенсивность отказов рельсов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 5–14. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_5.

TRANSPORT

Original article

Influence of the operating conditions of the Middle Siberian Railway on the intensity of rail failures

Alexander S. Maslovets^{1✉}, Dmitriy V. Velichko², Mark E. Koryagin³

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

¹ fvfckjdtw@mail.ru[✉]

² vdv.nsk@mail.ru

³ math@stu.ru

Abstract. The article estimates the intensity of rail failures on the sections of the Middle Siberian Railway (on the example of Kr and Km track distances). The analysis of rail failures depending on the passed tonnage, plan and profile parameters is carried out. Mathematical models of rail yield on I and II tracks depending on the missed tonnage, weighted average gradient, weighted average radius and curve share are considered.

The influence of the passed tonnage on the rail output has been determined: on I track at tonnage increase from 100 to 1400 million tons the average value of rail outputs increases from 0 to 24 pcs./km, on II track – at tonnages from 100 to 700 pcs./km the average number of rail outputs increases from 0 to 1,8 pcs./km. However, during the whole operation period there is an accelerating intensity of rail failures growth from 0,7 to 4,3 pcs./km per 100 million tons depending on the tonnage interval.

The influence of operational parameters of the plan and profile of the track of the Central Siberian mainline (the share of curves, average radius, average longitudinal slope) on rail failures has been determined. Dependence of rail failures on I track: on the share of curves – intensity of rail failures is 2,9 pcs/km on average for every 10 % of curve share. Influence of weighted average radius – when reducing the curve radius from 3 000 to 1 100 m on the example of tonnage level of 1 000 million tons, the rail output increases 3.5 times (from 4 to 14 pcs./km). Influence of weighted average gradient – when the gradient increases from 1,5 to 3 % at the tonnage of 900 million tons, the rail yield increases 3 times (from 4 to 12 pcs./km).

The correlation-regression analysis of rail yields from missed tonnage and parameters of track plan and profile has been carried out.

Keywords: railroad track, rails, rail yield, missed tonnage, curve fraction, weighted average radius, weighted average gradient, correlation and regression analysis

For citation: Maslovets A. S., Velichko D. V., Koryagin M. E. Influence of the operating conditions of the Middle Siberian Railway on the intensity of rail failures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):5–14. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_5.

Введение

Оценка и снижение величины и интенсивности отказов рельсов продолжает оставаться одной из актуальных задач, стоящих перед ОАО «РЖД» [1–3], особенно для сложных эксплуатационных условий Сибири [4–6].

Одним из наиболее грузонапряженных участков отечественных железных дорог является Среднесибирская магистраль (Средсиб). В связи с чем практический интерес представляет выявление степени влияния существующих эксплуатационных и конструктивных параметров плана и профиля пути Среднесибирской магистрали (пропущенного сверхнормативного тоннажа, доли кривых, среднего радиуса, среднего продольного уклона) на отказы рельсов. Проведение подобных исследований [7–10] направлено на оценку состояния рельсового хозяйства, своевременное прогнозирование и снижение его отказов.

Материалы и методы исследования

Для оценки дефектности рельсов рассматривается 31 опытный участок по I пути и 18 опытных участков по II пути Средсиба. Грузонапряженность по I пути составляет 127,1 млн т·км бр./км в год, по II пути – 48,2 млн т·км бр./км в год. На всех опытных участках лежат рельсы Р65.

Номер участка включает в себя четыре цифры, первая из которых показывает номер пути, вторая – номер данного участка на этом пути, третья – межремонтный период, четвертая – принадлежность участка к дистанции:

1 – Кр, 2 – Км. Характеристики участков представлены в табл. 1.

Анализируемые данные о количестве отказов рельсов взяты из пятой таблицы технического паспорта дистанций пути.

При обработке и интерпретации результатов использовались корреляционный и регрессионный анализ.

Результаты исследования

Влияние пропущенного тоннажа на количество отказов рельсов по I и II путям представлено на рис. 1.

На участках I пути до достижения пропущенного тоннажа 700 млн т идет плавное нарастание количества отказов рельсов (интенсивность 0,7 шт./км на 100 млн т). Однако при пропущенном тоннаже более 700 млн т заметно резкое увеличение количества отказов рельсов (интенсивность 1,8 шт./км на 100 млн т); так, при тоннаже 1 000 млн т разброс отказов рельсов составляет 2,5–17,5 шт./км при среднем значении 6,1 шт./км. Дальнейшая наработка тоннажа ведет к быстрому росту количества отказов рельсов; так, при тоннаже в 1 400 млн т разброс отказов рельсов составляет 11,2–38 шт./км при среднем значении 23,2 шт./км (интенсивность 4,3 шт./км на 100 млн т).

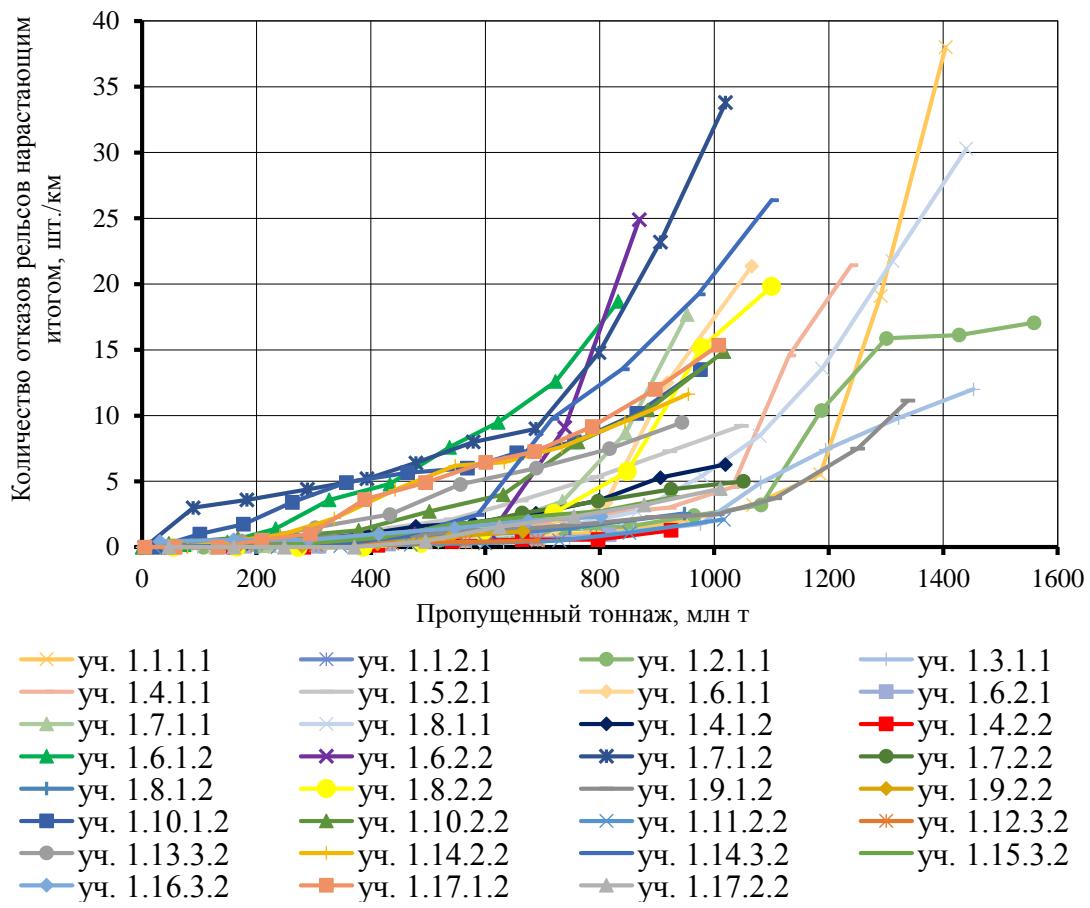
На участках II пути количество отказов рельсов сначала растет плавно, без резких скачков, но при тоннаже 300 млн т среднее количество отказов рельсов составляет 0,3 шт./км, а при достижении 600 млн т – 1,5 шт./км (интенсивность 0,4 шт./км на 100 млн т).

Таблица 1

Общая характеристика опытных участков (перегонов)

Номер участка	Класс, специализация	Установленная скорость, км/ч	Максимальный пропущенный тоннаж, млн т	Срок службы, год	Изготовитель рельсов, год укладки	Длина участка, км	Средневзвешенный уклон, %	Средневзвешенный радиус, м	Доля кривых, %	Максимальное количество отказов рельсов, шт./км
<i>I путь</i>										
1.1.1.1	O1	120/80	1 404,4	14	K03	9	1,035	—	—	38,000
1.1.2.1	O1	120/80	793,9	7	K17	9	1,035	—	—	1,667
1.2.1.1	O1	120/80	1 559,1	15	K04	15	0,924	3 376,00	2,119	17,067
1.3.1.1	O1	120/80	1 453,1	14	K05	31	0,597	3 934,08	3,766	12,000
1.4.1.1	O1	120/80	1 238,9	14	K03	7	1,115	2 612,00	3,872	21,429
1.5.2.1	O1	100/80	1 047,8	9	K15	27	1,187	968,02	14,315	9,222
1.6.1.1	O1	100/80	1 275,7	13	K04	16	1,598	3 461,43	1,025	78,063
1.6.2.1	O1	100/80	816,5	7	K17	16	1,598	3 461,43	1,025	0,938
1.7.1.1	O1	120/80	952,3	11	K03	16	1,920	3 643,13	2,038	17,688
1.8.1.1	O1	120/80	1 440,3	14	K05	17	1,489	3 125,93	7,686	30,294
1.4.1.2	O1	120/80	1 019,6	10	K10	7	1,689	2 227,94	7,829	6,300
1.4.2.2	O1	120/80	924,4	8	K15	7	1,689	2 227,94	7,829	1,300
1.6.1.2	O1	120/80	832,3	10	K02	10	1,083	4 723,89	2,820	18,700
1.6.2.2	O1	120/80	1 123,5	10	T12	10	1,422	1 065,00	3,950	73,300
1.7.1.2	O1	120/80	1 019,6	11	K04	5	3,728	3 003,00	2,140	33,800
1.7.2.2	O1	120/80	1 051,0	9	K15	8	3,594	3 003,00	1,338	5,000
1.8.1.2	O1	120/80	948,2	11	K00	16	2,808	2 483,12	17,094	2,563
1.8.2.2	O1	120/80	1 100,4	10	K11	17	2,630	3 467,21	9,988	19,824
1.9.1.2	O1	100/80	1 338,3	14	K04	14	3,369	1 740,00	35,593	11,143
1.9.2.2	O1	100/80	665,8	6	K18	22	3,014	1 329,27	42,395	1,211
1.10.1.2	O1	100/80	975,8	11	K02	12	2,219	2 368,71	21,942	13,500
1.10.2.2	O1	100/80	1 016,7	9	K13	7	1,494	—	—	14,857
1.11.2.2	O1	100/80	1 016,7	9	Я13	10	1,942	2 368,71	26,330	2,100
1.12.3.2	O1	100/80	691,9	6	K18	28	1,276	1 289,00	0,261	0,500
1.13.3.2	O1	120/80	943,7	8	K16	31	1,496	2 644,78	15,426	9,484
1.14.2.2	O1	120/80	1 100,4	10	T13	13	0,925	3 025,82	5,554	26,385
1.14.3.2	O1	120/80	954,9	11	K02	11	1,091	3 025,82	6,564	11,363
1.15.3.2	O1	120/90	929,8	8	K15	11	0,726	—	—	3,818
1.16.3.2	O1	120/90	801,8	7	K17	9	1,956	1 994,83	28,544	2,333
1.17.1.2	O1	100/80	1 008,1	12	K01	11	3,039	1 110,50	9,600	15,364
1.17.2.2	O1	100/80	1 010,5	9	Я13	9	3,039	1 110,50	9,600	4,444
<i>II путь</i>										
2.1.1.1	O1	120/80	846,8	22	K02	25	0,971	3 339,00	1,032	3,520
2.2.1.1	O1	120/80	729,7	18	K06	18	0,573	—	—	1,722
2.3.1.1	O1	120/80	745,3	18	K06	13	0,383	3 773,33	6,477	1,077
2.4.1.1	O1	120/80	534,8	13	K11	6	1,041	2 677,00	3,786	1,000
2.5.1.1	O1	100/80	688,4	17	K07	13	0,726	3 547,16	30,613	2,615
2.6.1.1	O1	120/80	598,2	14	K10	13	1,510	1 347,33	10,964	2,923
2.7.1.1	O1	120/80	649,9	16	K08	16	1,339	3 666,42	3,418	1,313
2.8.1.1	O1	120/80	763,8	18	K06	21	1,759	6 492,65	1,829	3,333
2.9.1.1	O1	120/80	597,5	14	K10	12	1,496	4 115,75	9,858	0,750
2.10.1.1	O1	120/80	557,8	13	K11	8	1,469	2 051,00	7,838	0,500
2.3.1.2	O1	100/80	666,6	16	K08	10	3,528	1 286,79	37,710	3,300
2.4.1.2	O1	120/80	599,9	14	K10	51	2,151	2 695,59	9,700	2,898
2.8.1.2	O1	120/80	704,2	16	K08	20	2,475	3 000,73	15,043	1,524
2.9.1.2	O1	100/80	743,6	17	K07	19	3,051	1 576,39	37,484	2,684
2.10.1.2	O1	120/80	563,8	13	K11	23	2,058	1 702,91	20,533	0,869
2.12.1.2	O1	100/80	746,5	18	K06	28	1,275	1 333,00	0,311	1,393
2.13.1.2	O1	100/80	594,4	14	K10	31	1,470	2 614,43	13,987	1,516
2.15.1.2	O1	100/80	654,4	16	K08	20	1,763	2 448,57	1,200	2,000

a)



б)

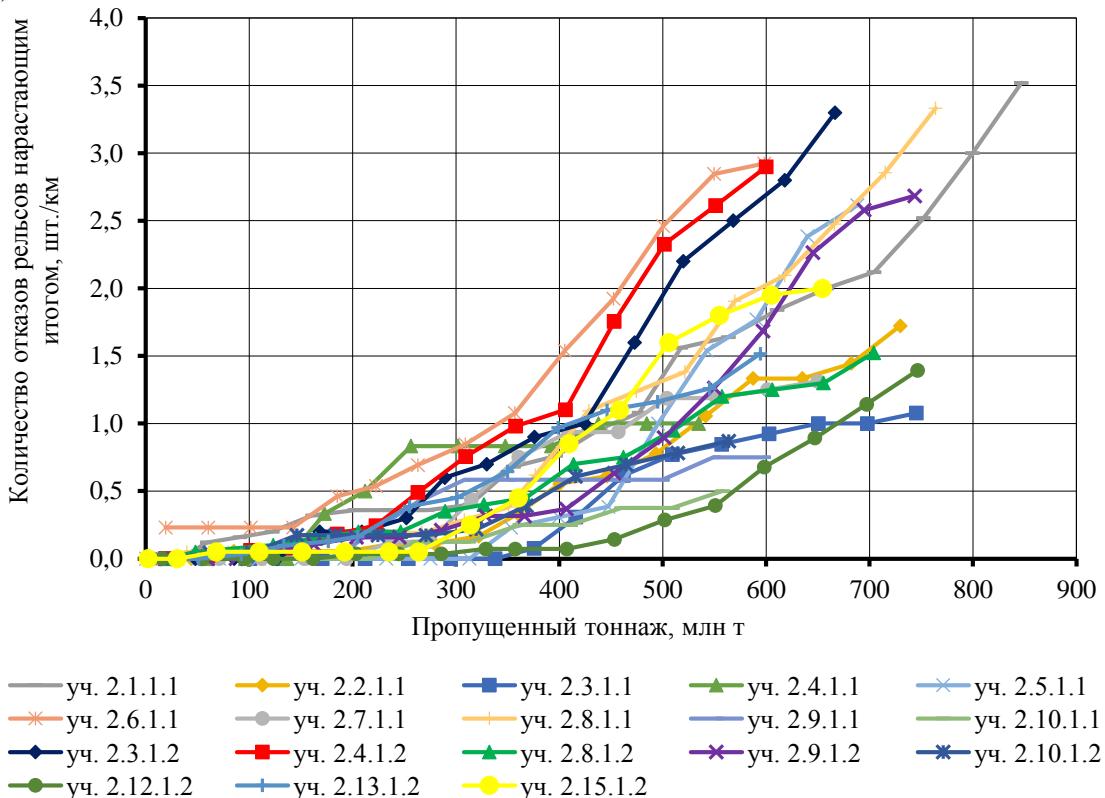


Рис. 1. Влияние пропущенного тоннажа на количество отказов рельсов:
а – I путь; *б* – II путь

На рис. 2 хорошо заметна прямая зависимость количества отказов рельсов от доли кривых: чем больше доля кривых, тем больше количество отказов рельсов. Зависимость от доли кривых: по I пути при увеличении доли с 2 до 22 %, например при наработке тоннажа в 900 млн т, количество отказов рельсов увеличивается с 4 до 11 шт./км. Интенсивность количества отказов рельсов составляет 2,9 шт./км в среднем на каждые 10 % доли кривых. Можно заметить, что для тоннажа более 1 000 млн т интенсивность количества отказов рельсов резко увеличивается до 5–18 шт./км на каждые 10 % доли кривых.

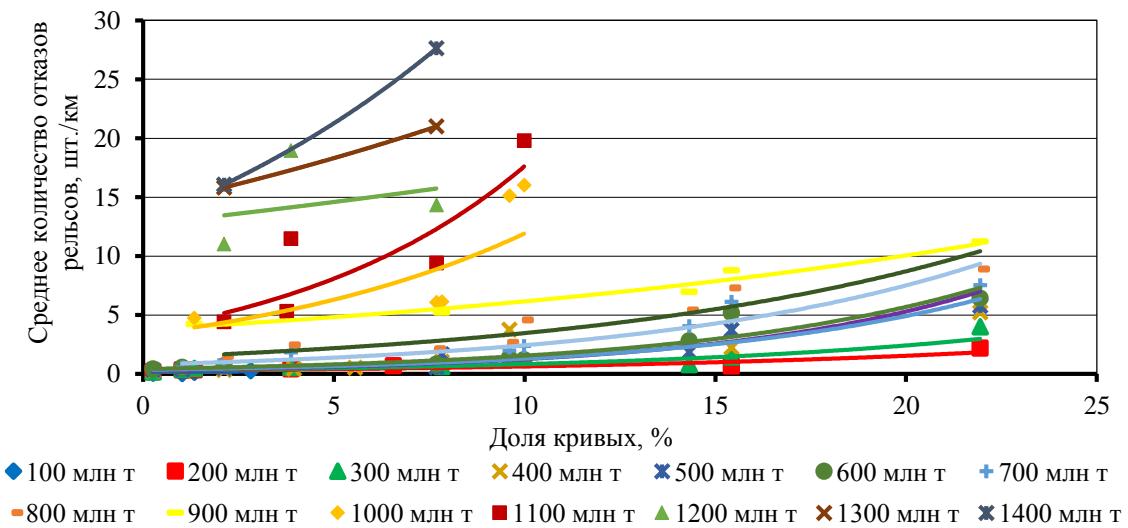


Рис. 2. Влияние доли кривых на количество отказов рельсов (I путь)

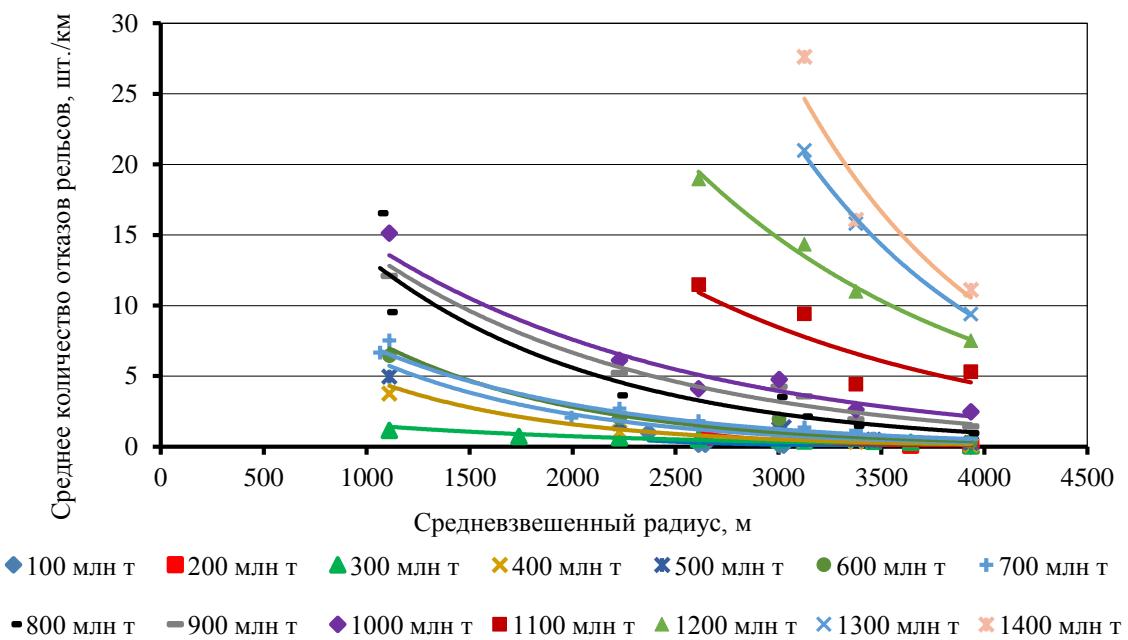


Рис. 3. Влияние средневзвешенного радиуса на количество отказов рельсов (I путь)

На графике зависимости количества отказов рельсов от средневзвешенного радиуса наблюдается обратная зависимость: чем меньше радиус кривой, тем больше количество отказов рельсов (рис. 3). По I пути при уменьшении радиуса кривой с 3 000 до 1 100 м на примере уровня наработки тоннажа в 1 000 млн т, количество отказов рельсов увеличивается с 4 до 14 шт./км.

По рис. 4 хорошо заметна зависимость количества отказов рельсов от средневзвешенного уклона. Так, при пропущенном тоннаже 900 млн т и при уклоне 1,5 % количество отказов рельсов составляет 4 шт./км, а при

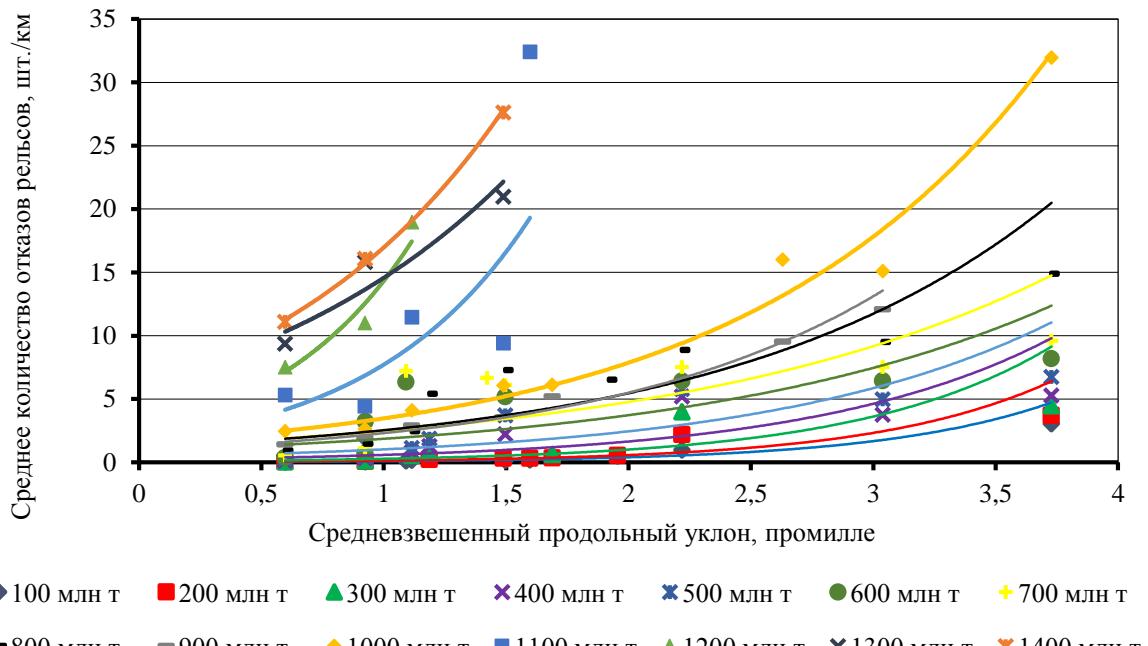


Рис. 4. Влияние средневзвешенного уклона на количество отказов рельсов (I путь)

Таблица 2

Коэффициенты корреляции для участков

Путь	Количество отказов рельсов	Средневзвешенный уклон	Средневзвешенный радиус	Доля кривых	Пропущенный тоннаж
I	1	-0,004	0,066	-0,162	0,624
II	1	0,178	0,057	0,075	0,815

уклоне 3 % – 12 шт./км. При наработке пропущенного тоннажа 1 300–1 400 млн т и при средневзвешенном уклоне 1,5 % количество отказов рельсов равно 21–26 шт./км.

По табл. 2 (для участков I пути) видно, что количество отказов рельсов больше всего зависит от пропущенного тоннажа, коэффициент корреляции равен 0,624, а также заметна небольшая обратная зависимость от доли кривых, коэффициент –0,162.

По табл. 2 (для участков II пути) также заметна большая зависимость количества отказов рельсов от пропущенного тоннажа, коэффициент корреляции 0,815.

По графикам зависимости количества отказов рельсов от пропущенного тоннажа (см. рис. 1) хорошо прослеживается зависимость, близкая к экспоненциальной. В регрессионном анализе используется нелинейная модель в виде суммы, которая включает в себя совокупность стандартных зависимостей, таких как линейная, параболическая, гиперболическая и экспоненциальная [11].

Переменные признаки-факторы будут заменены на X_i , тогда средневзвешенный уклон – X_1 , средневзвешенный радиус – X_2 , доля кривых – X_3 , пропущенный тоннаж – X_4 , а количество отказов рельсов будет заменено на Y .

Расчетная формула количества отказов рельсов Y_X в общем виде будет выглядеть так:

$$\begin{aligned}
 Y_X = & a_0 + \underbrace{a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_4 \cdot X_4}_{1} \\
 & + \underbrace{a_5 \cdot X_1^2 + a_6 \cdot X_2^2 + a_7 \cdot X_3^2 + a_8 \cdot X_4^2}_{2} + \\
 & + \underbrace{a_9 \cdot X_1 X_2 + a_{10} \cdot X_1 X_3 + a_{11} \cdot X_1 X_4 + a_{12} \cdot X_2 X_3}_{3} + \\
 & + \underbrace{a_{13} \cdot X_2 X_4 + a_{14} \cdot X_3 X_4}_{4} + \underbrace{\frac{a_{15}}{X_1} + \frac{a_{16}}{X_2} + \frac{a_{17}}{X_3} + \frac{a_{18}}{X_4}}_{5} + \\
 & + a_{19} \cdot e^{0,005 \cdot X_4}.
 \end{aligned}$$

Участки пути, на которых отсутствуют кривые, в анализе не учитываются.

После проведения регрессионного анализа с первой частью уравнения (блоком 1) и добавления в уравнение последующих блоков было выбрано уравнение со всеми пятью блоками, так как погрешности у такого уравнения оказались минимальны, а коэффициент детер-

миации максимальный. Статистические характеристики для каждого варианта уравнения по I пути представлены в табл. 3.

Рассматривая графики зависимости количества отказов рельсов от пропущенного тоннажа (см. рис. 1), можно заметить, что на начальном этапе службы (в интервале 100–200 млн т) количество отказов рельсов распре-

деляется в определенной степени хаотично, в связи с этим регрессионный анализ проводится для двух интервалов пропущенного тоннажа: 100–1 400 и 300–1 400 млн т. В результате проведения анализа были рассчитаны значения параметров регрессионного анализа (табл. 4), а также коэффициенты детерминации и погрешности (табл. 5).

Таблица 3

Значения статистических параметров

Статистическая характеристика	Номера блоков, входящих в уравнение				
	1	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5
R^2	0,45	0,46	0,53	0,58	0,58
ε_{cp} , %	111,95	397,24	281,67	133,49	122,99
ε_{min} , %	0,38	0,11	0,43	0,93	0,77
ε_{max} , %	2 406,13	46 347,20	12 615,09	1 827,94	1 712,41

Таблица 4

Значения параметров регрессионного анализа по I и II пути

Параметр	Тоннаж 100–1 400 млн т		Тоннаж 300–1 400 млн т	
	Номер пути			
	I	II	I	II
a_0	35,53	0,52	52,86	-29,72
a_1	-10,68	-2,92	-29,06	-2,90
a_2	$-94,00 \cdot 10^4$	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$-25,00 \cdot 10^4$	$1,63 \cdot 10^{-3}$
a_3	0,17	0,13	-0,45	0,14
a_4	-0,02	$-6,18 \cdot 10^{-3}$	-0,03	$72,79 \cdot 10^{-3}$
a_5	1,55	0,71	4,85	0,80
a_6	$1,60 \cdot 10^{-6}$	$-1,75 \cdot 10^{-7}$	$8,60 \cdot 10^{-7}$	$-2,04 \cdot 10^{-7}$
a_7	$17,00 \cdot 10^{-4}$	$35,80 \cdot 10^{-5}$	$73,00 \cdot 10^{-4}$	$6,33 \cdot 10^{-4}$
a_8	$23,00 \cdot 10^{-6}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$	$3,16 \cdot 10^{-5}$	$-7,04 \cdot 10^{-5}$
a_9	$26,00 \cdot 10^{-6}$	$2,71 \cdot 10^{-4}$	$27,60 \cdot 10^{-6}$	$2,32 \cdot 10^{-4}$
a_{10}	-0,07	-0,05	-0,03	-0,06
a_{11}	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$0,33 \cdot 10^{-3}$
a_{12}	$85,00 \cdot 10^{-6}$	$-4,50 \cdot 10^{-5}$	$33,70 \cdot 10^{-5}$	$-5,02 \cdot 10^{-5}$
a_{13}	$2,24 \cdot 10^{-8}$	$3,25 \cdot 10^{-7}$	$-9,24 \cdot 10^{-7}$	$4,19 \cdot 10^{-7}$
a_{14}	$51,00 \cdot 10^{-5}$	$7,89 \cdot 10^{-5}$	$66,00 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$
a_{15}	-9,78	-0,92	-23,71	-0,96
a_{16}	-2 975,70	3 525,63	12 162,19	4 548,02
a_{17}	-0,42	-0,22	-0,23	-0,29
a_{18}	-330,29	-64,98	-1 507,39	3 451,08
a_{19}	$-3,00 \cdot 10^{-4}$	-0,07	-0,01	0,23

Таблица 5

Коэффициенты детерминации и погрешности

Статистическая характеристика	Тоннаж от 100 до 1 400 млн т		Тоннаж от 300 до 1 400 млн т	
	Номер пути			
	I	II	I	II
R^2	0,58	0,83	0,60	0,81
ε_{cp} , %	122,99	50,78	108,45	39,15
ε_{min} , %	0,77	1,75	0,03	0,29
ε_{max} , %	1 712,41	325,70	1 015,00	339,41

По табл. 5 видно, что по I пути погрешности больше, чем по II пути, а коэффициенты детерминации по I пути меньше, следовательно, определить с помощью регрессионной модели количество отказов рельсов по I пути более сложно. Это связано с тем, что по I пути ходят поезда груженые, тяжеловесные, в отличие от II пути, а значит, динамические нагрузки и грузонапряженность по I пути больше.

Если сравнивать результаты анализа для тоннажей 100–1 400 и 300–1 400 млн т, можно заметить, что влияние начального срока службы 100–200 млн т на количество отказов рельсов незначительно, и в данном анализе

признаки, взятые с такими тоннажами, являются малоинформативными.

Для визуального представления были построены графики зависимости количества отказов рельсов от пропущенного тоннажа для фактически наблюдаемых отказов рельсов и рассчитанных по созданной регрессионной модели для участков 1.4.1.2, 1.17.1.2, 2.8.1.1, 2.3.1.2.

В качестве примера рассмотрены по два опытных участка I и II пути (рис. 5). Степень сходимости фактического и рассчитанного количества отказов рельсов составляет:

- по I пути средняя разность фактического количества отказов рельсов и рассчитанного

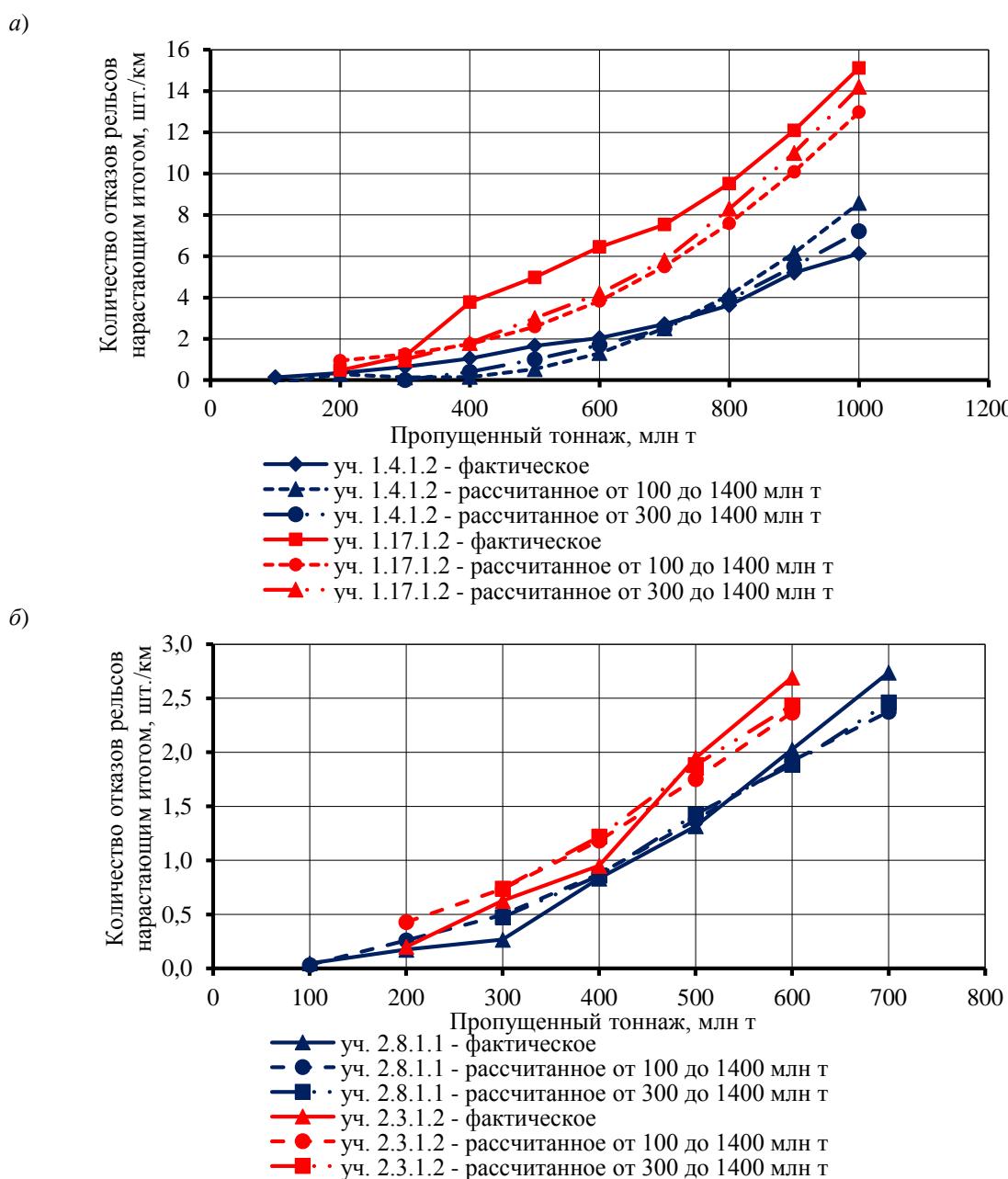


Рис. 5. Сравнение фактического и рассчитанного количества отказов рельсов:
α – I путь; β – II путь

для участка 1.4.1.2 – 0,8 шт./км, максимальная (при тоннаже 1 000 млн т) – 2,4 шт./км; для участка 1.17.1.2 средняя разность – 1,7 шт./км, максимальная (при тоннаже 600 млн т) – 2,6 шт./км;

– по II пути погрешности значительно меньше, линия рассчитанных значений количества отказов рельсов идет плавно и больше приближена к линии фактических значений количества отказов рельсов. Так, средняя погрешность для участка 2.8.1.1 – 0,1 шт./км, максимальная (при тоннаже 700 млн т) – 0,3 шт./км; для участка 2.3.1.2 средняя – 0,2 шт./км, максимальная (при тоннаже 600 млн т) – 0,3 шт./км.

Выводы

1. Оценка отказов рельсов выполнялась по I и II путям Кр и Км дистанций пути Среднесибирской магистрали. В анализе участвовали 49 участков главных путей общей протяженностью 778 км (без учета километров, приходящихся на станции).

2. Анализ графиков зависимости количества отказов рельсов от пропущенного тоннажа по I и II пути показал, что с ростом тоннажа существенно увеличивается количество и интенсивность отказов рельсов.

Так, на участках по I пути до достижения пропущенного тоннажа 700 млн т идет плавное нарастание количества отказов рельсов (интенсивность 0,7 шт./км на 100 млн т). Однако при пропущенном тоннаже более 700 млн т заметно резкое увеличение количества отказов рельсов (интенсивность 1,8 шт./км на 100 млн т): при тоннаже 1 000 млн т разброс отказов рельсов составляет 2,5–17,5 шт./км при среднем значении 6,1 шт./км. Дальнейшая наработка тоннажа ведет к быстрому росту количества отказов рельсов: при тоннаже в 1 400 млн т разброс отказов рельсов составляет 11,2–38 шт./км при среднем

значении 23,2 шт./км (интенсивность 4,3 шт./км на 100 млн т).

3. Определено влияние эксплуатационных параметров плана и профиля пути (доли кривых, среднего радиуса, среднего продольного уклона) на количество отказов рельсов. Зависимость от доли кривых: по I пути при увеличении доли с 2 до 22 %, например при наработке тоннажа в 900 млн т, количество отказов рельсов увеличивается с 4 до 11 шт./км. Средний рост количества отказов рельсов по I пути при наработке тоннажа до 1 000 млн т – 2,9 шт./км в среднем на каждые 10 % доли кривых, для тоннажа более 1 000 млн т – 5–18 шт./км на каждые 10 % доли кривых. Зависимость от среднего радиуса кривой: по I пути при уменьшении радиуса кривой с 3 000 до 1 100 м при тоннаже в 1 000 млн т количество отказов рельсов увеличивается с 4 до 14 шт./км. Зависимость от продольного уклона: по I пути при увеличении уклона с 1,5 до 3 % при тоннаже в 900 млн т количество отказов рельсов увеличивается с 4 до 12 шт./км.

4. Проведен корреляционно-регрессионный анализ количества отказов рельсов от пропущенного тоннажа, параметров плана и профиля пути. Анализ показал, что больше всего на количество отказов рельсов влияет пропущенный тоннаж, коэффициент корреляции по I пути составляет 0,624, по II пути – 0,815.

Для проведения регрессионного анализа была выбрана нелинейная математическая модель отказов рельсов. Рассчитаны факторные и результативные признаки, параметры регрессионного анализа. Проведено сравнение результатов анализов для тоннажей 100–1 400 и 300–1 400 млн т. Так, при анализе для тоннажа 100–1 400 млн т коэффициент детерминации по I пути составил 0,580; по II пути – 0,827; а для тоннажа 300–1 400 млн т по I пути – 0,599; по II пути – 0,807.

Список источников

1. Технические условия по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути : утверждены и введены в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 18.01.2013 № 75р. Москва, 2013. 221 с.
2. Карпушенко Н. И., Тарнопольский Г. И. Надежность железнодорожного пути : учебное пособие. Новосибирск : Издательство НИИЖТа, 1989. 104 с.
3. Карпушенко Н. И., Труханов П. С. Оценка и прогнозирование надежности рельсов в различных эксплуатационных условиях // Известия Транссиба. 2016. № 2. С. 118–126.
4. Севостьянов А. А., Величко Д. В. Основные причины отказов рельсов в процессе эксплуатации // Транспорт Урала. 2017. № 2. С. 52–54.

5. Косенко С. А., Акимов С. С. Причины отказов элементов железнодорожного пути на полигоне Западно-Сибирской железной дороги // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3. С. 26–34.
6. Карпушченко Н. И., Антерейкин Е. С., Труханов П. С. Анализ отказов рельсов на перевальном участке с высокой грузонапряженностью // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 4. С. 15–20.
7. Щепотин Г. К. Прогнозирование отказов рельсов и аварийных ситуаций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 4. С. 5–11.
8. Величко Д. В., Севостянов А. А., Антерейкин Е. С. Оценка надежности рельсов на участках Транссибирской магистрали // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 1. С. 5–11.
9. Щепотин Г. К. Влияние осевых нагрузок на срок службы рельсов Р65 и Р75 в условиях Сибири // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 7. С. 23–24.
10. Щепотин Г. К. Влияние грузонапряженности и осевых нагрузок на долговечность рельсов в регионах с холодным климатом // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1. С. 12–19.
11. Глинский В. В., Ионин В. Г. Статистический анализ : учебное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Инфра-М ; Новосибирск : Сибирское соглашение, 2002. 241 с.

References

1. Technical conditions for reconstruction (modernization) and repair of railway track. Approved and put into effect by the order of Russian Railways dated 18.01.2013 No. 75r. Moscow; 2013. 221 p. (In Russ.).
2. Karpushchenko N. I., Tarnopolsky G. I. Reliability of the railroad track: Training Manual. Novosibirsk: Publishing House of the Novosibirsk Institute of Railway Engineers; 1989. 104 p. (In Russ.).
3. Karpushchenko, N. I., Trukhanov P. S. Estimation and forecasting of the rails reliability in different operating conditions. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2016;(2):118–126. (In Russ.).
4. Sevostyanov A. A., Velichko D. V. Main reasons of rails failures in the process of operation. *Transport of the Urals*. 2017;(2):52–54. (In Russ.).
5. Kosenko S. A., Akimov S. C. Causes of railroad track elements failures on the range of the West Siberian Railway. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2017;(3):26–34. (In Russ.).
6. Karpushchenko N. I., Antereykin E. S., Trukhanov P. S. Analysis of the rail failures on the pass section with high freight load. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2018;(4):15–20. (In Russ.).
7. Schepotin G. K. Prediction of the rail failures and emergency situations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(4):5–11. (In Russ.).
8. Velichko D. V., Sevostyanov A. A., Antereykin E. S. Reliability assessment of rails on the sections of the Trans-Siberian Railway. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019(1):5–11. (In Russ.).
9. Shchepotin G. K. Influence of axial loads on the service life of R65 and R75 rails in Siberia. *Track and Track Facilities*. 2020;(7):23–24. (In Russ.).
10. Shchepotin G. K. Influence of the freight tension and axial loads on the rail durability in the regions with cold climate. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(1):12–19. (In Russ.).
11. Glinskiy V. V., Ionin V. G. Statistical analysis: textbook. Third edition., revised and extended. Moscow: INFRA-M; Novosibirsk: Siberian Accord; 2002. 241 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А. С. Масловец – студент факультета «Строительство железных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

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

Information about the authors

A. S. Maslovec – Student of the Railway Construction Faculty, Siberian Transport University.

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

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

Статья поступила в редакцию 25.06.2024; одобрена после рецензирования 09.09.2024; принятая к публикации 03.10.2024.

The article was submitted 25.06.2024; approved after reviewing 09.09.2024; accepted for publication 03.10.2024.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.225.073.436.08:614.84
doi 10.52170/1815-9265_2024_72_15

Разработка программы предупреждения террористических угроз с применением опасных грузов для защиты железных дорог и критически важных объектов транспортной инфраструктуры на основе анализа деструктивных событий

Владимир Ильич Медведев^{1✉}, Михаил Дмитриевич Сурков²

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

² ПК Дельта, Новосибирск, Россия

¹ MedvedevVI2017@yandex.ru[✉]

² surkovmd@yandex.ru

Аннотация. Установлено, что перевозка (транспортировка) опасных грузов железнодорожным, автомобильным, речным и морским, авиационным, трубопроводным видами транспорта представляет существенную опасность не только «сама по себе», но и при нарушении предусмотренных нормативами условий безопасности транспортного процесса. Анализ ряда событий на транспортных объектах в 2022–2023 гг. выявил возможность использования перевозок опасных грузов в качестве фактора создания техногенных чрезвычайных ситуаций для решения масштабных геополитических задач, противоречащих интересам Российской Федерации. При этом грузы, составляющие более 50 % грузопотока на всех видах транспорта, несут потенциальную опасность критической дезорганизации транспортного процесса.

Целью работы стало выявление особенностей ряда имевших место чрезвычайных ситуаций, а также недостатков и узких мест в системе безопасности для разработки превентивных мер безопасности. На всех видах транспорта устойчивую и безопасную перевозку (транспортировку) обеспечивают критически важные транспортные объекты или объекты транспортной инфраструктуры. Анализ показал необходимость поэтапной разработки и внедрения дополнительных, нестандартных мер безопасности, требующих комплексного подхода. Во внимание приняты акции 2022 и 2023 гг.: подрывы трубопровода «Северный поток» в Балтийском море, Крымского моста (Керченский пролив), аммиакопровода «Тольятти – Одесса» (на территории Харьковской области Украины) и поджог железнодорожного состава в Северомурском тоннеле (на территории Республики Бурятия Российской Федерации). В всех случаях дополнительным фактором опасности выступали опасные грузы: метан, аммиак безводный (класс опасности 2) и дизельное топливо (класс опасности 3). Изучение фактологии дает основания сделать вывод о тенденции или явлении как объекте исследования. Типологические признаки позволяют характеризовать чрезвычайные ситуации как похожие, «аналогичные» в рамках исследования.

Предложенные к разработке программы предупреждения террористических угроз с применением опасных грузов мероприятия относятся по большей части к организационно-техническим. В связи с закрытостью релевантной информации мероприятия обсуждаются без деталей, важных для эффективности разработки.

Ключевые слова: аварийные ситуации, железнодорожный транспорт, критически важные объекты транспортной инфраструктуры, опасные грузы, террористические угрозы, чрезвычайные ситуации

Для цитирования: Медведев В. И., Сурков М. Д. Разработка программы предупреждения террористических угроз с применением опасных грузов для защиты железных дорог и критически важных объектов транспортной инфраструктуры на основе анализа деструктивных событий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 15–21. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_15.

TRANSPORT

Original article

Development of a program to prevent terrorist threats involving dangerous goods, to protect railways and critical transport infrastructure facilities based on the analysis of destructive events

Vladimir I. Medvedev^{1✉}, Mikhail D. Surkov²

¹ Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

² PK Delta, Novosibirsk, Russia

¹ MedvedevVI2017@yandex.ru✉

² surkovmd@yandex.ru

Abstract. We have established that the transportation (transportation) of dangerous goods by rail, road, river and sea, aviation, pipeline modes of transport poses a significant danger not only "by itself"; as a result of violations of the safety conditions of the transport process provided for by regulations. An analysis of a number of events at transport facilities in the period 2022–2023 revealed the possibility of using the transportation of dangerous goods as a factor in creating man-made emergencies. To solve large-scale geopolitical problems that contradict the interests of the Russian Federation. At the same time, cargoes that make up more than 50 % of the cargo flow on all types of transport carry a potential danger for critical disorganization of the transport process.

The purpose of the work was to identify the features of a number of emergency situations that occurred in the regions of the world, to identify shortcomings and "bottlenecks" in the security system for the development of preventive security measures. On all types of transport, sustainable and safe transportation (transportation) is provided by critical transport facilities, or critical transport infrastructure facilities. The analysis showed the need for the phased development and implementation of additional, non-standard security measures that require an integrated approach. The actions of 2022 and 2023 were taken into account: the explosions of the Nord Stream pipeline in the Baltic Sea, the Crimean Bridge (Kerch Strait), the Tolyatti – Odessa ammonia pipeline (on the territory of the Kharkiv region of Ukraine) and the arson of a railway train in the Severo-Muiskiy tunnel (on the territory of the Republic of Buryatia of the Russian Federation). In all cases, dangerous goods were an additional hazard factor: methane, anhydrous ammonia (hazard class 2) and diesel fuel (hazard class 3). The study of fact gives us grounds to conclude about a trend or phenomenon as an object of research. Typological features make it possible to combine emergency situations as similar, "similar", within the framework of the study.

The measures proposed for the development of a program for the prevention of terrorist threats using dangerous goods relate mostly to organizational and technical ones. Due to the closeness of relevant information, events are discussed without details that are important for the effectiveness of development.

Keywords: emergencies, rail transport, critical transport facilities, dangerous goods, terrorist threats, emergencies

For citation: Medvedev V. I., Surkov M. D. Development of a program to prevent terrorist threats involving dangerous goods, to protect railways and critical transport infrastructure facilities based on the analysis of destructive events. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2024;(72):15–21. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_15.

Введение

Организация перевозочного процесса опасных грузов по-прежнему представляет важную народно-хозяйственную задачу для крупных экономик стран мира, в том числе и Российской Федерации. В силу исторических, географических и иных условий в стране создана и развивается мощная транспортная система по перевозке (транспортировке) природного сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Наибольшее влияние транспортный процесс оказывает на функционирование таких отраслей, как энергетика, сельское хозяйство, военно-промышленный комплекс и др. В десятки стран мира поставляются: природный газ метан (опасный груз класса 2), в перспективе его постепенно будет замещать экологически оптимальный энергоснабжитель – газообразный водород [1]; аммиачно-нитратные удобрения (опасные грузы класса 5) [2]; тепловыделяющие элементы (опасные грузы класса 7) и многие другие. В этот процесс вовлечены все виды транспорта: трубопроводный, железнодорожный, автомобильный, речной и морской (в том числе по Северному морскому пути), авиационный. Устойчивую и безопасную перевозку (транспортировку) опасных грузов обеспечивают критически важные объ-

екты транспортной инфраструктуры (КВОТИ) или транспортные объекты.

По нашей оценке, больше 50 % грузопотока может быть отнесено к опасным грузам или имеет соответствующие признаки: взрыво- и пожароопасность, экотоксичность и другие свойства, которые могут быть использованы злоумышленниками для дезорганизации транспортного процесса.

Материалы и методы исследования

Материалы и методы исследования основаны на адекватном и релевантном методическом аппарате, основы которого разработаны в последней трети XX в. научной школой НИИЖТ – СГАПС – СГУПС. Методический аппарат по разработке условий перевозки опасных грузов во внутреннем и международном железнодорожном грузовом сообщении [3] за продолжительный период подтвердил свою теоретическую и практическую состоятельность и возможность его применения к анализу новых фактов и тенденций. Теория проектирования условий перевозки и оценки риска основана на методах сравнительной типологии и круговых экспертных оценок, моделировании состояния груза (грузовой единицы) под действием динамических, статических, тепловых и иных воз-

действий в транспортном процессе. При железнодорожных перевозках воздействия изменяются в широком диапазоне. Применяемые нами методы анализа техногенных опасностей и рисков для объектов железнодорожного транспорта удовлетворительно согласуются с методами и результатами других отечественных исследовательских коллективов, например ВНИИМАШ и ВНИИЖТ [4]. Материалами исследования выступает фактология нештатных ситуаций: чрезвычайных ситуаций (ЧС), а также в ряде случаев аварийных ситуаций и инцидентов. Нештатные ситуации рассматриваются как реализованный эксперимент «сам по себе». Данный подход может быть определен как акцидентальная компаративистика.

Результаты исследования

Внимание к проблеме обеспечения устойчивости и безопасности транспортной инфраструктуры должно определенно возрастать, учитывая прогнозируемый 6%-й рост объема перевозки опасных грузов в течение 2023–2028 гг. [5]. Сложность технических систем, как и их опасность для человека во всех проявлениях, согласно общесистемному принципу Л. фон Берталанфи [6], возрастает экспоненциально, чего нельзя сказать о темпах консолидации усилий общества по противостоянию нарастающим угрозам.

События в Российской Федерации и непосредственно связанные с ней, произошедшие в сентябре, октябре 2022 г. и июне, ноябре 2023 г., показали уязвимость КВОТИ по отношению к террористическим угрозам с применением опасных грузов. По-видимому, задачей злоумышленников во всех случаях было использование фактора уязвимости КВОТИ в geopolитических целях. К сожалению, эти негативные цели во многом были достигнуты. Нашей стране был нанесен ощутимый ущерб, включая, наряду с прочим, экономическую, политическую и имиджевую составляющие. В настоящей работе обоснована своевременность разработки программы предупреждения террористических угроз с применением опасных грузов для защиты железнодорожных дорог и КВОТИ. Рассматриваемые события могут быть классифицированы в следующих терминах: инцидент, аварийная ситуация и чрезвычайная ситуация с опасными грузами в особых условиях. Важность задачи

обусловлена необходимостью разработки теоретических аспектов защиты и настоящей потребностью внедрения практических мероприятий. Возможно, следует отметить, что возмещение нанесенного террористами ущерба в обозримом будущем представляется невероятно трудной задачей.

Ведущийся нами мониторинг и анализ безопасности перевозки опасных грузов в России и в других ведущих странах показывает, что на железных дорогах происходит аномальный рост числа неблагоприятных событий: инцидентов, аварийных ситуаций, транспортных катастроф и ЧС. На этом фоне резко повышается число террористических актов на железных дорогах и КВОТИ с применением опасных грузов или на объектах транспортировки опасных грузов. Анализ показывает, что только средствами повышения уровня транспортной безопасности [7, 8] данную сложную проблему не решить. Поэтому на основе анализа общего (типичного) и частного (специфического) нами обосновывается целесообразность разработки программы (или подпрограммы) защиты транспортировки опасных грузов от террористических актов с применением опасных веществ (грузов).

В условиях политического кризиса отношений Российской Федерации со странами коллективного Запада, усилившегося с момента начала специальной военной операции (24.02.2022), зафиксированы сотни нападений на объекты российской инфраструктуры, являющиеся гражданскими. Среди них – Крымский мост, аммиакопровод «Тольятти – Одесса», плотина Каховской ГЭС в Херсонской области, Запорожская атомная электростанция, железнодорожный тоннель на БАМе.

Выявлены общие черты ряда резонансных событий с участием опасных грузов. Прежде всего, инициированный извне подрыв 26.09.2022 трубопроводов «Северный поток – 1» и «Северный поток – 2», проложенных по дну Балтийского моря и предназначенных для транспортировки природного газа российских месторождений в Германию. Природный газ (метан) относится к опасным грузам, использованный при этом взрывчатый материал также опасный груз класса 1 (комерческое обозначение С-4, на основе гексогена). Характеристика опасных грузов, вовлеченных в аварию, представ-

лена в табл. 1 (пп. 1 и 3). Масса взрывчатого материала оценивается в несколько тонн.

С небольшим интервалом, примерно две недели, 08.10.2022 г. на Керченском (Крымском) мосту произошел так же инициированный извне взрыв. Взрывчатый материал (предположительно гексоген), массой до нескольких тонн перевозился грузовиком по автомобильному обустройству моста. Взрыв привел к возгоранию находившегося на относительно небольшом расстоянии (на железнодорожном обустройстве моста) дизельного топлива в семи вагонах-цистернах железнодорожного состава. Количество погибших составило пять человек, случайно оказавшихся в зоне аварии; протяженность повреждений автомобильного полотна – более 250 м. Характеристика опасных грузов, вызвавших взрыв и пожар на мосту, также приведена в табл. 1 (пп. 2 и 3).

Особенность рассмотренных событий заключается в том, что опасные свойства транспортируемых по критически важной инфраструктуре опасных грузов использованы в деструктивных, террористических, целях. Из этого почти очевидного заключения следует вывод о необходимости разработки дополнительных мер безопасности.

В 2023 г. предприняты попытки разрушения КВОТИ, служащих для транспортировки опасных грузов класса 2 (трубопровод) и всех классов (железнодорожный тоннель). Характеристика чрезвычайных ситуаций 2023 г. на КВОТИ с опасными грузами представлена в табл. 2.

Характеристика КВОТИ, опасных грузов и потенциально опасных на всех основных видах транспорта приведена в табл. 3. Объем грузов, указанных в данной таблице, составляет не менее 50 % общего грузопотока, что

Таблица 1
Характеристика опасных грузов, вызвавших аварию трубопровода «Северный поток» (26.09.2022) и разрушение элементов Керченского моста (08.10.2022)

Наименование (синонимы)	Химическая формула	Номер ООН	Номер аварийной карточки	Род подвижного состава, упаковка
1. Метан (газ природный)	CH ₄	1971	204	Трубопровод
2. Топливо дизельное (соляровое масло)	C _x H _y S _z (x > 9, y > 20 >> z)	1202	305	Вагон-цистерна
3. 1,3,5-Тринитро-1,3,5-триазациклогексан (циклотриметилентринитрамин, RDX, C-4, гексоген, циклонит)	(CH ₂) ₃ N ₃ (NO ₂) ₃	0072	137, 151	Крытый вагон, упаковка тарно-штучная

Таблица 2
Характеристика чрезвычайных ситуаций 2023 г. на КВОТИ с опасными грузами

Дата, место происшествия, объект, техническая характеристика	Обстоятельства и наименование опасного груза и класс опасности (в случае идентификации), характеристика опасного груза	Ущерб, пострадавшие
1. 5 июня 2023 г. Взрыв аммиакопровода «Тольятти – Одесса» (в районе населенного пункта Масютовка Харьковской области). Принадлежит ОАО «Тольяттиазот». Общая длина 2 417 км (из них 1 021 км проходит по территории Украины)	Аммиак, безводный, NH ₃ , номер ООН 1005, класс опасности 2, подкласс 2.3, класс 4 вредных веществ, ПДКр.з. – 20 мг/м ³ ; ПДКс.с. – 0,04 мг/м ³ ; ПДКм.р. – 0,2 мг/м ³	Ущерб инфраструктуре, пострадало несколько человек (среди мирного населения и военнослужащих)
2. 29–30 ноября 2023 г. Подрыв поезда. 41 цистерна с дизельным топливом, 3 цистерны с авиационным топливом. Пожар. Северомурский железнодорожный тоннель протяженностью 15 343 м	Топливо дизельное, номер ООН 1202, класс опасности 3, аварийная карточка 305. Топливо авиационное, номер ООН 1993, класс опасности 3, аварийная карточка 305	Ущерб инфраструктуре: сгорели 16 вагонов-цистерн, площадь разлива жидкости 150 м ² , пожарный поезд не мог войти в тоннель; людских потерь нет

Таблица 3

Характеристика КВОТИ, опасных и потенциально опасных (горючих) грузов

Вид транспорта	Наиболее характерные КВОТИ	Опасные грузы, классов 2 и 3, подлежащие контролю	Неопасные грузы, горючие, возможные последствия
1. Трубопроводный	Трубопроводы (продуктопроводы) и их инфраструктура	Метан (природный газ), аммиак безводный, бензин и другие нефтепродукты	Нефть – взрыв и пожар, разрушение инфраструктуры
2. Железнодорожный	Тоннели (138 единиц), мосты (30 727 единиц)	Пропан-бутан, СУГ (сжиженные углеводородные газы), бензин, керосин, топливо дизельное, мазут (легковоспламеняющийся)	Уголь каменный и бурый, мазут (горючий), полимерные материалы, лесоматериалы
3. Автомобильный	Тоннели, мосты	Бензин и другие нефтепродукты (легковоспламеняющиеся)	Мазут (горючий), полимерные материалы, лесоматериалы
4. Водный (речной и морской)	Морские и речные порты, причалы	Бензин и другие нефтепродукты (легковоспламеняющиеся)	Мазут (горючий), полимерные материалы, лесоматериалы
5. Авиационный	Грузовые авиапорты	Бензин и другие нефтепродукты (легковоспламеняющиеся)	Мазут (горючий), полимерные материалы, лесоматериалы

отмечено во введении, изменяясь от максимальных значений для трубопроводного и железнодорожного до незначительных для других видов транспорта.

Основываясь на идеях системного анализа Л. фон Берталанфи, мы установили, что вызванные актами террора ЧС с опасными грузами требуют пристального научного осмысления. По нашему мнению, требуется разработка релевантных методологии и терминологии, понятийного аппарата. С учетом характера угроз в качестве практического результата нами предложена разработка программы предупреждения террористических угроз для железных дорог и КВОТИ.

Для дальнейших исследований нами установлен круг задач, в том числе:

1) определить критерии отнесения и список неопасных грузов, потенциально опасных в рамках программы защиты железных дорог и КВОТИ, на основе показателей ГОСТ [9];

2) разработать изменения и дополнения в ст. 2, 11, 20, 21, 22, 24 Федерального закона [10];

3) подготовить предложения о создании инициативной рабочей группы по рассмотрению изменений и дополнений в ст. 2, 11, 17, 18, 19, 20, 21, 88 Федерального закона [11].

Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Установлено объективное существование как общественного, так и научного запроса на повышение уровня защиты, предупреждение чрезвычайных и аварийных ситуаций с опасными грузами на железнодорожном транспорте и снижение их последствий. Новым, актуальным обстоятельством является факт использования инфраструктуры перевозки (транспортировки) опасных грузов для создания техногенных ЧС террористическими методами. Максимальный эффект достигается причинением существенного ущерба критически важным объектам транспортной инфраструктуры.

2. Несмотря на существующую в Российской Федерации систему предотвращения террористических угроз, происходящие события и их анализ свидетельствуют о необходимости разработки дополнительных элементов системы защиты инфраструктуры перевозки (транспортировки) опасных грузов.

3. Обосновано, что снижение рисков, ущербов от разного рода ЧС с опасными грузами возможно на основе комплексного подхода, объединяющего меры законодательного, нормативно-правового, государственно-административного, организационного, технического, технологического, социально-экономического характера. Сформулировано предложение о разработке программы предупреждения террористических угроз с применением опасных грузов для

защиты железных дорог и критически важных объектов транспортной инфраструктуры.

4. Учитывая протяженный характер геополитического конфликта, генерирующего стимулы

использования террористических методов, необходимо противопоставить данным угрозам разработку теоретических моделей защиты и практических рекомендаций на их основе.

Список источников

1. Проблема безопасной транспортировки водорода в условиях развития зеленой энергетики / В. И. Медведев, М. Д. Сурков, З. П. Ощепков, А. А. Басалаева // Политранспортные системы : XII Международная научно-техническая конференция (Новосибирск, 21–22 ноября 2022 г.) : материалы. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2022. С. 7–11.
2. Концепция новой государственной программы повышения безопасности перевозок опасных грузов / В. И. Медведев, М. Д. Сурков, Ю. А. Танайно, И. О. Тесленко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3. С. 23–32.
3. Островский А. М., Медведев В. И., Тесленко И. О. Проблемы перевозки опасных грузов // Транспорт Российской Федерации. 2005. № 2. С. 57–60.
4. Развитие методов анализа техногенных опасностей и рисков для объектов железнодорожного транспорта / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, А. М. Соколов, Е. Ю. Титов // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 6. С. 3–12.
5. Рынок логистики опасных грузов – рост, тенденции, влияние covid-19 и прогнозы (2023–2028 гг.) // Mordor Intelligence : [сайт]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/hazardous-goods-logistics-market> (дата обращения: 30.06.2024).
6. Берталанфи Л. фон. Общая теория систем: критический обзор // Исследования по общей теории систем. Москва : Прогресс, 1969. 520 с.
7. О транспортной безопасности : Федеральный закон № 16-ФЗ : принят Государственной думой 19 января 2007 г. : одобрен Советом Федерации 2 февраля 2007 г. : редакция от 24.07.2023 : с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.03.2024. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Об утверждении критериев отнесения мостов, эстакад, путепроводов, виадуков и тоннелей на автомобильных дорогах всех форм собственности, правообладателями которых являются организации, в отношении которых Министерство транспорта Российской Федерации осуществляет координацию и регулирование деятельности, к критически важным объектам : приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 31.05.2021 № 172. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 30.06.2024).
9. ГОСТ Р 57478–2017. Грузы опасные. Классификация : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 мая 2017 г. № 454-ст. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200145665> (дата обращения: 30.06.2024).
10. О железнодорожном транспорте в Российской Федерации : Федеральный закон от 10 января 2003 г. № 17-ФЗ : ред. от 13.06.2023. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901838120> (дата обращения: 30.06.2024).
11. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации : Федеральный закон от 10 января 2003 г. № 18-ФЗ : с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.04.2024. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901838121> (дата обращения: 30.06.2024).

References

1. Medvedev V. I., Surkov M. D., Oshchepkov Z. P., Basalaeva. A. A. The problem of safe transportation of hydrogen in the context of the development of green energy. *Polytransport Systems: XII International Scientific and Technical Conference (Novosibirsk, November 21–22, 2022): proceedings*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Transport University; 2022. P. 7–11. (In Russ.).
2. Medvedev V. I., Surkov M. D., Tanaino Yu. A., Teslenko I. O. The concept of a new state program for improving the safety of dangerous goods transportation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(3):23–32. (In Russ.).
3. Ostrovskiy A. M., Medvedev V. I., Teslenko I. O. Problems of dangerous goods transportation. *Transport of the Russian Federation*. 2005;(2):57–60. (In Russ.).
4. Makhutov N. A., Gadenin M. M., Sokolov A. M., Titov E. Yu. Development of methods of analysis of technogenic hazards and risks for railway transport facilities. *Russian Railway Science Journal*. 2014;(6):3–12. (In Russ.).
5. Dangerous Goods Logistics Market – growth, trends, impact of COVID-19 and forecasts (2023–2028). (In Russ.). URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/hazardous-goods-logistics-market>.

6. Bertalanffy Ludwig von. General Theory of Systems: A Critical Review. *Collection of Translations. Research on the general theory of systems*. Moscow: Progress; 1969. 520 p. (In Russ.).
7. On Transport Security: Federal Law № 16-FZ of 09.02.2007: as amended 24.07.2023: with amendments and additions, introduction. effective from 01.03.2024. (In Russ.).
8. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation № 172 dated 31.05.2021 “On approval of criteria for classifying bridges, overpasses, overpasses, viaducts and tunnels on highways of all forms of ownership, the rightholders of which are organizations, in respect of which the Ministry of Transport of the Russian Federation coordinates and regulates activities, as critically important objects”. (In Russ.). URL: <http://www.docs.cntd.ru>.
9. GOST R 57478–2017. Dangerous goods. Classification. Approved and enacted by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 30.05.2017 No. 454-st. (In Russ.). URL: <http://www.docs.cntd.ru>.
10. On railway transport in the Russian Federation: Federal Law dated 10.01.2003 № 17-FZ: as amended on 13.06.2023. (In Russ.).
11. The Statute of Railway Transport of the Russian Federation: Federal Law dated 10.01.2003 № 18-FZ: as amended on 01.04.2024. (In Russ.).

Информация об авторах

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

М. Д. Сурков – инженер-конструктор ООО «ПК Дельта».

Information about the authors

V. I. Medvedev – Professor of the Life Safety Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.
M. D. Surkov – Design Engineer, OOO PK Delta.

Статья поступила в редакцию 09.07.2024; одобрена после рецензирования 18.10.2024; принята к публикации 29.10.2024.

The article was submitted 09.07.2024; approved after reviewing 18.10.2024; accepted for publication 29.10.2024.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 625.12:624.139

doi 10.52170/1815-9265_2024_72_22

Криогенные проблемы эксплуатируемых железнодорожных насыпей восточного участка БАМа и сценарии развития деформаций

Денис Алексеевич Разуваев^{1✉}, Евгений Самуилович Ашпиз²

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

² Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ razdenis@mail.ru[✉]

² geonika@inbox.ru

Аннотация. Для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации насыпей восточного участка БАМа, в том числе после модернизации или ремонта, необходимо исключить или минимизировать криогенные деформации сооружений. Этому способствует повышение эффективности принимаемых противодеформационных решений за счет объективной оценки существующих криогенных проблем, а также систематизации и прогнозирования сценариев дальнейшего развития деформаций насыпей рассматриваемого полигона.

С опорой на исторические аспекты создания и эксплуатации БАМа обобщены и сформулированы текущие криогенные проблемы полигона. Сформулированы и систематизированы восемь возможных сценариев развития криогенных деформаций эксплуатируемых насыпей на восточном участке БАМа. Для вероятностного прогноза сценариев развития криогенных деформаций и обоснования первоочередных направлений разработки эффективных решений по стабилизации системы «насыпь – основание» выполнено обследование насыпей на рассматриваемом полигоне.

По результатам обследования насыпей на пяти перегонах выявлены особенности их текущего состояния и деформирования. Эксплуатируемые насыпи на восточном участке БАМа не только имеют последствия уже свершившейся деградации многолетнемерзлых грунтов в основании, но и обладают потенциалом к деформациям при дальнейшей эксплуатации, в том числе после модернизации и ремонта. Причем эти деформации могут происходить с определенной спецификой и по различным сценариям.

Прогноз сценариев развития криогенных деформаций показал, что наиболее вероятным сценарием развития деформаций на участках насыпей рассматриваемого полигона являются осадки сооружений из-за деградации многолетнемерзлых грунтов в основании в период оттаивания. Вероятность других сценариев относительно невысока (до 15 %), но она существует и не может не учитываться при дальнейшей модернизации или ремонтах пути. Значительная часть прогнозируемых сценариев (до 30 %) сочетают сразу несколько криогенных проблем. На этом фоне повышается актуальность дальнейших исследований и расчетно-теоретического обоснования комплексных решений по термостабилизации.

Ключевые слова: железная дорога, земляное полотно, грунты основания, многолетнемерзлые грунты основания, осадки при оттаивании, пучины

Финансирование: исследование выполнено в рамках соглашения с Министерством науки и образования Российской Федерации о предоставлении из федерального бюджета гранта (№ 075-15-2024-559 от 25.04.2024 г.).

Для цитирования: Разуваев Д. А., Ашпиз Е. С. Криогенные проблемы эксплуатируемых железнодорожных насыпей восточного участка БАМа и сценарии развития деформаций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 22–34. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_22.

TRANSPORT

Original article

Cryogenic issues of operating railway embankments in the eastern section of the Baikal-Amur Mainline and deformation development scenarios

Denis A. Razuvaev^{1✉}, Evgeniy S. Ashpiz²

¹ Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

² Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ razdenis@mail.ru[✉]

² geonika@inbox.ru

Abstract. To ensure the reliable and safe operation of embankments on the Eastern section of the Baikal-Amur Mainline (BAM), including after modernization or repair, it is essential to eliminate or minimize cryogenic deformations of the structures. This goal is facilitated by improving the effectiveness of anti-deformation measures through an objective assessment of existing cryogenic issues, as well as the systematic analysis and forecasting of scenarios for further deformation development in the embankments of the studied section.

Based on the historical aspects of the construction and operation of BAM, current cryogenic problems within this section have been summarized and formulated. Eight potential scenarios for the development of cryogenic deformations in embankments on the Eastern section of BAM have been outlined and categorized. For the probabilistic forecasting of deformation development scenarios and to determine priority directions for developing effective stabilization solutions for the “embankment – foundation” system, a survey of embankments on this section was conducted.

The results of the survey on embankments across five intervals revealed specific characteristics of their current condition and deformation patterns. The embankments on the Eastern section of BAM not only reflect the consequences of past degradation of permafrost in their foundations, but they also possess a potential for deformation under continued operation, including post-modernization and repairs. These deformations may occur with particular characteristics and according to various scenarios.

The probabilistic forecast of cryogenic deformation scenarios indicated that the most likely deformation scenario for embankment sections on this stretch is the subsidence of structures due to permafrost degradation in the foundation during thaw periods. The probability of other scenarios is relatively low (up to 15 %), though they do exist and must be considered in future modernization or repair activities. A significant portion of the forecasted scenarios (up to 30 %) combine multiple cryogenic issues simultaneously. Against this background, further research and theoretical justification of complex thermal stabilization solutions become increasingly relevant.

Keywords: railway, roadbed, foundation soils, permafrost foundation soils, thaw settlement, frost heaving

Financial Support: the research was carried out under the agreement with the Ministry of Science and Education of the Russian Federation on grant from the federal budget (No. 075-15-2024-559 dated 25.04.2024).

For citation: Razuvayev D. A., Ashpiz E. S. Cryogenic issues of operating railway embankments in the eastern section of the Baikal-Amur Mainline and deformation development scenarios. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):22–34. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_22.

Введение

Долгосрочная программа развития железных дорог¹ страны предусматривает мероприятия по увеличению провозной способности российских железных дорог, в том числе Восточного полигона, включая Байкало-Амурскую магистраль (БАМ). При этом надежность и безопасность железнодорожного пути, в том числе земляного полотна, являются основными показателями, которые требуют особого внимания.

Вместе с тем на сегодняшний день протяженность дефектного и деформирующегося земляного полотна железных дорог страны растет и превысила порог в 10 % от их общей протяженности. При этом выделяется более высокой дефектностью (относительно средних показателей по сети) именно Восточный полигон [1, 2]. Такое распределение дефектности земляного полотна связано с расположением инфраструктуры железных дорог Восточного

полигона на основании из многолетнемерзлых грунтов (ММГ), которые, в свою очередь, занимают более 60 % площади России². Аналогичные проблемы наблюдаются и в ряде других стран [3, 4], таких как Китай и Канада³, со схожими природно-климатическими условиями и распространением ММГ в основании сооружений.

Природно-климатические и инженерно-геологические условия проложения БАМа, особенно восточного участка, предопределили криогенное происхождение большинства деформаций земляного полотна. К ним главным образом относятся такие деформации, как осадки из-за деградации ММГ основания и пучины (для невысоких насыпей или выемок с основаниями из глинистых водонасыщенных грунтов) [5].

При этом после 40 лет эксплуатации БАМа первоначальные условия проектирования и

¹ Об утверждении долгосрочной программы развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года : распоряжение Правительства РФ от 19.03.2019 № 466-р : (ред. от 13.10.2022). URL: <https://docs.cntd.ru/document/553927831> (дата обращения: 08.02.2024).

² Геокриологическая карта СССР / МГУ им. М. В. Ломоносова ; гл. ред. Э. Д. Ершов. Москва, 1991.

³ UCalgary researcher heads up major federal permafrost study in Manitoba. URL: <https://schulich.ucalgary.ca/news/ucalgary-researcher-heads-major-federal-permafrost-study-manitoba> (дата обращения: 08.02.2024).

строительства магистрали во многом изменились. Произошла значительная деградация ММГ основания, на части участков сформировались слабые водонасыщенные грунты в основании, в связи с чем возникло многообразие криогенных деформаций (сезонных, консолидационных и т. д.) и их различных сочетаний, что и определяет эффективность противодеформационных решений. По внешним признакам криогенные деформации достаточно схожи, но их причины, а главное, подходы к стабилизации имеют существенные различия.

Поэтому для повышения эффективности принимаемых решений по модернизации, ремонту и содержанию эксплуатируемых насыпей восточного участка БАМа необходима оценка существующих криогенных проблем, а также систематизация и прогноз сценариев дальнейшего развития деформаций, что является целью настоящей работы.

Методологической основой работы служит анализ выполненного при участии авторов обследования насыпей восточного участка БАМа, сравнение данных с результатами наблюдений эксплуатационных служб, обобщение криогенных проблем, а также систематизация и прогноз сценариев дальнейшего развития деформаций.

Исторические аспекты создания БАМа и текущие криогенные проблемы насыпей

В исторической ретроспективе отечественного опыта проектирования и строительства земляного полотна на многолетнемерзлых основаниях выделяется пять основных последовательных этапов, каждый из которых приурочен к опыту строительства тех или иных системообразующих объектов транспортной инфраструктуры страны [5]. При этом период проектирования, строительства и начала эксплуатации БАМа, и в частности восточного участка, отнесен к третьему этапу (60-е гг. – середина 80-х гг. XX в.).

При проектировании БАМа был использован опыт создания железных дорог, некоторые из положений которого были закреплены в ВСН 61-61⁴. Основные проектные решения, принятые

по данному документу, опирались на эмпирические исследования и оказались не в полной мере эффективными для БАМа. В особенности это отмечается для восточного участка БАМа, где в основаниях преобладали высокотемпературные (от -0,5 до -1,0 °C) ММГ.

Так, было принято недостаточно обоснованное решение об отсыпке насыпей дренирующими грунтами высотой 4 м с симметричными боковыми бермами. Такая высота считалась оптимальной для вхождения границы ММГ в тело насыпи при дальнейшей эксплуатации, при том что отсыпка предполагалась в зимний период и без нарушения мохового покрова. Решения подтверждались теплотехническими расчетами, основанными только на принципах кондуктивной теплопередачи в системе «насыпь – основание». При этом в расчетах не учтено, что основным условием существования ММГ в этом регионе являлось их интенсивное охлаждение за счет мохового покрова через испарение влаги в летний период и разницы в теплопроводности водонасыщенных мхов в теплый и холодный периоды. В итоге после первых лет эксплуатации земляного полотна запустились процессы деградации ММГ оснований, которые усугублялись за счет неудачных решений по поверхностному водоотводу. Деградация ММГ в основании земляного полотна вызвала закономерные криогенные осадки железнодорожного пути, которые были особенно существенными в первые годы эксплуатации, поскольку оттаивали погребенные под насыпь сезонно-мерзлые торфы и сильнольдистые глинистые грунты.

К середине 80-х гг. земляное полотно БАМа в основной своей части было завершено и на введенных в эксплуатацию участках установлено 738 мест с деформациями [6]. Закономерно, что большинство деформаций составляли осадки насыпей на притаивающем основании, приводящие к расстройствам рельсовой колеи, а следовательно, снижению безопасности движения поездов и ограничениям их скорости. В местах значительных осадок, особенно на участках, проходящих по марам (сложены сильнольдистыми грунтами III и IV категории про-

⁴ Технические указания по изысканиям, проектированию и постройке железных дорог в районах вечной мерзлоты : ВСН-61-61 : утверждены

03.07.1961 / Минтрансстрой СССР. Москва : [б. и.], 1962. 147 с.

садочности), наблюдались трещины по обочинам и бермам, просадка которых продолжалась вплоть до полного погружения в марлю. В основаниях ряда участков после оттаивания ММГ появлялись слабые водонасыщенные грунты, формировалась так называемая трехслойная модель оттаивающего основания, описанная в [7].

Кроме того, на восточном участке БАМа отмечался другой тип криогенных деформаций – пучины железнодорожного пути из-за морозного пучения грунтов основания земляного полотна в выемках и на невысоких насыпях, где глубина сезонного промерзания превышала их высоту. В период сезонного оттаивания грунты основания на таких участках приобретали текучую консистенцию и переходили в разряд слабых грунтов, а осадка при оттаивании сезонно-мерзлых грунтов дополнялась пластическими боковыми выпорами грунтов основания.

На этом фоне уже к 1993 г. был сформирован ряд эффективных конструктивных мероприятий (охлаждающие каменные наброски, сезонные охлаждающие установки, откосные экраны различных конструкций и др.), направленных на охлаждение грунтов оснований и регулирование поверхностного водоотвода, которые были отражены в специальном нормативном документе⁵. Тем не менее факторы деградации ММГ оснований насыпей восточного участка БАМа в полной мере не были исключены, магистраль продолжает активно эксплуатироваться, условия работы системы «насыпь – основание» постоянно меняются, возникает большее многообразие криогенных деформаций и их различных сочетаний. Именно участки с сочетанием различных криогенных деформаций и их последствий являются наиболее опасными с точки зрения надежности железнодорожного пути.

Понимание процессов криогенного деформирования земляного полотна, объективная оценка их развития и последствий являются ключевым аспектом для предотвращения дальнейших деформаций, в том числе после

/modernizatsii BAMa. На данном этапе с опорой на исторические аспекты создания и эксплуатации BAMa обобщены и сформулированы текущие криогенные проблемы (КП) рассматриваемого полигона:

- сезонное или техногенное⁶ промерзание потенциально пучинистых глинистых грунтов и торфов в основании насыпи;
- изменение положения кровли льдистых (II–IV категории просадочности) ММГ (оттаивание) в основании насыпи;
- длительная консолидация оттаявших (ранее многолетнемерзлых и/или сезонно-мерзлых) слабых грунтов основания насыпи, в том числе с формированием трехслойной модели оттаивающего основания, описанной в [7].

Различные сочетания текущих криогенных проблем формируют возможные сценарии развития сопутствующих криогенных деформаций в дальнейшем.

Систематизация возможных сценариев развития криогенных деформаций насыпей восточного участка BAMa

Для систематизации сценариев развития криогенных деформаций отдельной насыпи необходимо задаться возможными случаями сочетаний криогенных проблем, определяющих деформацию. В настоящей работе принято по два возможных уровня каждой из перечисленных криогенных проблем: есть или нет. Тогда количество возможных сочетаний трех криогенных проблем на двух уровнях составит восемь. Для каждого сочетания сформулированы сценарии развития криогенных деформаций эксплуатируемых насыпей на восточном участке BAMa (табл. 1). Из них один – без деформаций при дальнейшей эксплуатации железнодорожного пути (№ 1) – возможен при отсутствии всех трех криогенных проблем.

Очевидно, что для каждого сценария, кроме первого, нужна своя стратегия проектирования и стабилизации основания и железнодорожного пути в целом, а применение типовых, шаблонных подходов и решений не всегда оправданно. Вместе с тем при инженерном

⁵ Технические указания по стабилизации деформирующихся насыпей железных дорог, расположенных на протаивающих основаниях из вечномерзлых

грунтов / МПС РФ, Главное управление пути. Москва, 1993. 98 с.

⁶ При восстановлении кровли ММГ основания способами термостабилизации.

Таблица 1

Возможные сценарии развития криогенных деформаций

Сценарий	Краткое описание возможных криогенных деформаций
1	Пучение грунтов основания насыпи и пучины на железнодорожном пути не прогнозируются; осадки сооружения из-за деградации ММГ в период оттаивания и консолидации оттаявших (ранее ММГ и/или ССГ) слабых грунтов основания насыпи маловероятны
2	Возможны пучины на железнодорожном пути в периоды промерзания грунтов основания; иные криогенные деформации маловероятны
3	Возможны осадки сооружения из-за деградации ММГ в основании в период оттаивания; иные криогенные деформации маловероятны
4	Возможны осадки и другие деформации насыпи из-за консолидации оттаявших (ранее ММГ и/или ССГ) слабых грунтов основания; иные криогенные деформации маловероятны
5	Возможны осадки сооружения из-за деградации ММГ в основании в период оттаивания, а также дальнейшие пучины на железнодорожном пути в периоды промерзания грунтов основания; осадки насыпи из-за консолидации оттаявших (ранее ММГ и/или ССГ) грунтов основания маловероятны
6	Возможны пучины на железнодорожном пути в периоды промерзания грунтов основания, а также осадки и другие деформации насыпи из-за консолидации оттаявших (ранее ММГ и/или ССГ) слабых грунтов основания; осадки сооружения из-за деградации ММГ в основании в период оттаивания маловероятны
7	Возможны осадки сооружения из-за деградации ММГ в основании в период оттаивания, а также осадки и другие деформации насыпи из-за консолидации оттаявших (ранее ММГ и/или ССГ) слабых грунтов основания; пучины на железнодорожном пути в периоды промерзания грунтов основания маловероятны
8	Пучение грунтов основания насыпи и пучины на железнодорожном пути прогнозируются; возможны осадки сооружения из-за деградации ММГ в основании в период оттаивания, а также дальнейшие осадки и другие деформации насыпи из-за консолидации оттаявших (ранее ММГ и/или ССГ) слабых грунтов основания

обследовании и последующем проектировании стабилизации деформирующихся насыпей на восточном участке БАМа важно объективно устанавливать все криогенные проблемы, точно определять и учитывать сценарий возможного деформирования сооружения в дальнейшем.

Необходимо применять вариативный подход к проектированию стабилизации деформирующихся насыпей с использованием для одной части сценариев традиционных подходов [8–12], а для другой – их комбинаций. Для наиболее сложных сценариев необходимо разрабатывать и применять инновационные, но при этом эффективные и экономически обоснованные подходы и способы стабилизации.

Для дальнейшего вероятностного прогноза сценариев развития криогенных деформаций и обоснования первоочередных направлений разработки эффективных решений по стабилизации системы «насыпь – основание» выполнено обследование насыпей восточного участка БАМа, результаты которого приведены ниже.

Методика и результаты обследования насыпей восточного участка БАМа

Обследование выполнялось в пределах пяти перегонов (I–V), схематичное расположение которых представлено на рис. 1. Для обследования выбирались участки с криогенными деформациями, внесенные в формы ПУ-9⁷ и ПУ-10⁸. В общей сложности обследование выполнено по 49 деформирующемся участкам из форм ПУ-9 и ПУ-10. Общая протяженность обследуемого земляного полотна составила 42 км.

В рамках обследования выполнялось бурение инженерно-геологических скважин с отбором проб и дальнейшим их испытанием в лабораторных условиях, а также геофизическое исследование, которое проводилось с использованием георадарной съемки и электрофизического профилирования. По всем инженерно-геологическим скважинам выполнялся замер температуры грунтов по глубине, часть скважин оборудовалась обсадными трубами для режимного температурного мониторинга. Обобщенная схема проведения комплексного обследова-

⁷ Паспорт неустойчивого или деформирующегося земляного полотна.

⁸ Ведомость учета пучинистых мест.

ния для характерного поперечного профиля представлена на рис. 2. Применяемое для обследования оборудование приведено на рис. 3.

После комплексного обследования и лабораторных испытаний было составлено 115 подробных инженерно-геологических поперечных профилей. Для дальнейшей систематизации данных в рамках решаемой задачи на основании анализа полученных материалов и некоторых исторических аспектов выделен ряд основных факторов и последствий криогенного деформирования эксплуатируемых насыпей восточного участка БАМа как маркеров существующих криогенных проблем и реализованных деформаций. К ним можно отнести:

– высоту насыпи h_n и положение границы сезонного промерзания B (теплотехнический расчет по СП 25.13330), как факторы морозного пучения грунтов основания сооружения;

– наличие и положение уровня грунтовых вод C , как фактор нарушения естественных условий теплообмена земляного полотна и атмосферы, а также деградации ММГ;

– тип и состояние грунтов насыпи, верхней и нижней зоны основания, как факторы осадок сооружения при деградации ММГ и морозного пучения грунтов основания сооружения;

– текущую глубину h_{MMG} границы ММГ D , а также наличие и величину таликовой зоны $h_{t,z}$, как последствия нарушения естественных

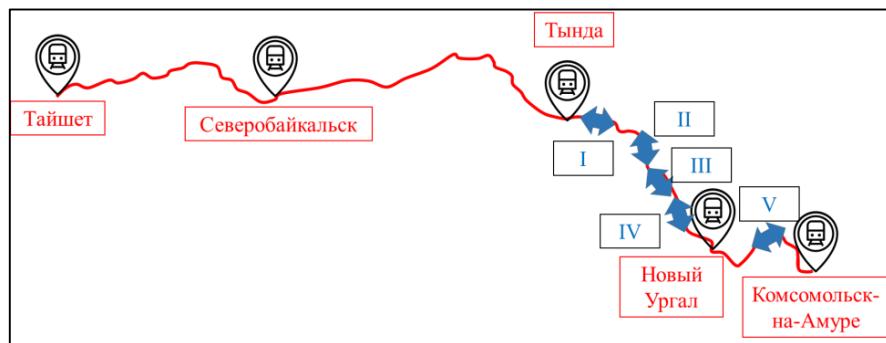


Рис. 1. Обследованные перегоны I–V на план-схеме Байкало-Амурской магистрали

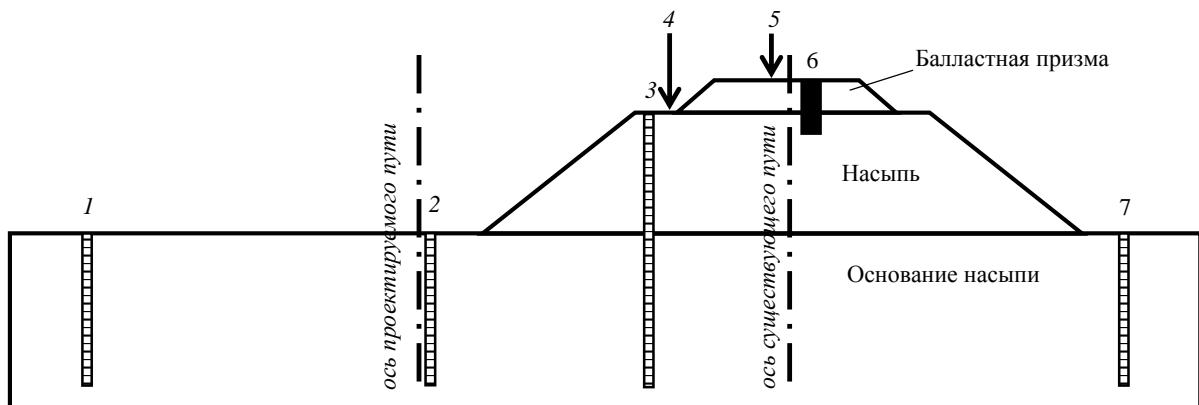


Рис. 2. Обобщенная схема проведения комплексного обследования
для характерного поперечного профиля:

- 1 – скважина в полосе отвода («фоновая» термометрическая); 2 – скважина по оси проектируемого пути; 3 – скважина по существующей насыпи; 4 – электрофизический продольный профиль;
- 5 – георадарный продольный профиль; 6 – шурф по оси существующего пути;
- 7 – скважина у подошвы существующей насыпи



Rис. 3. Отдельные этапы обследования и основное оборудование:
а – бурение скважины в основании насыпи установкой ПБУ-2; б – бурение скважины через насыпь установкой УКБ 12/25; в – георадарная съемка прибором ОКО-2; г – замер температуры в термометрической скважине косой датчиков МЦДТ 0922 с контроллером ПКЦД1/100

условий теплообмена земляного полотна с атмосферой и деградации ММГ;

– фактическую мощность накопленных балластных материалов h_b , величину просадки подошвы насыпи h_n , а также состояние боковых берм, как последствия осадок сооружения при деградации ММГ.

Перечисленные факторы и последствия криогенного деформирования эксплуатируемых насыпей восточного участка БАМа так или иначе формируют текущие криогенные проблемы рассматриваемой магистрали. Обобщенная схема определения факторов и последствий криогенного деформирования по результатам комплексного обследования для характерного профиля представлена на рис. 4.

Основание насыпей разделялось на две зоны, верхнюю и нижнюю, в зависимости от

возможности влияния на сжимаемость грунтов поездной нагрузки и собственного веса насыпи. Принято, что в верхней зоне основания возможны осадки как от поездной нагрузки и собственного веса насыпи, так и от термопросадок ММГ при оттаивании. В нижней зоне, с большим бытовым давлением от собственного веса грунтов основания, напряжения от дополнительной нагрузки рассеиваются и пренебрежительно малы, поэтому возможны только термические просадки при деградации ММГ. Граница между зонами определялась по результатам расчета границы рабочей зоны земляного полотна по методике Г. Г. Коншина⁹ и границы сжимаемой толщи основания по СП 22.13330, с расчетом напряжений в основании по методике, изложенной проф. Г. М. Шахунянцем (по значению наибольшей итоговой глубины)¹⁰.

⁹ Коншин Г. Г. Работа земляного полотна под поездами : учебное пособие. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. 208 с.

¹⁰ Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. Москва : Транспорт. 1969. 480 с.

Статистическая обработка данных по всем составленным подробным инженерно-геологическим профилям показала, что высота более чем 60 % обследованных деформирующихся насыпей составила от 2,5 до 4,5 м (рис. 5). Это согласуется с действующими на момент проектирования нормативными документами и представлениями о кондуктивной теплопередаче в системе «насыпь – основание». Из-за незначительной высоты насыпи, сложенной крупнообломочными грунтами, и нарушения естественных условий теплообмена на 63 % обследованных участков сезонное промерзание достигает основания земляного полотна, сложенного потенциально пучинистыми глинистыми грунтами и торфами.

Практически в 70 % обследованных оснований отмечено наличие грунтовых вод, которые способствуют и морозному пучению грунтов, и дальнейшей деградации ММГ, и формированию слабых оснований. В большинстве случаев грунтовые воды формируют горизонт мощностью 1–2 м над ММГ. Источником грунтовых вод, как правило, являются атмосферные осадки, фильтрующиеся через дренирующие грунты насыпи, а также поверхностные воды, формируемые из-за нарушения водоотвода у земляного полотна.

Все обследованные насыпи отсыпаны из крупнообломочных дренирующих грунтов, достаточно устойчивых к воздействию нагрузок и сезонному промерзанию. На 60 % составлен-

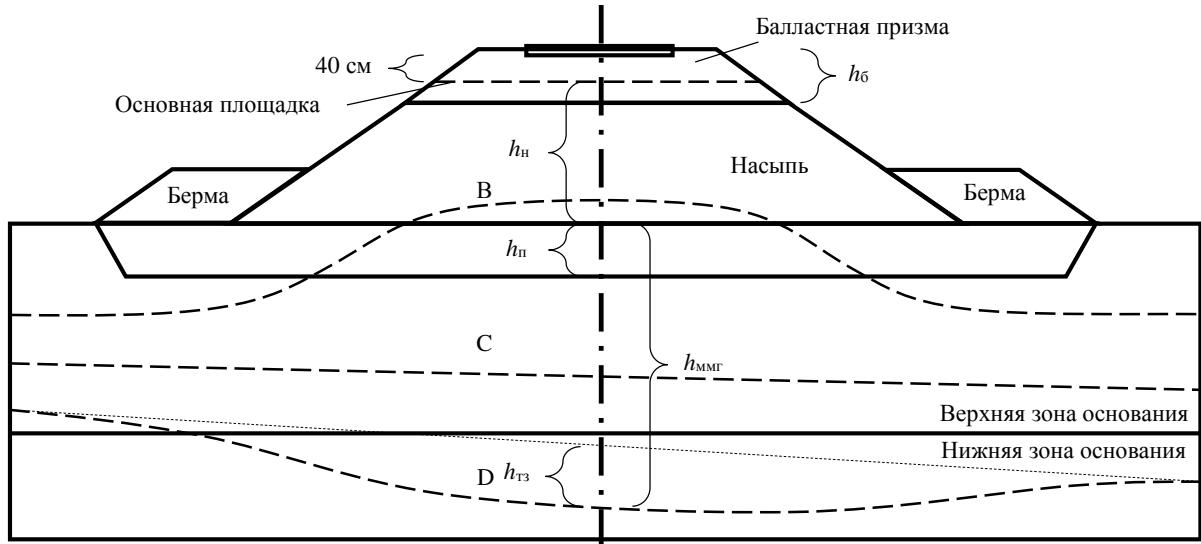


Рис. 4. Обобщенная схема определения факторов и последствий криогенного деформирования эксплуатируемых насыпей

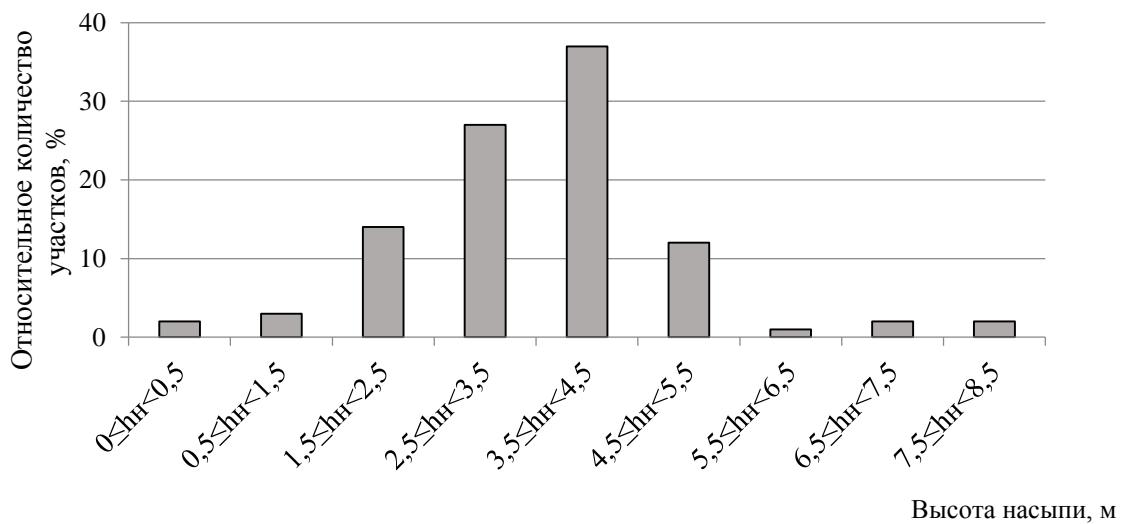
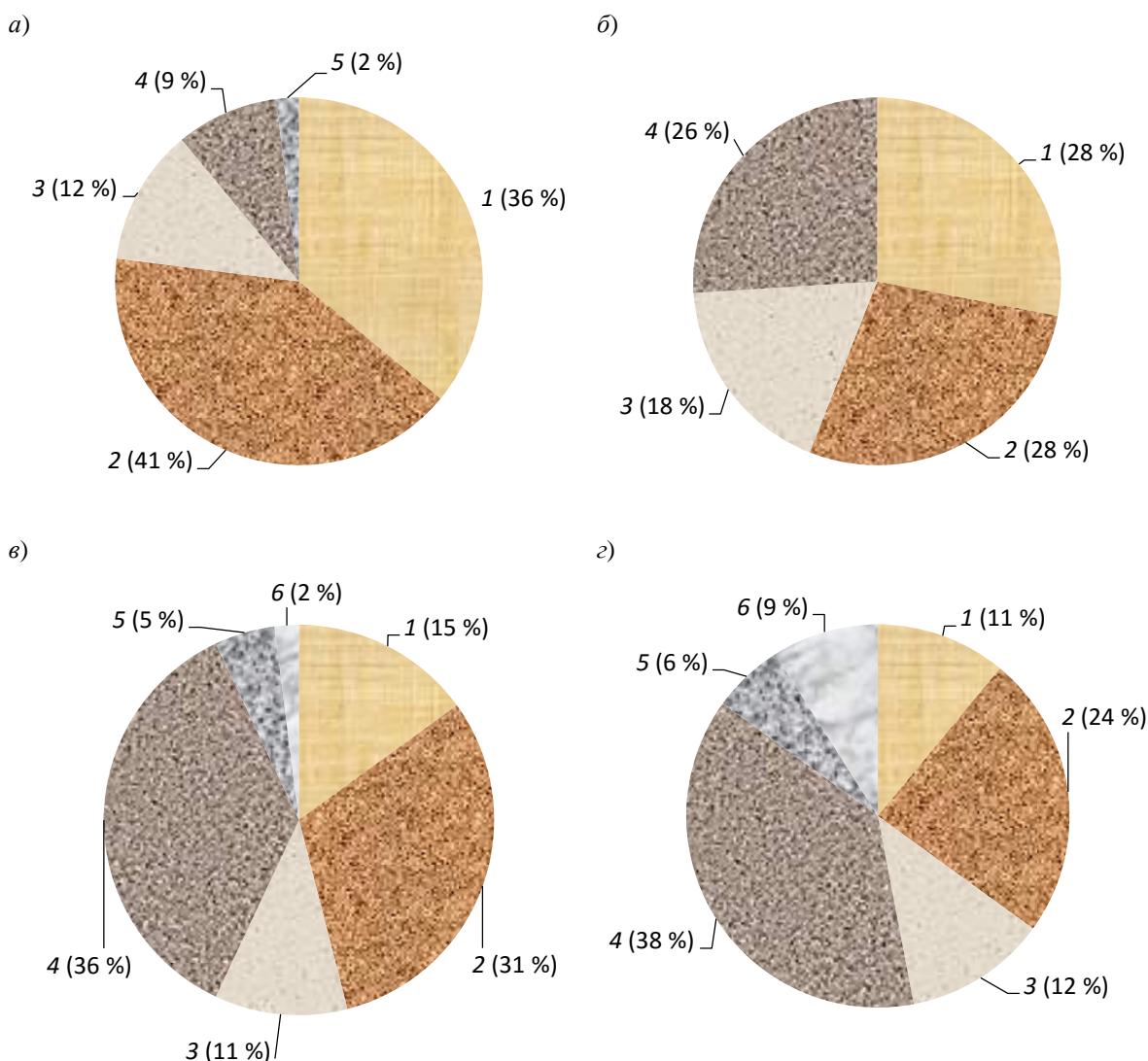


Рис. 5. Распределение обследованных участков по высоте насыпи

ных поперечных профилей под подошвой насыпи встречены торфы и заторфованные грунты, что также согласуется с действующими на момент их проектирования и строительства нормативными документами.

Верхняя зона основания 58 % обследованных участков представлена полностью талыми грунтами, в 42 % случаев в нижней части данной зоны залегают ММГ. Статистическое распределение типов грунтов верхней зоны основания на обследованных участках представлено на рис. 6, а, б. На большинстве участков верхнюю зону основания слагают

потенциально пучинистые и слабые глинистые грунты. При этом наблюдается тенденция повышения доли крупнообломочных включений в грунтах основания с увеличением глубины. Нижняя зона основания только 19 % обследованных участков представлена полностью талыми грунтам, в 37 % случаев в верхней части данной зоны залегают талые грунты, и в 44 % случаев зону формируют только ММГ (см. рис. 6, в, г). На более чем половине участков нижнюю зону основания слагают стабильные песчаные и крупнообломочные грунты, представляющие опасность



Rис. 6. Статистическое распределение типов грунтов основания на обследованных участках:
а – талые грунты (верхняя зона); б – многолетнемерзлые грунты (верхняя зона); в – талые грунты (нижняя зона); г – многолетнемерзлые грунты (нижняя зона);
грунты: 1 – глинистые; 2 – глинистые с крупнообломочными включениями; 3 – песчаные;
4 – крупнообломочные с глинистыми включениями; 5 – крупнообломочные; 6 – скальные

только в случае их высокой льдистости и реализации процессов деградации ММГ. При этом с увеличением глубины крупность фракции грунтов повышается, а в ряде случаев нижнюю зону основания подстилают скальные грунты. Нижняя зона основания изучалась при обследовании не менее чем до глубины нулевых амплитуд колебания температуры грунтов основания.

Термометрические замеры в скважинах показали, что на 81 % составленных инженерно-геологических профилей в основании насыпей имеются ММГ, а глубина их границы $h_{\text{ММГ}}$ варьируется в достаточно широком диапазоне (рис. 7). При этом в 56 % обследованных деформирующихся насыпей граница ММГ располагается на глубинах от 2,5 до 5,5 м. В целом результаты обследования показали, что граница ММГ может располагаться как в верхней, так и в нижней зоне основания насыпей.

Из всех участков с ММГ таликовые зоны в основании насыпей отмечены по 62 поперечным профилям. Величина таликовой зоны $h_{t,3}$ (см. рис. 4) по выполненным замерам составила от 0,5 до 8,0 м при среднем значении 1,95 м, что указывает на влияние именно земляного полотна на нарушение естественных условий теплообмена основания с атмосферой.

Величина зафиксированной просадки подошвы насыпи в основание h_n составила от 0,4 до 2,6 м при среднем значении 1,1 м. Более высокие значения просадок зафиксированы на участках распространения в основаниях насыпей торфов и заторфованных грунтов, а также

на участках со значительными по размеру таликовыми зонами. Такие деформации установлены на более чем 90 % обследованных участков и являются последствиями оттаивания погребенных под насыпь сезонно-мерзлых торфов и сильнольдистых глинистых грунтов, а также последующей деградации ММГ в основании.

Качественно коррелируют с величиной зафиксированной просадки подошвы насыпи h_n значения установленной при обследовании фактической мощности накопленных балластных материалов h_b . Так, установленная мощность щебеночных балластных материалов составила от 0,2 до 1,5 м при среднем значении 0,9 м. При этом следует учитывать, что изначально при строительстве балластная призма устраивалась из песчано-гравийных смесей, которые в большинстве случаев визуально не отличить от грунтов земляного полотна. Поэтому установленные данные о фактической мощности накопленных балластных материалов несколько занижены. Такие толщины балластных материалов характерны для участков с существенными просадками земляного полотна и являются следствием подъемки пути на балласт.

Еще одним последствием деформирования обследованных сооружений после деградации ММГ является состояние боковых берм, наличие которых зафиксировано на более чем 70 % обследованных участков. Из них практически на 2/3 участков отмечены деформации берм в виде просадок в основание. Эффективность применения симметричных боковых берм на

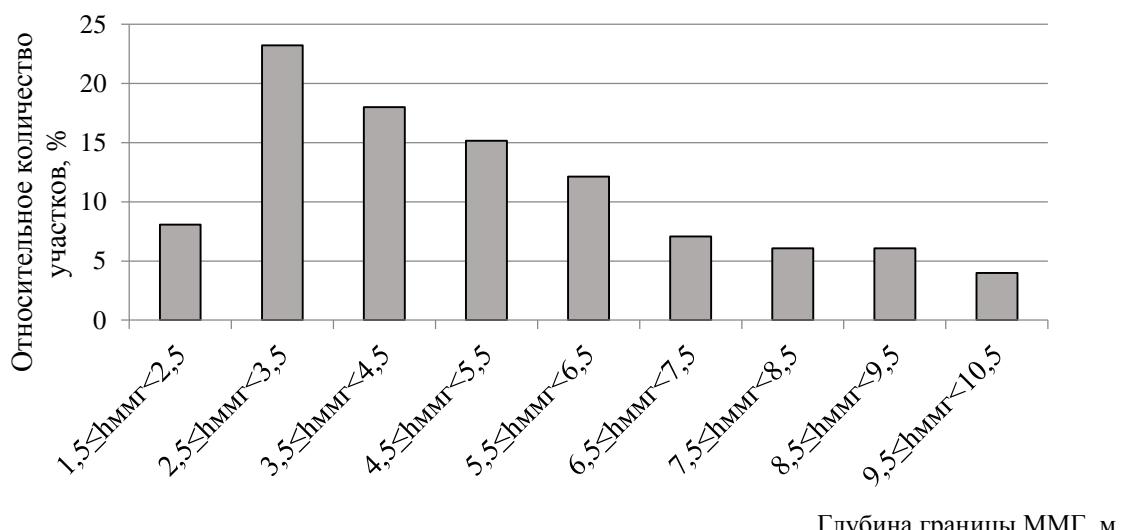


Рис. 7. Статистическое распределение обследованных участков по глубине границы ММГ

обследованных участках вызывает сомнение, при этом они дополнительно увеличивают поглощение солнечной радиации поверхностями сооружения и ухудшают условия стока поверхностных вод вблизи насыпей.

По результатам обследования насыпей восточного участка БАМа с увеличением глубины в основании прослеживается повышение крупности частиц дисперсных грунтов и закономерное снижение коэффициента сжимаемости при оттаивании (при отсутствии линз и прослоев льда). При этом текущая глубина границы ММГ варьируется в достаточно широком диапазоне, и по факту граница может оказаться как в верхней, так и в более стабильной нижней зоне основания. В целом возможны варианты, когда деградация ММГ может приводить как к существенным, так и к незначительным деформациям основания насыпей.

Анализ полученных результатов, а также исторических аспектов позволяет сделать вывод о том, что эксплуатируемые насыпи на восточном участке БАМа не только имеют последствия уже свершившейся деградации ММГ в основании, но и обладают потенциалом к деформациям при дальнейшей эксплуатации, в том числе после строительства вторых путей. Причем эти деформации могут происходить с определенной спецификой и по различным сценариям, которые рассмотрены выше.

По результатам комплексного обследования для каждого из составленных подробных инженерно-геологических профилей установлен вероятный сценарий развития криогенных деформаций согласно табл. 1. Относительное распределение участков (с точностью до 5 %) по сценариям представлено в табл. 2.

По данным табл. 2 для принятой выборки обследованных насыпей восточного участка БАМа возможны все сценарии развития криогенных деформаций, что подтверждает актуаль-

ность проведенного исследования. При этом для 10 % участков деформации не прогнозируются (сценарий № 1). По всей видимости, все деформации на данных участках уже реализовались, при этом они не исключены из форм ПУ-9 и ПУ-10 либо занесены в них ошибочно.

Наиболее вероятным сценарием развития деформаций на участках насыпей рассматриваемого полигона являются осадки сооружений из-за деградации ММГ в основании в период оттаивания (сценарий № 3). Вероятность остальных сценариев относительно невысока (до 15 %), но она существует и не может не учитываться при дальнейшей модернизации пути. До 25 % участков деформирующихся насыпей имеют сочетание сразу двух из описанных ранее криогенных проблем, а 5 % участков – сочетание всех трех криогенных проблем (сценарий № 8).

Количество и параметры обследованных участков и поперечных профилей позволяют считать рассмотренную выборку деформирующихся насыпей репрезентативной для восточного участка БАМа, а данные табл. 2 принять за вероятность наступления того или иного сценария развития криогенных деформаций на рассматриваемом полигоне.

Для сценариев развития криогенных деформаций, учитывающих по одной криогенной проблеме (сценарии № 2–4), концептуально решения существуют. Возможно, они требуют некоторой адаптации под конкретные условия, но они достаточно широко опробованы и отражены в специальном нормативном документе¹¹. Участки же с сочетанием различных криогенных проблем (сценарии № 5–8) являются наиболее опасными с точки зрения надежности железнодорожного пути, и для них в первую очередь актуальны совершенствование и разработка новых эффективных решений по стабилизации системы «насыпь – основание».

Таблица 2

Частота сценариев развития криогенных деформаций для выборки обследованных участков

Сценарий	1	2	3	4	5	6	7	8
Относительное количество участков, соответствующих критериям, %	10	10	50	< 5	5	< 5	15	5

¹¹ Технические указания по стабилизации деформирующихся насыпей железных дорог, расположенных на протягивающих основаниях из вечно-

мерзлых грунтов / МПС РФ, Главное управление пути. Москва, 1993. 98 с.

Заключение

Для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации насыпей восточного участка БАМа, в том числе после модернизации или ремонта, необходимо исключить или минимизировать криогенные деформации сооружений. Этого возможно добиться за счет повышения эффективности принимаемых противодеформационных решений.

Проведенные исследования позволили обобщить и сформулировать три основные криогенные проблемы насыпей рассматриваемого полигона, которые при различных сочетаниях формируют возможные сценарии развития сопутствующих криогенных деформаций.

Выделено семь основных сценариев развития криогенных деформаций, для каждого из которых требуется своя стратегия проектирования и стабилизации основания и железнодорожного пути в целом. Для части сценариев возможно применение существующих нормативных подходов, а для другой части – их комбинации, а для некоторых сценариев необходимо разрабатывать и применять инновационные, но при этом эффективные и экономически обоснованные подходы и способы стабилизации.

Выполненное обследование насыпей восточного участка БАМа показало эффективность примененной методики с точки зрения объективной оценки криогенных проблем и деформаций, а также позволило выявить особенности их текущего состояния и деформирования. По результатам обследования выполнен вероятностный прогноз сценариев развития криогенных деформаций насыпей восточного участка БАМа.

Наиболее вероятным сценарием развития деформаций на участках насыпей рассматриваемого полигона являются осадки сооружений из-за деградации ММГ. При этом вероятность всех остальных сценариев также существует и не может не учитываться при дальнейшей модернизации железнодорожного пути. Значительная часть прогнозируемых сценариев (до 30 %) имеют сочетание сразу нескольких криогенных проблем.

На этом фоне повышается актуальность дальнейших исследований и расчетно-теоретического обоснования комплексных решений по термостабилизации, а также разработки эффективных способов преобразования свойств грунтов основания эксплуатируемого земляного полотна.

Список источников

1. Сазонов, В. Н., Ашпиз Е. С. Актуальные проблемы обеспечения надежности земляного полотна на Восточном полигоне // Железнодорожный транспорт. 2015. № 9. С. 28–31. EDN UJYKOH.
2. Ашпиз Е. С. Опыт сооружения земляного полотна железных дорог, расположенных на многолетнемерзлых грунтах: проблемы и пути их решения // Бюллетень Объединенного научного совета ОАО «РЖД». 2019. № 1. С. 21–27. EDN TQJHVX.
3. Harris S. A. The Tibetan Railroad: Innovative Construction on Warm Permafrost in a Low-Latitude, High-Altitude Region // Engineering Earth: The impacts of megaengineering projects. 2011. Chap. 43. P. 747–765. DOI 10.1007/978-90-481-9920-4_43.
4. Monitoring Roadbed Stability in Permafrost Area of Qinghai–Tibet Railway by MT-InSAR Technology / H. Liu, S. Huang, C. Xie [et al.] // Land. 2023. Vol. 12. P. 474. <https://doi.org/10.3390/land12020474>.
5. Ашпиз Е. С. Опыт проектирования земляного полотна железных дорог России, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов // Материалы Пятой конференции геокриологов России : плenарные доклады. Часть 2. Линейные сооружения в криолитозоне / МГУ имени М. В. Ломоносова. Москва : Университетская книга, 2016. Т. 1, ч. 1–4. С. 162–168. EDN WEQOXZ.
6. Ашпиз Е. С. Результаты обследования земляного полотна восточного участка Байкало-Амурской железной дороги и предложения по его стабилизации // Обеспечение эксплуатационной надежности земляного полотна железных дорог : материалы Всесоюзной научно-технической конференции. Москва : МИИТ, 1989. С. 87–89.
7. Ашпиз Е. С., Вавринюк Т. С. Расчет деформаций насыпей в районах мерзлоты // Мир транспорта. 2012. Т. 10, № 3 (41). С. 102–107. EDN PCDSHT.
8. Конструкции усиления насыпей железных дорог на вечномерзлых грунтах при строительстве вторых путей Восточного полигона / С. А. Кудрявцев, А. В. Кажарский, Т. Ю. Вальцева [и др.] // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2016. № 4. С. 243–250. EDN XEEEXQJ.
9. Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the Arctic zone in conditions of global warming / I. Sakharov, S. Kudryavtsev, V. Paramonov [et al.] // X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022, Novosibirsk, 02–05 March 2022. Novosibirsk : Elsevier B. V., 2022. P. 2506–2514. DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.288. EDN GXCWVQ.

10. Кондратьев В. Г., Валиев Н. А. Технология и результаты дополнительного охлаждения откосов земляного полотна на центральном участке БАМ // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов : XV Международная научно-практическая конференция : сборник статей : в 3 ч. Чита : Забайкальский государственный университет, 2015. Ч. 3. С. 156–161. EDN VHKJST.

11. Стабилизация температурного режима грунтов оснований сооружений в сложных мерзлотно-грунтовых условиях заполярной и приполярной тундры / В. В. Пассек, А. Н. Краев [и др.] // Вестник Тюменского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 89–93. EDN VHLWLR.

12. Система поверхностного охлаждения насыпи в зоне вечной мерзлоты / В. В. Пассек, С. С. Воробьев, Г. М. Поз, В. В. Пассек // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 1. С. 2–6. EDN NLTQVZ.

References

1. Sazonov V. N., Ashpiz E. S. Relevant Issues of Ensuring the Reliability of the Railway Subgrade on the Eastern Polygon. *Railway Transport*. 2015;(9):28–31. (In Russ.).
2. Ashpiz E. S. Experience in the Construction of Railway Subgrade Located on Permafrost Soils: Problems and Solutions. *Bulletin of the United Scientific Council of Russian Railways*. 2019;(1):21–27. (In Russ.).
3. Harris S. A. The Tibetan Railroad: Innovative Construction on Warm Permafrost in a Low-Latitude, High-Altitude Region. *Engineering Earth: The impacts of mega engineering projects*. 2011. Chapter 43. P. 747–765. DOI 10.1007/978-90-481-9920-4_43.
4. Liu H., Huang S., Xie C. [et al.]. Monitoring Roadbed Stability in Permafrost Area of Qinghai–Tibet Railway by MT-InSAR Technology. *Land*. 2023;12:474. <https://doi.org/10.3390/land12020474>.
5. Ashpiz E. S. Experience in the Design of Railway Subgrades in Russia Located in Permafrost Zones. *Proceedings of the Fifth Conference of Russian Geocryologists: Plenary Reports*. Part 2. Linear Structures in the Cryolithozone, Moscow, June 14–17, 2016. Lomonosov Moscow State University. Volume 1, parts 1–4. Moscow: University Book; 2016. P. 162–168. (In Russ.).
6. Ashpiz E. S. Results of Examination of the Subgrade of the Eastern Section of the Baikal-Amur Railway and Proposals for Its Stabilization. *Ensuring the Operational Reliability of Railway Subgrades. Proceedings of the All-Union Scientific and Technical Conference*. Moscow: MIIT, 1989. P. 87–89. (In Russ.).
7. Ashpiz E. S., Vavrynyuk T. S. Calculation of Embankment Deformations in Permafrost Areas. *Transport World*. 2012;10(41):102–107. (In Russ.).
8. Kudryavtsev S. A., Kazharsky A. V., Valtseva T. Yu. [et al.]. Reinforcement Structures for Railway Embankments on Permafrost Soils in the Construction of Second Tracks on the Eastern Polygon. *Design and Development of Regional Railway Networks*. 2016;,(4):243–250. (In Russ.).
9. Sakharov I., Kudryavtsev S., Paramonov V. [et al.]. Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the Arctic zone in conditions of global warming. *X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022, Novosibirsk, 02–05 March 2022*. Novosibirsk: Elsevier B. V.; 2022. P. 2506–2514. DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.288.
10. Kondratyev V. G., Valiev N. A. Technology and Results of Additional Cooling of Subgrade Slopes on the Central Section of the BAM. *Kulagin Readings: Techniques and Technologies of Production Processes: XV International Scientific-Practical Conference*: Proceedings in 3 Parts, Chita, November 30 – December 2, 2015. Chita: Transbaikal State University; 2015. Part 3. P. 156–161. (In Russ.).
11. Passek V. V., Kraev A. N., Paskov M. V., Andreev V. S. Stabilization of the Temperature Regime of Foundation Soils in Complex Permafrost Conditions of the Arctic and Subarctic Tundra. *Bulletin of the Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering*. 2015;(4):89–93. (In Russ.).
12. Passek V. V., Vorobyev S. S., Poz G. M., Passek V. V. Surface Cooling System for Embankments in the Permafrost Zone. *Track and Track Economy*. 2024;(1):2–6. (In Russ.).

Информация об авторах

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

Е. С. Ашпиз – заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Российского университета транспорта (МИИТ), доктор технических наук, доцент.

Information about the authors

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

E. S. Ashpiz – Head of the Track and Track Facilities Department, Russian University of Transport, Doctor of Engineering, Associate Professor.

Статья поступила в редакцию 05.11.2024; одобрена после рецензирования 11.11.2024; принята к публикации 12.11.2024.

The article was submitted 05.11.2024; approved after reviewing 11.11.2024; accepted for publication 12.11.2024.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.22.004.69+06
doi 10.52170/1815-9265_2024_72_35

Устойчивость решений автономных систем дифференциальных уравнений в изучении систем управления вагонопотоками в адрес припортовых железнодорожных станций

Евгения Андреевна Чеботарева^{1✉}, Виктор Алексеевич Богачев²,
Тарас Викторович Богачев³

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

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

¹ abrosimova@yandex.ru✉

² bogachev-va@yandex.ru

³ bogachev73@yandex.ru

Аннотация. Загруженность основных железнодорожных направлений и необходимость управления поездопотоками в условиях ограниченных пропускных способностей транспортной инфраструктуры усугубляют разработку и применение новых информационных инструментов управления вагонопотоками. В результате изменяется парадигма управления перевозками, в том числе за счет делегирования интеллектуальным системам части функций, традиционно выполняемых диспетчерским аппаратом. Тем самым изменяется количество уровней управления и связи между ними. Указанные вопросы инициируют разработку новых подходов и математических методов в транспортно-логистических исследованиях, в частности в областях, относящихся к системам управления транспортными перевозками.

Методология настоящего исследования в сфере организационно-технологической устойчивости систем управления вагонопотоками на железнодорожном транспорте представлена «жесткими» и «мягкими» математическими моделями, которые описываются автономными системами обыкновенных линейных дифференциальных уравнений. При этом переход от построенных сначала «жестких» моделей к «мягким» осуществляется дезагрегированием первых, выполняемым введением дополнительных связей между субъектами рассматриваемой двухуровневой системы управления перевозочным процессом.

Математический аппарат исследования представлен фазовым пространством (точнее, фазовой плоскостью), в котором изучается поведение траектории, отвечающей (соответствующему положению равновесия) невозмущенному решению системы, и траекторий, отвечающих ее возмущенным решениям. Классическими методами теории устойчивости решений дифференциальных уравнений показано, что в данной ситуации точка равновесия системы на фазовой плоскости является фокусом. Таким образом, установлено, что для рассматриваемой «мягкой» модели положение равновесия не только устойчиво по Ляпунову, но и асимптотически устойчиво. Построен фазовый портрет системы дифференциальных уравнений, которой описывается «мягкая» модель. Выполнен сравнительный анализ геометрической картины поведения фазовых траекторий с графическими изображениями функции, которой выражается посutoчное число отправляемых в адрес станции вагонов.

Указанные результаты окажутся востребованными при разработке интеллектуализированных систем управления поездо- и вагонопотоками, представляя собой математически доказанное обоснование устойчивости функционирования этих систем.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, организация транспортного производства, устойчивость систем управления, «жесткие» и «мягкие» математические модели, системы дифференциальных уравнений, фазовое пространство, фазовые траектории

Для цитирования: Чеботарева Е. А., Богачев В. А., Богачев Т. В. Устойчивость решений автономных систем дифференциальных уравнений в изучении систем управления вагонопотоками в адрес припортовых железнодорожных станций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 35–44. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_35.

TRANSPORT

Original article

Solutions stability of autonomous systems of differential equations in research of wagon flow control systems for the movement of wagons to port railway stations

Evgeniya A. Chebotareva^{1✉}, Victor A. Bogachev², Taras V. Bogachev³

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

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

¹ abrosimova@yandex.ru[✉]

² bogachev-va@yandex.ru

³ bogachev73@yandex.ru

Abstract. The workload of the main railway directions and the need to manage railway wagon flows in conditions of limited throughput abilities of transport infrastructure accelerate the development and use of new information control information tools. As a result, there is a change in the transportation control paradigm, including through the delegation to intelligent systems of some of the functions traditionally performed by the dispatch apparatus. Thus, the number of control levels and the relationship between them changes. These issues initiate the development of new approaches and mathematical methods in transport and logistics research, in particular, in areas related to transport systems.

The researches methodology of the organizational and technological sustainability of traffic control systems in railway transport is represented by "hard" and "soft" mathematical models, which are described by autonomous systems of ordinary linear differential equations. The transition from "hard" models to "soft" models is carried out by disaggregating the former. This is accomplished by introducing additional connections between the subjects of the considered two-level transportation process control system.

The mathematical apparatus of the research is represented by the phase space (more precisely, the phase plane). The behavior of the trajectory corresponding to the unperturbed solution (equilibrium position) and the trajectories corresponding to the perturbed solutions of the system of differential equations under consideration is researched. Classical methods have shown that in this situation the system equilibrium point on the phase plane is the focus. Thus, it was established that for the «soft» model under consideration, the position of equilibrium is not only stable in Lyapunov, but also asymptotically stable. A phase portrait of a system of differential equations has been built, which describes the «soft» model. A comparative analysis of the geometric picture of the behavior of phase trajectories with graphical representations of the function, which expresses the daily number of wagons sent to the station, was performed.

These results will be in demand when developing intellectualized control systems for train and wagon flows, since they are a mathematical justification for the stability of the functioning of these systems.

Keywords: railway transport, transport production organization, control system stability, "hard" and "soft" mathematical models, systems of differential equations, phase space, phase trajectories

For citation: Chebotareva E. A., Bogachev V. A., Bogachev T. V. Solutions stability of autonomous systems of differential equations in research of wagon flow control systems for the movement of wagons to port railway stations. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2024;(72):35–44. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_35.

Введение

Происходящее в настоящее время переориентирование основной части зарождающихся в экономическом пространстве России грузопотоков инициирует разработку и применение новых подходов и математических методов в транспортно-логистических исследованиях, в частности в тех областях, которые относятся к системам управления транспортными перевозками. Загруженность основных железнодорожных направлений на подходах к припортовым станциям потребовала введения целого набора мер организационного, технического и технологического характера для усиления пропускных способностей лимитирующих участков [1, 2]. При этом информаци-

онные инструменты становятся не только своего рода регулятором оценки возможности приема груза к перевозке, но и инструментом управления вагонопотоками, что коренным образом меняет идеологию управления [3]. Прежде всего, речь идет о динамической модели загрузки инфраструктуры, а также о методологии применения искусственного интеллекта в задачах управления перевозочным процессом [4–7]. В связи с этим актуализируются исследования в области проблем управления сложными системами, теории организационно-технологической надежности транспортной системы и ее элементов [8, 9], а также относящиеся к повышению устойчивости работы припортовых транспортно-технологиче-

ских систем (ПТТС) при интеллектуализации процессов управления перевозками [10].

Несмотря на то что железнодорожная отрасль является «зарегулированной» и перевозки осуществляются в соответствии с графиком движения, для припортовых железных дорог дополнительно формируется план подвода поездов к припортовым станциям. Планом подвода определяются нитки графика для подвода поездов в адрес припортовых станций в порядке очередности («востребованности») поезда и с учетом объема подводимого груза. План подвода связан с темпом продвижения вагонов в адрес припортовых станций. *Темп* продвижения вагонов оценивается работниками логистического центра, диспетчерским аппаратом центральной дирекции и руководством припортовых станций. При этом плановое значение количества вагонов, ежесуточно отгружаемых со станций по грузки, включаемых в сформированные составы, будет зависеть от эксплуатационной обстановки на припортовой дороге и припортовой станции. Реакция каждого уровня управления в организационной структуре зависит также от его целевой установки, и данные цели могут быть разными.

В настоящее время методологическая основа исследований проблем управления ПТТС, включая полигоны припортовых железных дорог, в условиях изменения объемов перевозок довольно разнообразна. Данное исследование связано с оценкой систем управления (трехуровневой, двухуровневой – при делегировании части функций информационно-управляющим системам и искусственному интеллекту на уровне территориальных центров фирменного транспортного обслуживания, логистических центров дирекций управления движением при планировании перевозок) и проверкой на устойчивость построенной модели их поведения. В качестве примера можно рассмотреть модели, предложенные в исследовании [10] применительно к двух- и трехуровневым конструкциям.

В рамках данного исследования предложено применить модель, определенную академиком В. И. Арнольдом с позиций опасности многоступенчатого управления, в качестве ключевого замечания выделена опасность многоступенчатого управления в различных организационных структурах разной природы [11]. При этом дается общее представление о

применении «жестких» и «мягких» математических моделей в системах управления.

В настоящей статье продолжается разработка подхода в исследовании вопросов управления ПТТС, общую методологическую основу которого составляют указанные выше концепции «жесткого» и «мягкого» математического моделирования [11]. Предложенная в [10] методика построения моделей систем управления транспортным производством с учетом интеллектуализации процессов управления развивается существенным образом. Это относится как к вопросам асимптотической устойчивости функционирования рассматриваемых систем управления транспортным производством, так и к применяемому математическому аппарату.

Заметим, что в данном исследовании не ставится задача сокращения логистических издережек в цепи поставки (такие исследования проводились ранее авторами в источниках [12, 13]). В решаемой задаче речь не идет об оптимизации времени перевозки, а исследуется влияние параметров плана подвода (в частности, количества ежесуточно отправляемых в адрес станции вагонов и – что составляет новизну выполненного исследования – *темпер* изменения этого количества). Настоящее исследование направлено на теоретическое осмысление проблем управления перевозками с учетом разной «психологии и целеполагания» каждого из субъектов, реализующих уровни управления при возможных изменениях парадигмы управления в условиях внедрения технологий искусственного интеллекта. Мы переходим к указанному исследованию путем введения соответствующего фазового пространства и рассмотрения в нем траекторий, отвечающих невозмущенному и возмущенным решениям систем дифференциальных уравнений.

Материалы и методы исследования

Для оценки исследуемых моделей системы управления и проверки их на устойчивость рассмотрим некоторую припортовую железнодорожную станцию / совокупность станций, в адрес которых направляются груженые вагоны, число которых меняется с течением времени t (сут). Для того чтобы воспользоваться методами математического анализа, будем оперировать с функциональной зависимостью $u = u(t)$, которая рассматривается как, вообще говоря, неиз-

вестная. Изложим схему функционирования системы управления вагонопотоками, которая является общей в том смысле, что между субъектами управления может иметь место различная иерархическая организация: центральная дирекция – дирекция управления движением (логистический центр) – станция.

Непосредственно планированием подвода вагонов в адрес припортовой станции занимается субъект A перевозочного процесса, который в данной ситуации оперирует *скоростью* \dot{u} изменения числа u отправляемых в адрес станции вагонов (как правило, его целью является увеличение u), в данном случае речь идет о центральной дирекции. Таким образом, в качестве математического символа, характеризующего деятельность субъекта A , следует рассматривать переменную $v = \dot{u}$ (в правой части равенства записана производная функции $u = u(t)$ по времени t).

Рассматривается также субъект B перевозочного процесса, который в данной ситуации регулирует деятельность субъекта A , а именно оперирует *скоростью* \dot{v} изменения *скорости* \dot{u} изменения числа u отправляемых вагонов в зависимости от оперативной обстановки на полигоне припортовой дороги. В качестве математического символа, характеризующего деятельность субъекта B , будем рассматривать переменную \dot{v} , которую выразим следующим образом:

$$\dot{v} = -K(u - U). \quad (1)$$

Здесь U – оптимальное число принятых к перевозке и включенных в план подвода в адрес станции выгрузки вагонов в сутки с учетом перерабатывающей способности терминалов, эксплуатационной обстановки на станции и на подходах к ней. Предполагается, что представление о числе U сформировалось у субъекта B в результате его практической деятельности. Положительным коэффициентом K характеризуется реакция субъекта B на число u отправляемых вагонов. В первую очередь на величину K влияют уровень загруженности транспортной инфраструктуры (оценка производится субъективно либо на основе данных динамической модели загрузки инфраструктуры), наличие возмущающих факторов, действие которых может привести к изменению состояния системы (обычно рассматривают нормальный режим

эксплуатационной работы, тяжелое, утяжеленное состояние [10, 14]). Как известно, управление в сложных и больших системах существенно отличается от традиционно рассматриваемого, которое принято называть оптимальным (т. е. перехода системы в желаемое состояние по некоторому оптимальному пути). Это связано с тем, например, что на транспорте определить как желаемое, так и практически достижимое состояние оказывается весьма затруднительно. Тем более невозможно выбрать и навязать системе «оптимальный» (в детерминистическом или статистическом смысле) путь перехода, поскольку структура и функции системы в общем случае не взаимоопределенны. По содержанию и механизму действия управление сложными системами, в том числе самоуправление, наиболее близко к физиологическим процессам возбуждения и торможения (внешнего и внутреннего стимулирования).

Сделаем некоторые пояснения математического характера, обратившись к основам дифференциального исчисления. Предположим, например, что $u > U$. Тогда в силу равенства (1) получаем, что $\dot{v} < 0$. Поскольку $\dot{u} = v$, то функция $\dot{u}(t)$ должна убывать. Таким образом, получается, что если $u > U$, то субъект B снижает активность деятельности субъекта A (осуществляя с ним обратную связь в процессе управления [11]).

Согласно изложенной в [11] концепции выше построена жесткая математическая модель системы управления вагонопотоками, которая записывается в форме автономной системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{u} = v, \\ \dot{v} = -K(u - U). \end{cases} \quad (2)$$

Дадим краткое описание фазового портрета системы (2). Мы не приводим соответствующего изображения, во-первых, ввиду его простоты, во-вторых, поскольку для построенной далее существенно более содержательной – «мягкой» модели приводятся и анализируются соответствующие фазовые траектории. Итак, в данном случае невозмущенному решению системы (2) с компонентами $u(t) \equiv U$ и $v(t) \equiv 0$ отвечает на фазовой плоскости (u, v) траектория, состоящая из единственной точки – точки

равновесия $(U, 0)$, которая в соответствии с общей классификацией (см., например, [15]) представляет собой *центр*. Для каждого возмущенного решения системы (2) точка $(u(t), v(t))$ отвечающей этому решению траектории с течением времени t совершает движение на фазовой плоскости. При этом описывается некоторый эллипс, проходящий по часовой стрелке.

Итак, мы переходим к использованию такого широко распространенного и весьма эффективного в различных областях прикладных исследований инструмента, как фазовое пространство (которое в данной ситуации представляет собой фазовую плоскость), и изучению поведения фазовых траекторий, отвечающих решениям рассматриваемых систем дифференциальных уравнений [12].

Обратим внимание на то, что приведенная в [10] иллюстрация показывает, что невозмущенное решение системы (2), будучи устойчивым по Ляпунову, не является асимптотически устойчивым. Для наглядности соответствующее изображение воспроизведено на рис. 1.

В настоящей работе изучаются вопросы асимптотической устойчивости систем управления вагонопотоками, описываемых моделью, которая получается в результате некоторого смягчения рассмотренной выше жесткой модели.

Выполним дезагрегирование модели, задаваемой системой (2), путем введения в правую часть второго уравнения дополнительного слагаемого. Переидем к автономной системе линейных обыкновенных дифференциальных уравнений, которая имеет вид

$$\begin{cases} \dot{u} = v, \\ \dot{v} = -K(u - U) - \varepsilon v. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь ε – положительное число, присутствие которого позволяет учитывать в модели также влияние субъекта B на деятельность субъекта A , принимая во внимание *скорость* $\dot{u} = v$ изменения числа u отправляемых вагонов. В результате обратная связь в управлении (о которой было сказано выше) между субъектами перевозочного процесса осуществляется в более полном виде.

Согласно общей теории устойчивости решений дифференциальных уравнений поведение траекторий системы (3) принципиально зависит от знака вещественных частей корней (вообще говоря, комплексных) характеристического уравнения матрицы этой системы. В рассматриваемой ситуации эти корни имеют вид

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left(-\varepsilon \pm \sqrt{\varepsilon^2 - 4K} \right). \quad (4)$$

Отметим здесь, что в качестве приложений построенной модели могут выступать и более сложные, многоуровневые транспортно-технологические системы управления с рассмотрением различных операционных сценариев.

Результаты исследования

Перейдем к изложению результатов, полученных при изучении устойчивости двухуровневой системы управления, которая функционирует в рамках «мягкой» модели, задаваемой системой дифференциальных уравнений (3). Программным обеспечением исследований является система компьютерной математики Maxima (Free Ware).

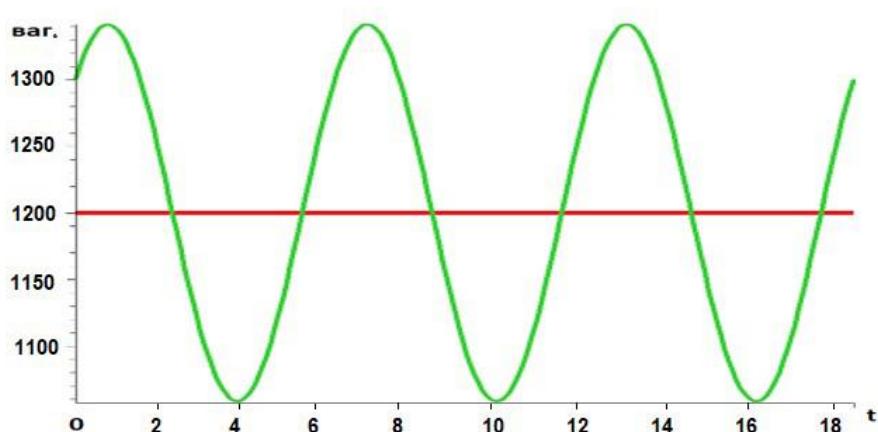


Рис. 1. График зависимости количества вагонов u от времени в случае «жесткой» модели

Как и в [10], объектом приложения модели является система управления вагонопотоками, направляемыми в адрес припортовых станций (в данном случае на примере припортовой станции Новороссийск Северо-Кавказской железной дороги). При этом в качестве оптимального значения объема выгрузки принимается $U = 1\,600$ ваг. Продемонстрируем ситуацию, когда $K = 0,9$ и $\varepsilon = 0,5$. Таким образом, предполагается, что функционирование субъекта B перевозочного процесса таково, что скорость \dot{u} изменения числа u отправляемых вагонов (каждые сутки) принимается им во внимание в меньшей степени, чем само это число (точнее, чем отклонение числа u от оптимального значения U).

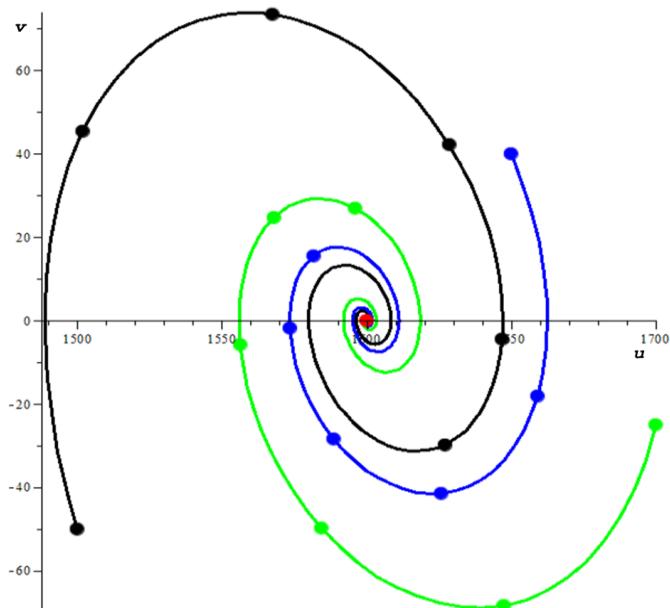
Поскольку $\varepsilon^2 - 4K = 0,25 - 3,6 = -3,35 < 0$, то, пользуясь общим выражением (4) для корней характеристического уравнения системы (3), получаем, что они являются комплексно-сопряженными числами и имеют вид

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left(-\varepsilon \pm i\sqrt{4K - \varepsilon^2} \right). \quad (5)$$

В отношении устойчивости невозмущенного решения системы (3), имеющего компоненты $u(t) \equiv U$ и $v(t) \equiv 0$, принципиальное значение имеет то, что вещественная часть корней λ_1 и λ_2 отрицательна. Поэтому в рассматриваемой ситуации траектории возмущенных решений системы располагаются на фазовой плоскости (u, v) таким образом, что

точка равновесия $(U, 0)$ является фокусом (см., например, [12]). На рис. 2 черным, синим и зеленым цветами изображены найденные Maxima траектории, которые отвечают трем возмущенным решениям системы (3), а именно решениям задачи Коши с начальными значениями $u(0)$ и $v(0)$, соответственно равными: 1 500 и -50; 1 650 и 40; 1 700 и -25. Траектория, состоящая из одной точки – точки равновесия и отвечающая невозмущенному решению, изображена красным цветом.

Приведенный на рис. 2 фрагмент фазового портрета системы дифференциальных уравнений (3) показывает, как мягкая модель системы управления обеспечивает вхождение в положение равновесия траекторий, отвечающих возмущенным решениям этой системы. На каждой траектории выделены точки, которые по времени t соответствуют 1, 2, ..., 6-м суткам с начала функционирования системы управления в рамках рассматриваемой модели. Мы видим, что траектория черного цвета приближается к точке равновесия $(1\,600, 0)$ медленнее, чем две другие траектории. Причина заключается в том, что отличие начальных значений 1 500 и -50, которым удовлетворяет частное решение системы (которому отвечает черная траектория), от оптимальных значений больше (например, в евклидовой метрике пространства R^2), чем для двух других решений.



Rис. 2. Траектории, отвечающие трем возмущенным и невозмущенному решениям системы (3)

Если для рассматриваемой припортовой станции исходить из планирования объема подводимых вагонопотоков с глубиной 3 сут, то траектория зеленого цвета оказывается расположенной к точке равновесия ближе, чем траектория черного цвета, но дальше, чем траектория синего цвета. Аналогичный результат получается при планировании с глубиной 6 сут.

Обратимся теперь к выражению компоненты $u(t)$ общего решения системы (3):

$$u(t) = \varepsilon^{-\frac{\varepsilon t}{2}} C_1 \left(\sin \frac{\sqrt{4K - \varepsilon^2 t}}{2} + \right. \\ \left. + C_2 \cos \frac{\sqrt{4K - \varepsilon^2 t}}{2} \right), \quad (6)$$

где C_1 и C_2 – произвольные вещественные постоянные.

Графики функций $u(t)$, являющихся первыми компонентами решений системы (3), интересуют нас в первую очередь. Соответствующая картина для трех рассматриваемых возмущенных решений, а также для невозмущенного решения (положения равновесия) системы приведена на рис. 3.

Как на третьи, так и на шестые сутки значение первой компоненты возмущенного решения системы (3), которому отвечает зеленая траектория, отличается от оптимального значения меньше, чем соответствующие значения первых компонент возмущенных решений, которым отвечает как черная траектория, так и синяя.

Таким образом, фазовый портрет описываемой «мягкую» модель системы дифференциальных уравнений и графики функций, выражавших посупочное число отправляемых в адрес станции вагонов, при совместном их рассмотрении предоставляют возможности для выявления устойчивости равновесия системы управления вагонопотоками не только в качественном, но и в количественном отношении.

Отметим еще, что наряду с системами дифференциальных уравнений в качестве аппарата моделирования систем управления используются системы разностных уравнений (см., например, [16]). В случае «жесткой» модели [см. систему (2)] соответствующая система разностных уравнений имеет вид

$$\begin{cases} u(t+1) - u(t) = v(t), \\ v(t+1) - v(t) = -K(u(t) - U). \end{cases} \quad (7)$$

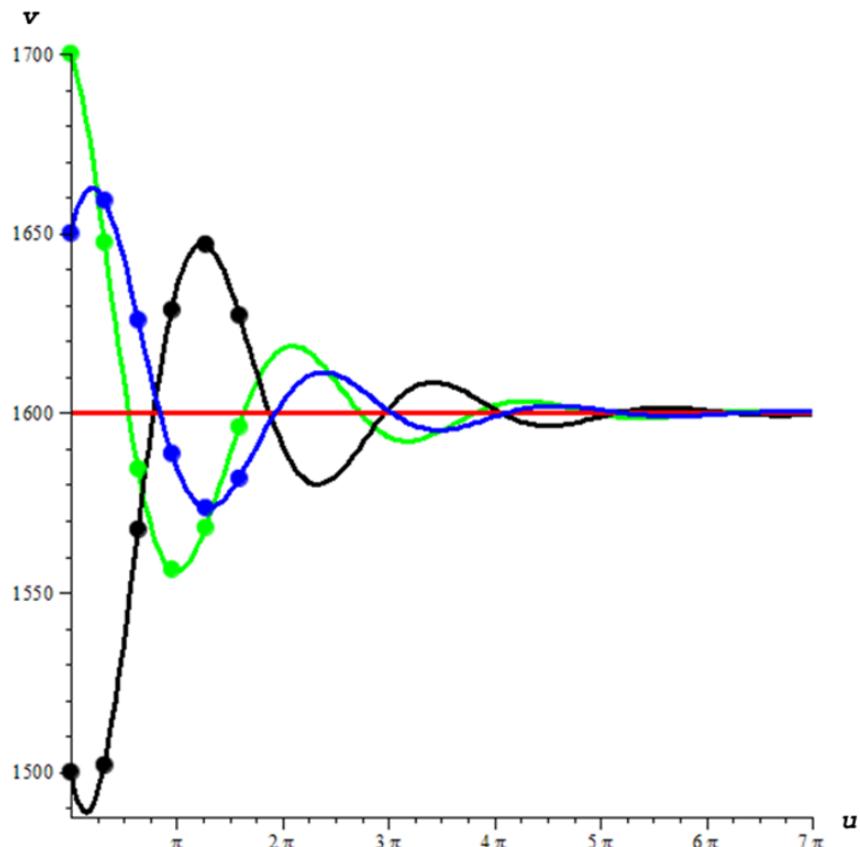


Рис. 3. Графики зависимостей $v = v(u)$, получаемых для «мягкой» модели

При этом в отношении рассматриваемых в статье вопросов устойчивости систем управления на транспорте получаются результаты, аналогичные тем, что приведены выше.

Выводы

Продолжена разработка подхода к исследованию организационно-технологической устойчивости систем управления грузопотоками на железнодорожном транспорте, имеющего в качестве общей теоретической основы «жесткие» и «мягкие» математические модели, представленные автономными системами обыкновенных дифференциальных уравнений. Посредством введения дополнительных связей между субъектами перевозочного процесса выполняется дезагрегирование «жесткой» модели двухуровневой системы управления в соответствующую «мягкую» модель.

Осуществляется переход к фазовому пространству рассматриваемой системы дифференциальных уравнений, которое в данном случае представляет собой фазовую плоскость, с изучением поведения траекторий, отвечающих невозмущенному (соответствующему положению равновесия) и возмущенным решениям этой системы. Классическими методами теории устойчивости решений дифференциальных уравнений показано, что в рамках «мягкой» модели достигается не только устойчивость в смысле Ляпунова, но и асимптотическая устойчивость си-

стемы управления вагонопотоками. Указанные результаты представляют собой, в частности, одну из теоретических основ при разработке интеллектуализированных систем управления поездо- и вагонопотоками.

Разработанная методика моделирования имеет общий характер и может быть востребована при исследовании вопросов оптимизации функционирования систем управления грузоперевозками, осуществлямыми другими видами транспорта. Система компьютерной математики предоставляет разнообразные возможности для комплексной реализации модели в программной среде и, как и традиционные аналитические преобразования и графические построения, весьма эффективно выполняет эвристическую функцию в процессе исследования. Применяемый подход в моделировании носит общий характер и может быть использован при решении задач оптимизации функционирования систем управления грузоперевозками, осуществлямыми другими видами транспорта.

Система компьютерной математики позволяет всесторонне реализовать модель в программной среде и, наряду с вычислительными процедурами, аналитическими преобразованиями и графическими построениями, является эффективным инструментом в процессе исследований.

Список источников

1. Чеботарева Е. А. Анализ мероприятий по повышению пропускной способности участков Северо-Кавказской железной дороги // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. 2022. № 1. С. 29–34. DOI 10.36535/0236-1914-2022-01-5.
2. Белоголов Ю. И., Гозбенко В. Е. Моделирование поездопотоков на участке Усть-Илимск – Хребтовая с целью увеличения пропускной способности // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 28–35. DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_28.
3. Шапкин И. Н., Осьминин А. Т. Цифровые технологии приходят на смену прежней идеологии управления перевозками // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : сборник трудов научно-практической конференции с международным участием. Москва, 2022. С. 413–431.
4. Осьминин А. Т., Вербов Д. М., Шатохин А. А. Оптимизация порожних вагонопотоков в современных условиях // Железнодорожный транспорт. 2022. № 4. С. 4–11.
5. О возможности применения в управлении железнодорожными транспортными системами и перевозочным процессом искусственного интеллекта / А. Т. Осьминин, А. Н. Баушев, И. И. Осьминина, А. А. Шатохин // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : сборник трудов научно-практической конференции с международным участием. Москва, 2022. С. 332–343.
6. Сивицкий Д. А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2 (57). С. 33–41. DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_33.

7. Veresun V., Chebotareva E., Lyabakh N. Modeling of Intuition in Human-Machine Decision-Making Complexes in the Management of Transport Systems // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Vol. 777. P. 237–246.
8. Яншина И. В. Оценка надежности организационно-технологических процессов инфраструктурных объектов железнодорожного транспорта // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3 (58). С. 60–70. DOI 10.52170/1815-9265_2021_58_60.
9. Вересун В. Д. Развитие теоретических основ организационно-технологической надежности и повышения эффективности функционирования производственных объектов железнодорожного транспорта : специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Вересун Владимир Дмитриевич. Москва, 2010. 46 с.
10. Чеботарева Е. А., Богачев В. А. Исследование организационно-технологической устойчивости системы управления вагонопотоками с использованием теории дифференциальных уравнений // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (60). С. 4–12.
11. Арнольд В. И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. Москва : Издательство МЦНМО, 2004. 32 с.
12. Вычислительный эксперимент в оптимизационном моделировании процесса мультимодальных грузоперевозок на основе эгалитарных принципов / В. А. Богачев, П. В. Куренков, Е. А. Чеботарева [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 3. С. 151–162.
13. Mathematical modeling of oil freight transportation in multi-agent transport systems / E. A. Chebotareva, V. A. Bogachev, A. S. Kravets, T. V. Bogachev // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2624 (1). DOI 10.1063/5.0132345.
14. Левин Д. Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом: монография. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. 625 с.
15. Петровский И. Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Москва : Физматлит, 2009. 207 с.
16. Пантелеев А. В., Бортаковский А. С. Теория управления в примерах и задачах : учебное пособие. Москва : Высшая школа, 2003. 583 с.

References

1. Chebotareva E. A. Analysis of measures to increase the throughput capacity of sections of the North Caucasus Railway. *Transport: Science, Technology, Management: scientific information collection*. 2022;(1):29–34. (In Russ.). DOI 10.36535/0236-1914-2022-01-5.
2. Belogolov Yu. I., Gozbenko V. E. Modeling of train flows on the Ust-Ilimsk – Khrebtovaya section in order to increase capacity. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):28–35. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_28.
3. Shapkin I. N., Osminin A. T. Digital technologies are replacing the previous ideology of transportation management Innovative technologies in railway transport: collection of proceedings of a scientific and practical conference with international participation. Moscow; 2022. P. 413–431. (In Russ.).
4. Osminin A. T., Verbov D. M., Shatokhin A. A. Optimization of empty car flows in modern conditions. *Railway Transport*. 2022;(4):4–11. (In Russ.).
5. Osminin A. T., Baushev A. N., Osminina I. I., Shatokhin A. A. On the possibility of using artificial intelligence in the management of railway transport systems and the transportation process. *Innovative Technologies in Railway Transport: collection of scientific works practical conference with international participation*. Moscow; 2022. P. 332–343. (In Russ.).
6. Sivitsky D. A. Analysis of experience and prospects for the use of artificial neural networks in railway transport. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(57):33–41. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_33.
7. Veresun V., Chebotareva E., Lyabakh N. Modeling of Intuition in Human-Machine Decision-Making Complexes in the Management of Transport Systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;777:237–246.
8. Yanshina I. V. Assessing the reliability of organizational and technological processes of infrastructure facilities of railway transport. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(58):60–70. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2021_58_60.
9. Veresun V. D. Development of the theoretical foundations of organizational and technological reliability and increasing the efficiency of functioning of production facilities of railway transport: specialty 05.02.22 Organization of production (by industry). Abstract of the Dissertation for the Degree of Doctor of Engineering. Veresun Vladimir Dmitrievich. Moscow; 2010. 46 p. (In Russ.).

10. Chebotareva E. A., Bogachev V. A. Study of the organizational and technological stability of the car flow control system using the theory of differential equations. *Bulletin of the Ural State Transport University*. 2023;(60):4–12. (In Russ.).
11. Arnold V. I. “Hard” and “soft” mathematical models. Moscow: Publishing House of the Moscow Center for Continuous Mathematical Education; 2004. 32 p. (In Russ.).
12. Bogachev V. A., Kurenkov P. V., Chebotareva E. A., Kravets A. S., Bogachev T. V. Computational experiment in optimization modeling of the process of multimodal cargo transportation based on egalitarian principles. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2022;(3):151–162. (In Russ.).
13. Chebotareva E. A., Bogachev V. A., Kravets A. S., Bogachev T. V. Mathematical modeling of oil freight transportation in multi-agent transport systems. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2624(1). DOI 10.1063/5.0132345.
14. Levin D. Yu. Theory of operational management of the transportation process: monograph. Moscow: State Educational Institution Training and Methodological Center for Education in Railway Transport; 2008. 625 p. (In Russ.).
15. Petrovskiy I. G. Lectures on the theory of ordinary differential equations. 2009. 207 p. (In Russ.).
16. Panteleev A. V., Bortakovskiy A. S. Control theory in examples and tasks: textbook. allowance. Moscow: Vysshaya shkola; 2003. 583 p. (In Russ.).

Информация об авторах

E. A. Чеботарева – заведующая кафедрой «Управление эксплуатационной работой» Ростовского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент.

В. А. Богачев – доцент кафедры прикладной математики и технологий искусственного интеллекта Ростовского государственного экономического университета, кандидат физико-математических наук.

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

Information about the authors

E. A. Chebotareva – Head of the Operational Work Management Department, Rostov State Transport University, Candidate of Engineering, Associate Professor.

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

T. V. Bogachev – Associate Professor of the Applied Mathematics and Artificial Intelligence Technologies Department, Rostov State University of Economics, Candidate of Physical and Mathematical Sciences.

Статья поступила в редакцию 03.07.2024; одобрена после рецензирования 28.08.2024; принята к публикации 12.11.2024.

The article was submitted 03.07.2024; approved after reviewing 28.08.2024; accepted for publication 12.11.2024.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 504.61

doi 10.52170/1815-9265_2024_72_45

Затухание шума на территории жилой застройки вблизи станции И при различных атмосферных состояниях

Вера Львовна Павлова^{1✉}, Елена Анатольевна Калиниченко²,
Ирина Викторовна Пирумова³, Илья Андреевич Селюнин⁴

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

¹ p_v_75@mail.ru✉

² kalinka717@mail.ru

³ Pirumova_777@mail.ru

⁴ ilya.selyunin.96@mail.ru

Аннотация. Акустическое загрязнение селитебных территорий от объектов железнодорожного транспорта – актуальная научная и техническая проблема. В рамках поиска приемлемых решений этой задачи рассматриваются особенности генерации звука в источнике и специфика распространения шума на территории с целью определения всех возможных способов защиты населения от шума. Железнодорожная станция И по основному назначению и характеру выполняемой работы является двусторонней сортировочной станцией с последовательным расположением парков и параллельным расположением систем, по объему работы отнесена к внеклассной. Для расформирования и формирования поездов на станции имеются две автоматизированные горки большой мощности. Процесс роспуска подвижного состава – основная причина значительного акустического загрязнения прилегающей зоны жилой застройки.

Скорость и расстояние передачи звука зависят от среды, в которой он распространяется. Например, при температуре воздуха 20 °C, нормальном атмосферном давлении (760 мм рт. ст.) и нормальной относительной влажности (от 40–60 %) средняя скорость звука составляет 343 м/с. Воздушная среда имеет параметры, которые в значительной степени влияют на траекторию, скоростные характеристики и дальность звуковой волны. Воздействие оказывают влажность воздуха, направление и скорость воздушных масс, температура воздуха и другие факторы.

Физическое состояние атмосферы закладывается в расчетную формулу затухания в виде коэффициентов, которые интегрально учитывают сочетание температуры, влажности, скорости движения воздуха. Процесс затухания также во многом зависит от рельефа местности, имеющихся преград на пути звуковой волны. Эти особенности местности и климатическое состояние среды во многом определяют выбор и проектирование систем защиты от акустического загрязнения. Расчетным способом, путем введения в формулу изолирующую способность средства защиты, определяется наличие или отсутствие превышения предельно допустимого уровня звукового давления в заданной точке (жилое здание).

В статье рассмотрены особенности распространения и затухания шума в атмосфере на прилегающей к станции территории при различных погодных условиях и вариантах защиты.

Ключевые слова: акустическое загрязнение, звуковая волна, шум, селитебная территория, затухание шума, системы защиты от шума

Для цитирования: Затухание шума на территории жилой застройки вблизи станции И при различных атмосферных состояниях / В. Л. Павлова, Е. А. Калиниченко, И. В. Пирумова, И. А. Селюнин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 45–51. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_45.

TRANSPORT

Original article

Noise attenuation in residential areas near the station and under various atmospheric conditions

Vera L. Pavlova^{1✉}, Elena A. Kalinichenko², Irina V. Pirumova³, Ilya A. Selyunin⁴

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

¹ p_v_75@mail.ru✉

² kalinka717@mail.ru

³ Pirumova_777@mail.ru

⁴ ilya.selyunin.96@mail.ru

Abstract. Acoustic pollution of residential areas from railway transport facilities is an urgent scientific and technical problem. As part of the search for acceptable solutions to this problem, the features of sound generation in the source and the specifics of noise propagation in the territory are considered in order to determine all possible ways to protect the population from noise. The railway station, both by its main purpose and the nature of the work performed, is a two-way marshalling yard with a sequential arrangement of parks and parallel arrangement of systems, and is classified as extracurricular in terms of the volume of work. There are two automated high-capacity slides at the station for disbanding and forming trains. The process of disbanding rolling stock is the main cause of significant acoustic pollution of the adjacent residential area.

The speed and distance of sound transmission depends on the medium in which it is distributed. For example, at an air temperature of 20 °C, normal atmospheric pressure (760 mmHg) and normal relative humidity (from 40–60%), the average speed of sound is 343 m/s. The air environment has parameters that significantly affect the trajectory, speed characteristics and range of the sound wave. The effect is exerted by air humidity, the direction and speed of air masses, air temperature and other factors. The physical state of the atmosphere is incorporated into the calculated attenuation formula in the form of coefficients that integrally take into account the combination of temperature, humidity, and air velocity. The attenuation process also largely depends on the terrain, the existing obstacles in the path of the sound wave.

These terrain features and the climatic state of the environment largely determine the choice and design of acoustic pollution protection systems. By calculating, by entering the insulating capacity of the protective equipment into the formula, we determine the presence or absence of exceeding the maximum permissible sound pressure level at a given point (residential building).

In the article, we will consider the features of the propagation and attenuation of noise in the atmosphere in the territory adjacent to the station under various weather conditions and protection options.

Keywords: acoustic pollution, sound wave, noise, residential area, noise attenuation, noise protection systems

For citation: Pavlova V. L., Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Selyunin I. A. Noise attenuation in residential areas near the station and under various atmospheric conditions. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2024;(72):45–51. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_45.

Введение

Под акустическим загрязнением окружающей среды понимают раздражающий шум антропогенного происхождения (искусственно созданный человеком), нарушающий жизнедеятельность живых организмов и человека. Акустическое загрязнение селитебных территорий от объектов железнодорожного транспорта – актуальная научная и техническая проблема. В рамках поиска приемлемых решений этой задачи рассматриваются особенности генерации звука в источнике и специфика распространения шума на территории с целью определения всех возможных способов защиты населения от шума.

Железнодорожная станция *И* по основному назначению и характеру выполняемой работы является двусторонней сортировочной станцией с последовательным расположением парков и параллельным расположением систем, по объему работы отнесена к внеклассной. Для расформирования и формирования поездов на станции имеются две автоматизированные горки большой мощности. Процесс роспуска подвижного состава – основная причина значительного акустического загрязнения прилегающей зоны жилой застройки.

Процесс генерации звука в момент прохождения обода колеса через тормозную ко-

лодку, описание и технические характеристики тормозных позиций рассмотрены в работах [1–4]. В данной статье рассмотрим особенности распространения и затухания шума в атмосфере на прилегающей к станции территории при различных погодных условиях и вариантах защиты.

Скорость и расстояние передачи звука зависят от среды, в которой он распространяется. Например, при температуре воздуха 20 °C, нормальном атмосферном давлении (760 мм рт. ст.) и нормальной относительной влажности (от 40–60 %) средняя скорость звука составляет 343 м/с. Воздушная среда имеет параметры, которые в значительной степени влияют на траекторию, скоростные характеристики и дальность звуковой волны. Воздействие оказывает влажность воздуха, направление и скорость воздушных масс, температура воздуха и другие факторы.

В прогретом воздухе молекулы движутся быстрей, что повышает скорость распространения звука. Если теплый воздух характеризуется повышенной влажностью (более 75 %), то звуковая волна будет распространяться еще интенсивней.

Кроме того, низкая температура воздуха у поверхности Земли способствует более дальнему распространению звука, так как звуковая

волна меньше подвержена искривлению и изменению траектории из-за разностей температур. Звук стремится в более холодное пространство, где скорость распространения ниже [5].

Атмосфера характеризуется перепадами температуры и скорости движения воздуха, что делает ее разнородной средой, обуславливающей переменную скорость звука. Это приводит к преломлению звуковой волны. Поскольку скорость распространения звука зависит от температуры, в разных слоях атмосферы, температура слоев которых различна, звук будет иметь разную скорость [5]. В среде с переменным показателем преломления звуковые волны будут распространяться по кривым линиям. При этом, как показывают многочисленные опыты, луч загибается всегда так, что расстояние от точки к точке волна проходит за самое короткое время. Иначе говоря, распространяющаяся в неоднородной среде волна изменяет направление так, чтобы продлить свой путь в среде с большей скоростью распространения и сократить его в слоях, где скорость распространения меньше [5].

Наблюдается следующая тенденция распространения звука в разных слоях атмосферы: в дневное время звуковые лучи изменяют свою траекторию, двигаясь вверх, это связано с понижением температуры воздуха при удалении от поверхности Земли, при температурной инверсии (снижении температуры у поверхности Земли) наблюдается обратное направление звуковой волны. Поэтому в первом случае возникают зоны тишины на небольшом расстоянии от источника, а во втором – звук распространяется на значительно большие расстояния, особенно в ночное время. Учитывая, что в ночное время нервная система человека наиболее уязвима к шумовому воздействию, такой «температурный феномен» усугубляет воздействие шума на организм, и это следует учитывать при расчете затухания. Наличие водоема рядом с источником шума также увеличивает дальность распространения из-за слабого поглощения звуковых волн водной поверхностью. То есть в летнюю ночь у водного объекта даже незначительный шум будет слышен на расстоянии нескольких километров. Если температура воздуха с высотой изменяется незначительно и

скорость движения воздуха мала, то звук от источника распространяется без заметного преломления и изменения траектории. При наличии ветра его скорость и скорость звуковой волны складываются. Поэтому по ветру звук слышен дальше, чем против ветра.

Поскольку движение воздушных масс в атмосфере всегда беспорядочное, скорость и температура в каждой точке воздушного потока изменяются по величине и направлению. Это обусловливает в атмосфере мелкие неоднородности и, как следствие, более значительное затухание звука.

Методы исследования

Для расчета затухания шума от тормозных позиций сортировочной горки станции *И* был использован метод, приведенный в ГОСТ 31.295.1–2005 «Шум. Затухание звука при распространении на местности» [6]. Данный стандарт устанавливает метод расчета затухания звука вследствие поглощения его при распространении в атмосфере в различных метеорологических условиях.

Затухание звука чистого тона характеризуется коэффициентом затухания, зависящим от частоты тона, температуры и относительной влажности воздуха, атмосферного давления. Результаты расчета коэффициента затухания представляют в табличной форме для следующих условий:

- частота звука от 50 до 10 000 Гц;
- температура от –20 до +50 °C;
- относительная влажность от 10 до 100 %;
- атмосферное давление 101, 325 кПа (1 стандартная атмосфера) [6].

Стандарт применим для однородной атмосферы, но может быть использован для определения поправок к измеренным уровням звукового давления, чтобы учесть влияние изменения метеорологических условий на поглощение звука.

В стандарте рассмотрены основные механизмы звукопоглощения атмосферой при отсутствии густого тумана или механических загрязнений [6].

Измерения шума у тормозной позиции были проведены в соответствии с [7].

При проведении исследования были выполнены измерения следующих акустических характеристик:

- эквивалентного уровня звука, дБА;
- максимального уровня звука, дБА;
- эквивалентного уровня звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами в диапазоне от 31,5 до 8 000 Гц (1/1 и 1/3) [2, 3];
- максимального уровня импульсного звука, дБА;
- пикового уровня звука, дБС;
- фонового эквивалентного уровня звука, дБА.

Измерения были проведены как в дневное, так и в ночное время. Результаты и анализ проведенных измерений частично представлены в работах [2–4].

Для получения достоверных результатов измерения акустических параметров должны выполняться при следующих условиях:

- 1) скорость ветра во время измерений не должна превышать 5 м/с;
- 2) остальные метеорологические параметры принимаются по официальным данным метеослужбы;
- 3) измерения не могут проводиться во время выпадения осадков, при тумане;
- 4) целесообразно измерять шумовые характеристики транспортных потоков в дневной период суток в интервале от 7 до 23 ч [2, 3].

Для измерения параметров шума и вибрации использовался шумомер, виброметр, анализатор спектра «ЭКОФИЗИКА-110А». Поскольку подойти достаточно близко к тормозной позиции не представляется возможным, измерения были проведены на расстоянии 3 м от источника. Ближайшие жилые дома расположены на расстоянии 120 м от источника.

Результаты исследований

Эквивалентные октавные уровни звукового давления на расстоянии 120 м от тормозной позиции $L_{p_{120}}$, дБ, определены по эквивалентным октавным уровням звукового давления на расстоянии 3 м от нее L_{p_3} , по формуле

$$L_{p_{120}} = L_{p_3} - \alpha_1 s - \Delta L, \quad (1)$$

где α_1 – коэффициент затухания вследствие звукопоглощения атмосферой на среднегеометрической частоте f ; s – длина траектории распространения звука, м; ΔL – затухание по другим причинам, не связанным со звукопоглощением атмосферой, дБ.

Принято, что затухание по другим причинам составляет 30,5 дБ и не зависит от частоты.

Длину траектории распространения звука определяют по [6], в расчетах она составляет 0,117 км. Последовательность и результаты расчета представлены в табл. 1–3.

По результатам расчетов можно сделать выводы о значительном превышении предельно допустимого уровня звукового давления (ПДУ) [8–12], начиная с частоты 500 Гц, что говорит о необходимости применения средств или систем защиты.

Экранирование является одним из наиболее эффективных и доступных в практической плоскости способов защиты селитебной территории от шума железнодорожного транспорта. Экраны, устанавливаемые на пути распространения звуковой волны, должны иметь определенные физические характеристики и линейные размеры, чтобы в нужной точке селитебной зоны соблюдалось значение предельно допустимого уровня звукового давления. Наполнение и конструкцию экрана

Таблица 1

Расчет затухания звуковой волны в атмосфере

f , Гц	$L_{p_{120}}$, дБ	Коррекция по частотной характеристике A , дБ	$L_{pA_{500}}$, дБА	ПДУ, дБ	Превышение ПДУ, дБ
31,5	52,7	-39,4	13,3	79	-65,7
63	50,2	-26,2	24,0	63	-39,0
125	46,0	-16,1	29,9	52	-22,1
250	48,2	-8,6	39,6	45	-5,4
500	52,1	-3,2	48,9	39	9,9
1 000	56,3	0	56,3	35	21,3
2 000	80,1	1,2	81,3	32	49,3
4 000	73,2	1,0	74,2	30	44,2
8 000	48,8	-1,1	47,7	28	19,7

Таблица 2

Расчет затухания звуковой волны при использовании экрана из акустических трехслойных сэндвич-панелей с наполнителем из пенополиизоцианурата (ПИР) толщиной 100 мм

f , Гц	ΔL_s , дБ	L_{p120} , дБ	Коррекция по частотной характеристики A , дБ	L_{pA120} , дБА	ПДУ, дБ	Превышение ПДУ, дБ
31,5	—	52,7	-39,4	—	79	—
63	—	50,2	-26,2	—	63	—
125	16	46,0	-16,1	13,9	52	-38,1
250	22	48,2	-8,6	17,6	45	-27,4
500	27	52,1	-3,2	21,9	39	-17,1
1 000	35	56,3	0	21,3	35	-13,7
2 000	42	80,1	1,2	39,3	32	7,3
4 000	42	73,2	1,0	32,2	30	2,2
8 000	38	48,8	-1,1	9,7	28	-18,3

Таблица 3

Расчет снижения уровня звука при использовании экрана из перфорированной панели $1\ 000 \times 1\ 000 \times 25$ Верстакофф 113001v.2

f , Гц	L_{p120} , дБ	Коррекция по частотной характеристики A , дБ	L_{pA120} , дБА	ПДУ, дБ	Превышение ПДУ, дБ
31,5	52,7	-39,4	—	79	—
63	50,2	-26,2	—	63	—
125	46,0	-16,1	15	52	-37
250	48,2	-8,6	16	45	-29
500	52,1	-3,2	24	39	-15
1 000	56,3	0	34	35	-1
2 000	80,1	1,2	37	32	5
4 000	73,2	1,0	39	30	9
8 000	48,8	-1,1	—	28	—

можно варьировать в зависимости от текущих условий, характеристик источника, реальных экономических возможностей. Рассмотрим возможности затухания звуковой волны при использовании экранов с некоторыми типовыми наполнителями.

Для расчета уменьшения эквивалентных октавных уровней звукового давления на расстоянии 120 м от тормозной позиции экраном из акустических трехслойных сэндвич-панелей с наполнителем из пенополиизоцианурата (ПИР) толщиной 100 мм вычитаем величину снижения за счет применения экрана, которая зависит от характеристик выбранного способа защиты [2, 3]:

$$L_{p120} = L_{p_3} - \alpha_1 s - \Delta L - \Delta L_s, \quad (2)$$

где ΔL_s – снижение уровня звука преградой (экраном), дБ.

По результатам расчетов можно сделать вывод, что в целом экран работает достаточно эффективно, незначительное превышение предельно допустимого уровня [8–10] наблюдается на частотах 2 000 и 4 000 Гц (см. табл. 2).

Рассмотрим затухание звуковой волны с использованием экрана из перфорированной панели $1\ 000 \times 1\ 000 \times 25$ Верстакофф 113001v.2.

Полученные значения снижения уровня звукового давления экраном из перфорированной панели $1\ 000 \times 1\ 000 \times 25$ Верстакофф 113001v.2 позволяют сделать вывод о возможности применения такого типа защитного средства с достаточно высокой эффективностью, незначительное превышение ПДУ наблюдается на частотах 2 000 и 4 000 Гц (см. табл. 3).

Выводы

На основании проведенного исследования можно заключить следующее:

1. На распространение звуковой волны в атмосфере влияют характеристики ее физических параметров, а именно: температура, влажность, скорость и направление движения воздуха. Физическое состояние атмосферы закладывается в расчетную формулу затухания в виде коэффициентов, которые интегрально учитывают сочетание параметров воздушной среды. Процесс затухания также во многом зависит от рельефа

местности, имеющихся преград на пути звуковой волны. Эти особенности местности и климатическое состояние среды во многом определяют выбор и проектирование систем защиты от акустического загрязнения.

2. В расчетную формулу затухания звуковой волны, кроме полученных при измерении данных, была введена изолирующая способность различных средств защиты (экранов) и определено наличие или отсутствие превышения предельно допустимого уровня звукового давления в заданной точке (жилое здание).

3. Результаты расчетов показывают, что существующие типы экранов достаточно эффективны, но превышение ПДУ наблюдается на среднегеометрических частотах 2 000 и 4 000 Гц.

4. Необходимо использовать дополнительные способы защиты, например: низкие экраны («юбки»), установленные непосредственно у тормозных позиций сортировочной горки; шумозащитные жалюзи на окнах жилых зданий. Расчет и проектирование таких способов защиты ведется коллективом авторов в настоящее время.

Список источников

1. Рекомендации по выбору шумозащитных мероприятий для защиты от шума железной дороги / А. В. Шабарова, С. С. Борцова, М. В. Буторина, С. А. Кондратьев // Noise Theory and Practice. 2023. Т. 9, № 4 (35). С. 39–50.
2. Comparative analysis of noise reduction methods in car braking process on classification hump yards / Е. А. Калиниченко, И. В. Пирумова, Р. Г. Актыяров, В. В. Бондаренко // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 61. P. 526–531.
3. Павлова В. Л., Пирумова И. В., Калиниченко Е. А. Технико-экономическая эффективность систем защиты селитебных территорий от шума вагонных замедлителей // Вопросы новой экономики. 2022. № 1 (61). С. 80–86.
4. Защита селитебных территорий от шума сортировочной станции / Е. А. Калиниченко, И. В. Пирумова, А. А. Басалаева, В. Л. Павлова // Железнодорожный транспорт. 2022. № 5. С. 42–45.
5. Распространение звука в разных температурных условиях // СтопЗвук54 : [сайт]. URL: <https://stopzvuk54.ru/stati> (дата обращения: 12.10.2024).
6. ГОСТ 31.295.1-2005 (ИСО 9613-1:1993). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 1. Расчет поглощения звука атмосферой : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 июля 2006 г. № 134-ст // Гарант : информационно-правовое обеспечение : [сайт]. URL: <https://base.garant.ru/70409744/?ysclid=m2v6qfbd3y449815796> (дата обращения: 12.10.2024).
7. МУК 4.3.3722–21. Контроль уровня шума на территории жилой застройки, в жилых и общественных зданиях и помещениях : утверждены Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 27 декабря 2021 г. // Гарант : информационно-правовое обеспечение : [сайт]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403287707/?ysclid=m2v6ltge4r961051563> (дата обращения: 12.10.2024).
8. СанПиН 1.2.3685–2. Гигиенические нормативы к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2. URL: https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf (дата обращения: 12.10.2024).
9. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения : Федеральный закон № 52-ФЗ : принят Государственной думой 12 марта 1999 г. : одобрен Советом Федерации 17 марта 1999 г. : последняя редакция // КонсультантПлюс : надежная правовая поддержка : [сайт]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22481/?ysclid=m2v6zvw4ty98967052 (дата обращения: 12.10.2024).
10. Об охране окружающей среды : Федеральный закон № 7-ФЗ : принят Государственной думой 20 декабря 2001 г. : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 г. : последняя редакция // КонсультантПлюс : надежная правовая поддержка : [сайт]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/?ysclid=m2v71jgesp296805337 (дата обращения: 12.10.2024).
11. СанПиН 2.1.3684–21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организаций и проведению санитарно- противоэпидемических (профилактических) мероприятий : утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 3 // Гарант : информационно-правовое обеспечение : [сайт]. URL: <https://base.garant.ru/400289764/?ysclid=m2v7426rme402584654> (дата обращения: 12.10.2024).
12. О защите прав потребителей : Закон РФ от 07.02.1992 № 2300-1 : ред. от 08.08.2024 // КонсультантПлюс : надежная правовая поддержка : [сайт]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_305/?ysclid=m2v763baic872458787 (дата обращения: 12.10.2024).

References

1. Shabarova A. V., Bortsova S. S., Butorina M. V., Kondratyev S. A. Recommendations on the selection of noise protection measures for railway noise protection. *Noise Theory and Practice*. 2023;9(35):39–50. (In Russ.).
2. Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Akhtyamov R. G., Bondarenko V. V. Comparative analysis of noise reduction methods in car braking process on classification hump yards. *Transportation Research Procedia*. 2022;61:526–531.
3. Pavlova V. L., Pirumova I. V., Kalinichenko E. A. Technical and economic efficiency of residential areas protection systems from the noise of carriage retarders. *Issues of the New Economy*. 2022;(61):80–86. (In Russ.).
4. Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Basalaeva A. A., Pavlova V. L. Protection of residential territories from the noise of the marshalling yard. *Railway Transport*. 2022;(5):42–45. (In Russ.).
5. Sound propagation in different temperature conditions. *StopZvuk54: [site]*. (In Russ.). URL: <https://stopzvuk54.ru/stati>.
6. GOST 31.295.1–2005 (ISO 9613-1:1993). Noise. Sound attenuation during propagation on the ground. Part 1. Calculation of sound absorption by the atmosphere: enacted by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of 20 July 2006 No. 134-st. *Garant: information and legal support: [site]*. (In Russ.). URL: <https://base.garant.ru/70409744/?ysclid=m2v6qfb3y449815796>.
7. MUK 4.3.3722-21 Noise level control in residential buildings, residential and public buildings and premises. Approved by the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare on 27.12.2021). *Garant: information and legal support: [site]*. (In Russ.). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403287707/?ysclid=m2v6ltge4r961051563>.
8. SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic standards for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Approved by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation from 28.01.2021 № 2. (In Russ.). URL: https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf.
9. On sanitary-epidemiological well-being of the population: Federal Law No. 52-FZ: adopted by the State Duma on 12 March 1999: approved by the Federation Council on 17 March 1999: last edition. *ConsultantPlus: reliable legal support: [site]*. (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22481/?ysclid=m2v6zvw4ty98967052.
10. On Environmental Protection: Federal Law No. 7-FZ: adopted by the State Duma on 20 December 2001: approved by the Federation Council on 26 December 2001: last edition. *ConsultantPlus: reliable legal support: [site]*. (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/?ysclid=m2v71jgesp296805337.
11. SanPiN 2.1.3684-21 Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of the territories of urban and rural settlements, water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soil, living quarters, operation of industrial, public premises, organisation and conduct of sanitary and antiepidemic (preventive) measures: approved by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 28.01.2021 № 3. *Garant: information and legal support: [site]*. (In Russ.). URL: <https://base.garant.ru/400289764/?ysclid=m2v7426rme402584654>.
12. About protection of the rights of consumers: the Law of the Russian Federation from 07.02.1992 № 2300-1: edition from 08.08.2024. *ConsultantPlus: reliable legal support: [site]*. (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_305/?ysclid=m2v763baic872458787.

Информация об авторах

- В. Л. Павлова – доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат экономических наук.
- Е. А. Калиниченко – аспирант, старший преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.
- И. В. Пирумова – доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат биологических наук.
- И. А. Селюнин – аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

- V. L. Pavlova – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Life Safety Department, Siberian Transport University.
- E. A. Kalinichenko – Postgraduate, Senior Lecturer of the Life Safety Department, Siberian Transport University.
- I. V. Pirumova – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Life Safety Department, Siberian Transport University
- I. A. Selyunin – Postgraduate of the Life Safety Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 14.10.2024; одобрена после рецензирования 07.11.2024; принята к публикации 12.11.2024.

The article was submitted 14.10.2024; approved after reviewing 07.11.2024; accepted for publication 12.11.2024.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 652.2.086.1
doi 10.52170/1815-9265_2024_72_52

Графические модели управления организационно-технологическими процессами содержания и ремонта линейно-рассредоточенных объектов

Валерий Степанович Воробьев¹, Ирина Викторовна Яншина^{2✉}

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

¹ vorobjevvs@yandex.ru

² esirinka@yandex.ru✉

Аннотация. В статье основное внимание сосредоточено на представлении графических моделей управления организационно-технологическими процессами содержания и ремонта линейно-рассредоточенных объектов в виде оперограмм информационных потоков как инструментов оценки надежности организационно-технологических процессов в рамках деятельности центра управления инфраструктуры центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД». Рассмотрена методика оценки эффективности управления инфраструктурным комплексом, позволяющая сокращать потери путем уменьшения влияния человеческого фактора.

Целью настоящего исследования являлось графическое моделирование информационных процессов содержания и ремонта инфраструктурных элементов железной дороги. Структура графических моделей в статье представлена в виде графа с множеством вершин и дуг, символизирующих исполнителей и информационные связи между ними. Информационные потоки, циркулирующие в системе, приняты подчиняющимися законам Пуассона, время их обработки – показательному закону. Предложен алгоритм моделирования информационных процессов, состоящий из восьми позиций: обоснования графа информационных взаимосвязей операций по управлению выявленными отказами технических средств железнодорожного пути; описания графа системой дифференциальных уравнений; моделирования информационных потоков; анализа вероятностей выполнимости операций и цикла управления выявленными отказами; расчета коэффициента загрузки участников структурных подразделений; изменения их числа и продолжения моделирования информационных процессов. Изложена процедура формирования информационного потока по выявлению отказов путеизмерительным вагоном и последовательность принятия решений по их устранению. Предложенный подход позволяет применить метод оптимизации продолжительности восстановительных работ и оценить организационную надежность технологических процессов текущего содержания и ремонта объектов инфраструктуры железной дороги.

Ключевые слова: транспорт, надежность, человеческий фактор, модель, инфраструктура

Для цитирования: Воробьев В. С., Яншина И. В. Графические модели управления организационно-технологическими процессами содержания и ремонта линейно-рассредоточенных объектов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 52–57. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_52.

TRANSPORT

Original article

Graphical models for managing organizational and technological processes of maintenance and repair of linearly dispersed objects

Valery S. Vorobyev¹, Irina V. Yanshina^{2✉}

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

¹ vorobjevvs@yandex.ru

² esirinka@yandex.ru✉

Abstract. The article focuses on the presentation of graphical models for managing organisational and technological processes of maintenance and repair of line-dispersed facilities in the form of information flow operograms as tools for assessing the reliability of organisational and technological processes within the framework of the activities of the infrastructure management center of the Central Infrastructure Directorate of Russian Railways. At this stage of research, the main attention is focused on the methodology for assessing the efficiency

of infrastructure complex management that makes it possible to reduce losses from reducing the influence of the human factor.

The purpose of this study was the graphical modeling of information processes of maintenance and repair of railroad infrastructure elements. The structure of graphical models in the article is presented in the form of a graph with a set of vertices and a set of arcs symbolizing performers and information links between them. Information flows circulating in the system are assumed to obey Poisson's law, and the time of their processing is assumed to obey the exponential law. The algorithm of modeling of information processes consisting of eight positions is offered: justification of the graph of information interrelations of operations on management of revealed failures of technical means of railway track; description of the graph by the system of differential equations; modeling of information flows; analysis of probabilities of fulfillment of operations and cycle of management of revealed failures; calculation of the coefficient of loading of participants of structural divisions; change of their number and continuation of modeling of information processes. The procedure of formation of the information flow of detecting failures by a track measuring car and the sequence of decision-making on their elimination is outlined. The proposed approach makes it possible to apply the method of optimizing the duration of restoration work and assess the organizational reliability of technological processes of current maintenance and repair of railroad infrastructure facilities.

Keywords: artificial base, silty sand, soil subsidence, laboratory modeling, compaction factor

For citation: Vorobyev V. S., Yanshina I. V. Graphical models for managing organizational and technological processes of maintenance and repair of linearly dispersed objects. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2024;(72):52–57. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_52.

Введение

В настоящее время на железных дорогах ОАО «РЖД» при решении задач реконструкции железнодорожного пути, капитальном ремонте, текущем содержании инженерных сооружений руководствуются Положением о системе ведения путевого хозяйства, в котором изложены виды, назначение и состав путевых работ при техническом обслуживании пути. Однако вопросам управления организационно-технологическими процессами не уделено достаточного внимания. Особенно это касается проблем планирования продолжительности времени проведения организационных и технологических операций, нарушение которых приводит к различным последствиям, вплоть до задержки поездов.

Известны работы по исследованию таких процессов. В диссертации «Оценка надежности организационно-технологических процессов инфраструктурных объектов на транспорте» [1] отражены проблемы задержки поездов из-за отказов технических средств инфраструктуры. В статьях «Построение оперограмм устранения неисправности при организации текущего содержания пути» и «Оперограммы в структуре центра управления содержанием инфраструктуры» [2, 3] предложена имитационная модель проведения ремонтов верхнего строения пути. Известны также работы [4–8], в которых отсутствует наглядное и доступное представление организационно-технологических процессов содержания и ремонта линейно-рассредоточенных объектов, в том числе информационного

моделирования информационных процессов, в виде графов состояний.

Материалы и методы исследования

Авторы предлагают графические модели информационных процессов содержания и ремонта инфраструктурных элементов железной дороги, позволяющие выполнить расчет потребности в специалистах по подразделениям инфраструктурного комплекса, обеспечивающих качественное управление в установленные сроки. При наличии устоявшейся программы работ и технологии планирования в организации моделирование информационного процесса планирования необходимо осуществлять для разработки мероприятий по совершенствованию системы управления.

Структура графических моделей, представляемых оперограммами, и циркулирующие в них потоки информации могут быть изображены в виде графа $G(X,U)$, где X – множество вершин, $X = \emptyset$; U – множество дуг, $X \neq \emptyset$.

Вершины графа символизируют исполнителей, выполняющих операции выявления отказов и восстановления технических средств, а дуги – информационные связи между исполнителями. При моделировании информационных процессов большое распространение получили методы математического программирования и аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений [9]. В описываемой модели информационных процессов каждая вершина графа трактуется как i -е звено системы, в котором находится информационная заявка. В соответствии с [10–12] граф связей описы-

вается системой дифференциальных уравнений, в которых принято среднее число заявок, находящихся в i -м звене в момент времени t , $\lambda_{ij}(t)$ – интенсивность потока заявок i -го звена в j -е, она зависит от числа специалистов или технических средств преобразования информации в k -м ($k = 1, m$) звене (структурном подразделении); m – число звеньев в системе. Авторы использовали для описания информационных графов, представленных оперограммами, теорию массового обслуживания.

Статистическими исследованиями установлено, что операционные потоки, циркулирующие в системе, подчиняются закону Пуассона, а время их обработки распределено по показательному закону. Каждое i -е звено графа представлено i -м состоянием. Алгоритм моделирования информационных процессов предусматривает выполнение следующих шагов:

1. Обоснование графа информационных взаимосвязей операций по управлению выявленными отказами технических средств железнодорожного пути.

2. Описание графа информационных взаимосвязей операций по управлению выявленными отказами технических средств железнодорожного пути системой дифференциальных уравнений Колмогорова.

3. Моделирование информационных потоков по управлению выявленными отказами технических средств железнодорожного пути.

4. Анализ вероятностей устранения отказов технических средств железнодорожного пути.

5. Расчет и анализ вероятности выполнения цикла управления выявленными отказами технических средств железнодорожного пути.

6. Расчет коэффициента загрузки (использования) участников структурных подразделений, занятых управлением выявления отказов технических средств железнодорожного пути.

7. Изменение числа участников структурных подразделений, занятых выявлением отказов технических средств железнодорожного пути.

8. Продолжение моделирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Для формирования графической модели информационных потоков предлагается использовать оперограммы, включающие наименование операций, исполнителей и

сроки выполнения. Для наглядности разработана графическая модель организационно-технологических операций по управлению выявленными отказами технических средств железнодорожного пути (таблица).

Исходной информацией для формирования информационного потока является процедура выявления отказов путеизмерительным вагоном, которая производится в период измерения параметров пути путеизмерительным вагоном. Результаты данных измерений после расшифровки начальником путеизмерительного вагона передаются руководителю дистанции пути.

На этом этапе образуется встречный информационный поток с целью согласования параметров выявленных неисправностей пути. В случае подтверждения отказов технических средств железнодорожного пути (ТСЖДП) в течение 10 мин начальником вагона выдается предупреждение об ограничении скорости по неисправности ТСЖДП для исполнения дирекции службы пути, ДНШ (П) и машинисту поезда. Руководитель дистанции пути (ПЧ) информирует о выданном ограничении скорости по неисправности 4-й степени ПЧУ, ПД, ПДБ. Кроме того, начальник вагона передает информацию о нарушении 4-й степени диспетчеру ДИЦДМ, который в течение 10–15 мин с момента получения информации передает ее диспетчеру ДИЦУСИ-П, он информирует диспетчера ПЧ/ИЧ, а тот передает ПЧУ, ПД, ПДБ. Последний после получения задания от руководителя ПЧ/ИЧ на исправление неисправностей выдает предупреждение на производство работ по их устранению машинисту поезда и диспетчеру ПЧ/ИЧ. На выполнение всех предыдущих операций отводится 1 ч с момента выдачи предупреждения. В течение 1–24 ч (в среднем 4 ч) с момента выдачи предупреждения осуществляется организация и непосредственно выполнение работ по устранению. После окончания работ в течение 10–15 мин производится информирование диспетчера ДИЦУСИ-П об устранении, который информирует руководителя дистанции пути. Последний отдает команду на проверку фактического устранения отступлений 4-й степени, отменяет ограничение скоростей и информирует ДСП/ДНЦ и машиниста поезда. Кроме того, информацию об отмене предупреждения и

Фрагмент графической модели организационно-технологических операций по управлению выявленными отказами технических средств железнодорожного пути (идеальная схема, вариант ДИЦУСИ с участием ЕК АСУИ)

Наименование операции	Исполнители операций процесса							Продолжительность выполнения операций
	Начальник вагона	Руководитель ПЧ/ИЧ ДСП/ДНЦ	Машинист поезда ПЧУ, ПД, ПДБ	Диспетчер ПЧ/ИЧ	Диспетчер ДИЦУСИ-П Диспетчер ДИЦДМ	Техник окохотка		
1. Выявление отказа путеизмерительным вагоном								В период проведения измерений
2. Передача информации об отказе ТСЖДП								До 10 мин с момента обнаружения отказа
3. Принятие решений об ограничении скорости движения поездов								До 5 мин с момента принятия решения об ограничении скорости движения
4. Информирование о принятом решении по отказу								10–15 мин с момента принятия решения
5. Распоряжение о ликвидации отказа								До 15 мин с момента принятия решения о ликвидации отказа
6. Распоряжение о производстве работ по ликвидации отказа								До 1 ч
7. Организация проведения ремонтных работ								1–24 ч (в среднем 4 ч)
8. Проведение ремонтных работ								2–24 ч (в среднем 4 ч)
9. Доведение до сведения участников информации об окончании ремонта								До 10–15 мин по завершении ремонтных работ
10. Контрольная проверка качества ремонта								До 1–2 ч
11. Снятие ограничения скоростей движения поездов								До 10 мин
12. Информирование о снятии ограничения скоростей								10–20 мин после снятия ограничения по скорости движения поездов
13. Учет количества отказов ТСЖДП								До 15 мин после получения информации

Примечание. В таблице обозначено ПЧ/ИЧ – дистанция пути, начальник дистанции пути; ДСП – диспетчерская служба пути (дежурный по станции) / ДНЦ – поездной участковый (узловой) диспетчер; ПЧУ – начальник участка пути; ПД – дорожный мастер; ПДБ – бригадир пути; ДИЦУСИ – дирекция инфраструктуры центра ситуационного управления; П – пути; ДИЦДМ – дирекция инфраструктуры центра подразделения механизации.

устранению отступления 4-й степени он передает диспетчерам ПЧ/ИЧ и ДИЦУСИ-П, которые ведут учет устраниенных отступлений. Начальник вагона в течение 20 мин с момента

завершения поездки выдает графическую диаграмму начальнику ПЧ, сообщает о выявленном отступлении в ЕК АСУИ, а также диспетчеру ПЧ/ИЧ. Далее выполняется ряд операций по

планированию устранения неисправностей, созданию предупреждений, устраниению, контролю за устраниением, формированию отчета и закрытию в ЕК АСУИ рабочего задания.

Выводы

По своей сути автоматизированная обработка событий, обнаружения и устраниния неисправностей в какой-то степени дублирует принятые соответствующими исполнителями решения. Однако достоинства такого подхода

заключаются в возможности оперативного принятия решений на основе статистических данных о подобных неисправностях, ранее имевших место.

Графические информационные модели позволяют применить метод оптимизации продолжительности восстановительных работ и оценки организационной надежности технологических процессов текущего содержания и ремонтов объектов инфраструктуры железной дороги.

Список источников

1. Яншина И. В. Оценка надежности организационно-технологических процессов инфраструктурных объектов на транспорте : специальность 05.02.22 «Организация производства (транспорт)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Яншина Ирина Викторовна ; Сибирский государственный университет путей сообщения. Новосибирск, 2022. 172 с.
2. Воробьев В. С., Репина И. Б., Репин С. О. Построение оперограмм устраниния неисправности при организации текущего содержания пути // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2023. № 1 (8). С. 48–58.
3. Оперограммы в структуре центра управления содержанием инфраструктуры / И. Б. Репина, И. В. Яншина, М. Ю. Квинт, Е. Г. Шепилова // Политранспортные системы : XI Международная научно-техническая конференция (Новосибирск, 12–13 ноября 2020 г.) : тезисы докладов. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2020. С. 185–190.
4. Севостьянов А. А., Величко Д. В. Моделирование организации технологических процессов по содержанию геометрии рельсовой колеи // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2023. № 2. С. 168–176.
5. Пикалов А. С., Милорадович В. К., Севостьянов А. А. Организация производства работ по капитальному ремонту пути на закрытом перегоне с учетом использования инновационной железнодорожно-строительной техники // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 33–43.
6. Севостьянов А. А. Планирование и организация работ по содержанию геометрии рельсовой колеи в зимний период эксплуатации // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 4 (7). С. 95–102.
7. Гуд Ю. О., Брытков В. С., Оленцевич В. А. Анализ имеющихся способов отслеживания неисправностей коммерческой работы в пути следования // Молодая наука Сибири. 2023. № 1 (19). URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1066/768> (дата обращения: 02.09.2024).
8. Власова Н. В., Оленцевич В. А. Цифровизация как основное стратегическое направление для достижения устойчивой конкурентной позиции ОАО «РЖД» на транспортном рынке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 127–135.
9. Воробьев В. С. Формирование систем управления строительством транспортных объектов в районах нового освоения : специальности 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей», 05.23.08 «Технология и организация строительства» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Воробьев Валерий Степанович ; Сибирский государственный университет путей сообщения. Новосибирск, 2005. 451 с.
10. Гнеденко Б. В., Коваленко Н. Н. Введение в теорию массового обслуживания. Москва : Наука, 1966. 431 с.
11. Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. Москва : Машиностроение, 1969. 324 с.
12. Саати Т. Элементы теории массового обслуживания. Москва : Советское радио, 1974. 520 с.

References

1. Yanshina I. V. Assessment of the reliability of organizational and technological processes of infrastructure facilities in transport: specialty 05.02.22 Organization of production (transport) (technical sciences). Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Irina Viktorovna Yanshina; Siberian Transport University. Novosibirsk; 2022. 172 p. (In Russ.).
2. Vorobyev V. C., Repina I. B., Repin S. O. Construction of the fault elimination operograms at the organization of the current track maintenance. *Fundamental and Applied Problems of Transport*. 2023;(8):48–58. (In Russ.).
3. Repina I. B., Yanshina I. V., Kvint M. Yu., Shepilova E. G. Operograms in the structure of the management center infrastructure maintenance (scientific article). *Polytransport systems: XI International scientific-technical conference (Novosibirsk, November 12–13, 2020): abstracts*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Transport University; 2020. P. 185–190. (In Russ.).
4. Sevostyanov A. A., Velichko D. V. Modeling of the organization of technological processes on the maintenance of the rail track geometry. *Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*. 2023;(2):168–176. (In Russ.).
5. Pikalov A. S., Miloradovich V. K., Sevostyanov A. A. Organization of the track overhaul works on the closed crossing taking into account the use of innovative railway construction equipment. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):33–43. (In Russ.).
6. Sevostyanov A. A. Planning and organization of works on maintenance of rail track geometry in winter period of operation. *Fundamental and Applied Problems of Transport*. 2022;(7):95–102. (In Russ.).
7. Gud Yu. O., Brytkov V. S., Olentsevich V. A. Analysis of the available ways of tracking the commercial work faults on the way. *Young Science of Siberia*. 2023;(19). (In Russ.). URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1066/768>.
8. Vlasova N. V., Olentsevich V. A. Digitalization as the main strategic direction to achieve a sustainable competitive position of Russian Railways in the transport market. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2023;(77):127–135. (In Russ.).
9. Vorobyev V. S. Formation of management systems for the construction of transport facilities in areas of new development: specialty 05.23.11 Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels, 05.23.08 Technology and organization of construction. Dissertation for the Degree of Doctor of Engineering. Vorobyev Valeriy Stepanovich; Siberian Transport University. Novosibirsk; 2005. 451 p. (In Russ.).
10. Gnedenko B. V., Kovalenko N. N. Introduction to the theory of mass service. Moscow: Nauka; 1966. 431 p. (In Russ.).
11. Ovcharov L. A. Applied tasks of the theory of mass service. Moscow: Mashinostroenie; 1969. 324 p. (In Russ.).
12. Saati T. Elements of Mass Service Theory. Moscow: Soviet Radio; 1974. 520 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В. С. Воробьев – профессор кафедры «Технология, организация и экономика строительства» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

И. В. Яньшина – старший преподаватель кафедры «Графика» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

V. S. Vorobyev – Professor of the Technology, Organization and Economics of Construction Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

I. V. Yanshina – Senior Lecturer of the Graphics Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 17.11.2024.

The article was submitted 02.09.2024; approved after reviewing 17.10.2024; accepted for publication 17.11.2024.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.212.5
doi 10.52170/1815-9265_2024_72_58

Корректировка продольного профиля путей подгорочного парка на основе оценки скорости движения отцепов

Сергей Анатольевич Бессоненко^{1✉}, Александр Александрович Климов²

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

¹bessonenko@stu.ru✉

²a-aklimov@yandex.ru

Аннотация. Безопасность расформирования составов на сортировочных горках играет важную роль в перевозочном процессе железнодорожного транспорта и должна безусловно обеспечиваться. Одним из важных условий безопасной работы сортировочных горок является соударение вагонов в сортировочном парке с допустимой скоростью.

При расчете сортировочных горок уклоны путей подгорочного парка принимаются равными 0,6 % на всем протяжении, кроме последних 100 м. На основе выполненных ранее исследований установлено, что удельное сопротивление движению отцепов на сортировочной горке значительно меньше, чем принято в нормативных документах. В ряде работ предлагается пересмотреть нормативные значения удельного сопротивления движению отцепов. В статье рассматривается вопрос, как влияет данный факт на движение отцепов в сортировочном парке.

Установлено, что уклоны путей сортировочного парка 0,6 % могут быть ускоряющими для ряда отцепов. В результате есть вероятность превышения скорости соударения отцепов с вагонами, стоящими на путях парка, по сравнению с допустимыми значениями. Это может произойти даже в том случае, если отцепы выпускаются из парковой тормозной позиции с минимальной скоростью.

Для исключения подобных случаев предлагается проектировать пути сортировочного парка на горизонтальной площадке. Это позволит избежать превышения допустимой скорости соударения для хороших бегунов. Для остальных отцепов значительных изменений скоростного режима в сортировочном парке не произойдет. В качестве альтернативного варианта предложено проектировать на уклоне 0,6 % только первые 100 м путей сортировочного парка.

Ключевые слова: сортировочная горка, уклоны путей сортировочного парка, удельное сопротивление движению отцепов, скорость движения отцепов, допустимая скорость соударения вагонов

Для цитирования: Бессоненко С. А., Климов А. А. Корректировка продольного профиля путей подгорочного парка на основе оценки скорости движения отцепов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 58–64. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_58.

TRANSPORT

Original article

Adjustment of the longitudinal profile of the summit yard tracks based on the assessment of the cuts movement speed

Sergey A. Bessonenko^{1✉}, Alexander A. Klimov²

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

¹bessonenko@stu.ru✉

²a-aklimov@yandex.ru

Abstract. The safety of train dissolution on hump yards plays an important role in the transportation process of railway transport and must certainly be ensured. One of the important conditions for the safe operation of hump yards is the collision of wagons in the sorting yard at a permissible speed.

When calculating the hump yards, the slopes of the tracks of the summit yard are assumed to be 0.6 % for the entire length except for the last 100 m. Based on previous studies, it was found that the specific resistance to the movement of the cuts on the hump yard is significantly less than is accepted in regulatory documents. In a number of works it's proposed to revise the normative values of specific resistance to cuts movement. The article deals with the question of how this fact affects the movement of cuts in the sorting yard.

It was found that the slopes of the sorting yard tracks 0.6 % can be accelerating for a number of cuts. This leads to the fact that there is a possibility of exceeding the collision speed of the cuts with wagons standing on the tracks of the yard, compared with the permissible values. This can happen even if the cuts are released from the yard braking position at a minimum speed.

To exclude such cases, it is proposed to design the sorting yard tracks on a horizontal platform. This will avoid exceeding the permissible collision speed for good runners. For the rest of the cuts, there will be no significant changes in the speed limit in the sorting yard. As an alternative option it's proposed to design only the first 100 m of the sorting yard tracks on a gradient of 0.6 %.

Keywords: hump yard, slopes of the tracks of the sorting yard, specific resistance to movement of the cuts, movement speed of the cuts, permissible speed of wagons collision

For citation: Bessonenko S. A., Klimov A. A. Adjustment of the longitudinal profile of the summit yard tracks based on the assessment of the cuts movement speed. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):58–64. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_58.

Введение

При проектировании сортировочных горок уклоны некоторых участков задаются в виде нормативных значений. Это относится и к путям сортировочного парка, уклоны путей которого на основном протяжении имеют величину, равную 0,6 %. От значения уклона путей во многом зависит скорость движения отцепов в парке.

Вышедшие из парковой тормозной позиции отцепы должны докатиться до стоящих на путях вагонов и соединиться с ними с допустимой скоростью (не более 5 км/ч). При этом средства регулирования скорости движения отцепов в сортировочном парке отсутствуют.

Выполненные исследования удельного сопротивления движению отцепов [1–3] выявили, что ходовые свойства вагонов за последние годы значительно улучшились. Кроме этого, появление так называемых инновационных вагонов еще сильнее уменьшает удельное сопротивление движению отцепов.

При соответствующих условиях скорость движения отцепов в сортировочном парке может превысить допустимое значение скорости соударения вагонов (5 км/ч). Поэтому целесообразно исследовать движение отцепов в сортировочном парке и при необходимости внести изменения в нормативные значения уклонов путей сортировочного парка.

Материалы и методы исследования

В работе использовались результаты исследований распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов, проведенных на одной из сортировочных станций. Удельное сопротивление движению отцепов вычислялось на основе данных об их реальной скорости в сортировочном парке. Измерения

выполнялись «ручным» способом и на основе данных системы «Компьютерное зрение», разработанной НИИАС. Результаты измерений опубликованы в [1–3].

Плотность и функция распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов на одной из сортировочных горок представлены на рис. 1 и 2.

Из представленных данных видно, что вероятность появления вагонов с удельным сопротивлением движения от 0 до 0,2 Н/кН составляет 0,05. Однако сортировочные горки рассчитывались по нормативным значениям удельного сопротивления движению, которые не учитывали прошедшие за последние годы изменения. Так, нормативное значение основного удельного сопротивления движению очень хороших бегунов составляет 0,5 Н/кН. Исходя из этого уклон путей сортировочного парка проектировался равным 0,6 % [4, 5]. Такие значения появились на основании исследований удельного сопротивления движению вагонов в 1975 г. [6].

Для отцепов, у которых удельное сопротивление движению меньше, такой уклон является ускоряющим. Вагонов, у которых основное удельное сопротивление движению не превышает 0,6 Н/кН, больше 20 %. В результате на определенном расстоянии от парковой тормозной позиции скорость движения отцепов может превысить максимально допустимую скорость соударения вагонов. Вследствие уменьшения удельного сопротивления движения отцепов вероятность такого события возрастает.

Результаты исследования

Скорость движения отцепов на спускной части сортировочной горки и в сортировочном парке исследовалась многими учеными, например в работах [7–10].

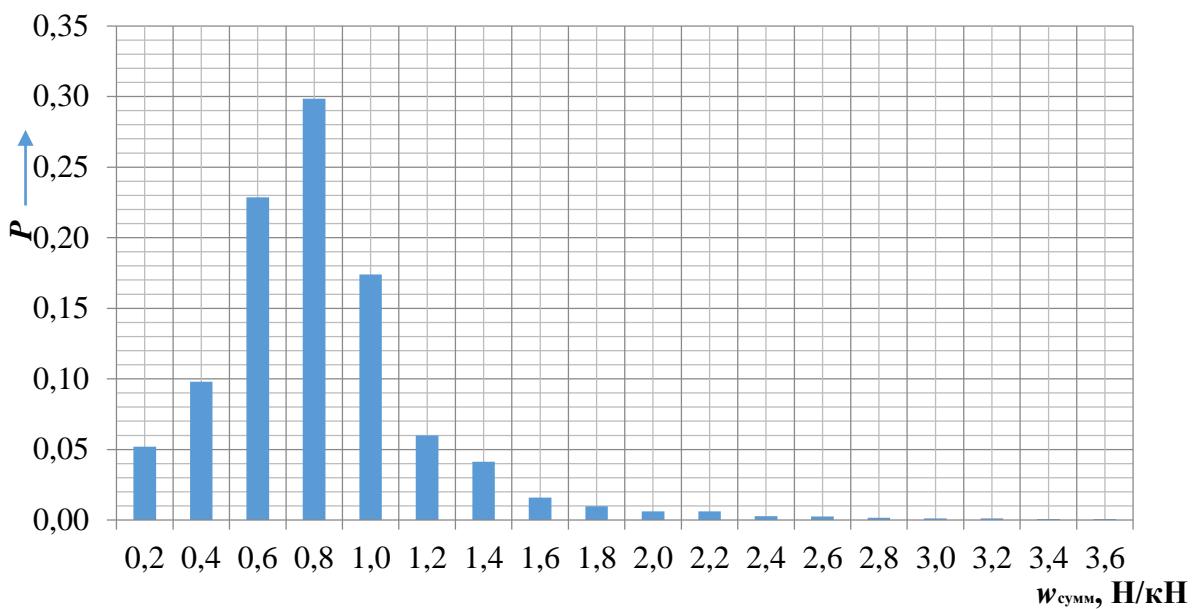


Рис. 1. Распределение вероятностей удельного сопротивления движению отцепов

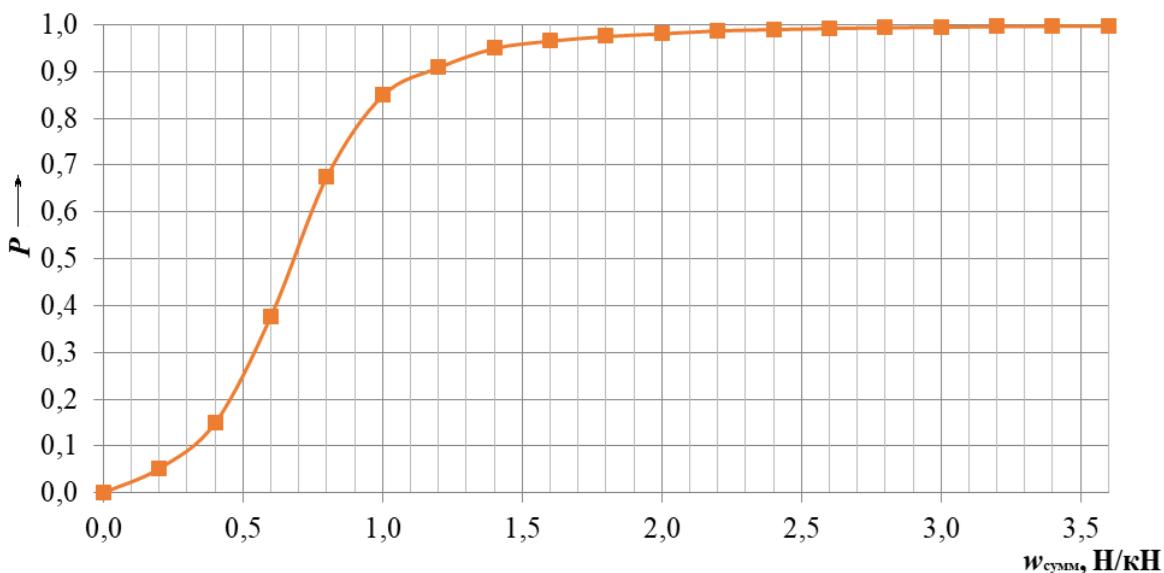


Рис. 2. Функция распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов

В статье приведены результаты расчетов скорости движения вагонов в сортировочном парке и сравнение этих данных с нормативными величинами. Расчет проводился по упрощенной методике, например при отсутствии ветра.

На рис. 3 показано изменение скорости движения отцепов в сортировочном парке в зависимости от пройденного расстояния. Приведены зависимости скорости движения одиночных отцепов с удельным сопротивлением движению (основным), равным 0,1, 0,2 и 0,5 H/kH . Скорость ветра принята равной нулю,

средняя скорость движения отцепов в парке – 1 м/с.

Из приведенных данных видно, что при удельном сопротивлении движению отцепов менее 0,6 H/kH скорость отцепов после выхода из парковой тормозной позиции возрастает и может превысить допустимое значение (1,39 м/с). При удельном сопротивлении движению отцепа, равном 0,1 H/kH (таких вагонов порядка 5 %) превышение допустимой скорости соударения вагонов наступает уже через 130 м после выхода из парковой тормоз-

ной позиции. И это при скорости выхода, равной 1 м/с. При больших скоростях выхода отцепов в сортировочный парк такая ситуация возникнет еще раньше.

Это ставит под сомнение нормативное значение уклона путей сортировочного парка. Располагать сортировочный парк на горизонтальной площадке проще. Такое решение зна-

чительно снижает вероятность соударения отцепов с повышенной скоростью и не будет иметь каких-либо негативных последствий. Но последние 100 м путей нужно располагать на противоуклоне в 2 %.

На рис. 4 и 5 показана зависимость скорости движения отцепа в сортировочном парке при условии размещения парка на горизон-

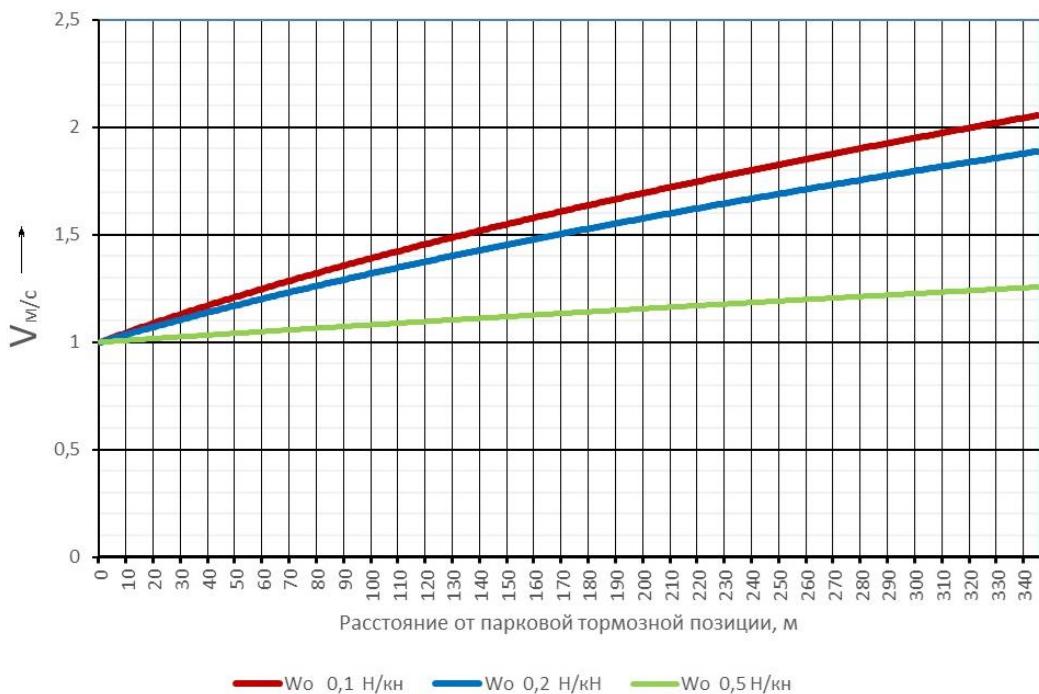


Рис. 3. Зависимость скорости движения отцепов от пройденного расстояния в сортировочном парке

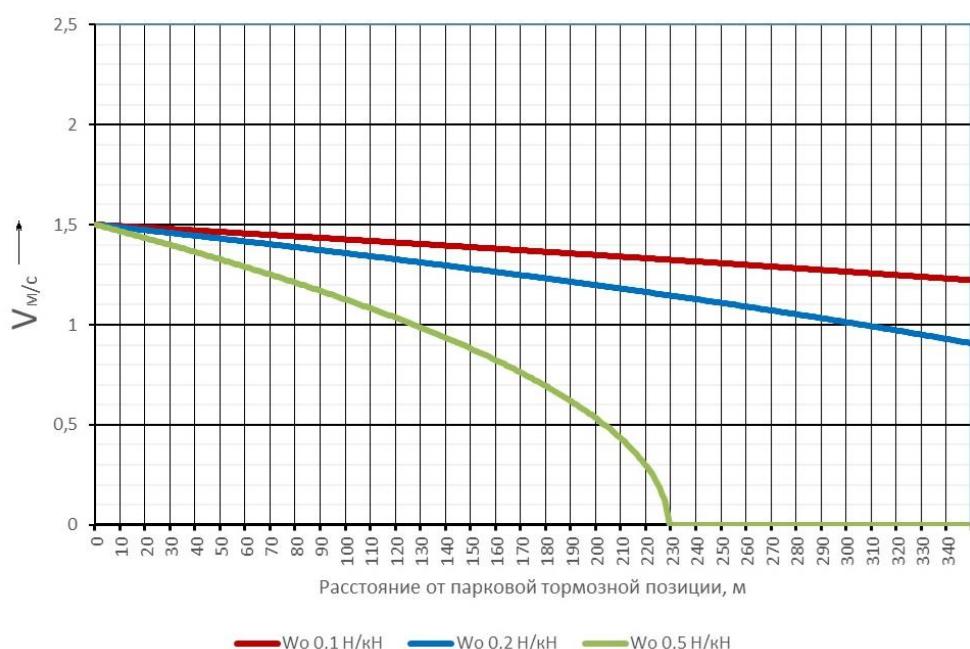


Рис. 4. Скорость движения отцепов в сортировочном парке при расположении путей на горизонтальной площадке

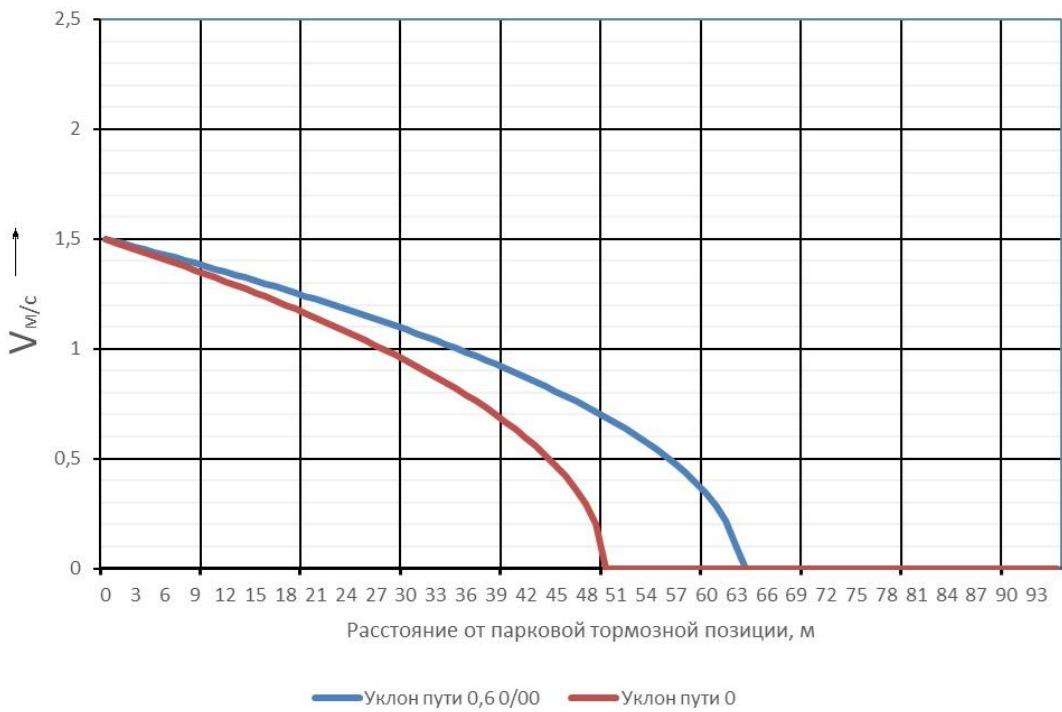


Рис. 5. Сравнение скорости движения отцепов в сортировочном парке при расположении путей на уклоне 0,6 % и на горизонтальной площадке

тальной площадке и ее сравнение с зависимостью при размещении путей сортировочного парка на уклоне 0,6 %.

На рис. 5 показано изменение скорости движения вагонов с основным удельным сопротивлением движению, равным 2,4 Н/кН, по путям, расположенным на уклоне 0,6 % и на горизонтальной площадке. Как видно из рисунка, размещение сортировочного парка на горизонтальной площадке не приводит к значительным изменениям скорости, но позволяет избежать дополнительных затруднений при строительстве парка или выправке путей.

В некоторых работах, например [9] и [10], рассматривался вопрос о возможности, при определенных условиях, движения отцепа навстречу роспуску после остановки. Это может произойти при сильном встречном ветре или при неудовлетворительном содержании путей (образование противоуклонов при иска-жении профиля). В работе данный вопрос не рассматривался, так как вероятность подобного события незначительна. Размещение сортировочного парка на горизонтальной пло-щадке не приведет к ощутимому увеличению вероятности данного события.

В качестве альтернативного варианта можно предложить размещать на уклоне 0,6 % первые 100 м пути, остальной путь (до последних 100 м) располагать на горизонтальной пло-щадке. Это несколько улучшит условия прохода отцепов в сортировочный парк. Зависимости скоростей отцепов для данного варианта пока-заны на рис. 6.

Выводы

По результатам проведенного исследова-ния можно сделать следующие выводы:

1. Отмечается значительное снижение средних значений сил сопротивления для всех весовых категорий вагонов по сравнению с используемыми в настоящее время для расчета сортировочных горок.

2. Данный факт приводит к ситуациям, при которых скорость соударения отцепов со стоящими в сортировочном парке вагонами может превышать допустимые значения.

3. Для исключения подобных случаев рас-смотрен вариант проектирования путей сорти-ровочного парка на горизонтальной пло-щадке и выполнено сравнение с вариантом проектирова-ния продольного профиля по действующим нормативам. Полученные результаты показали,

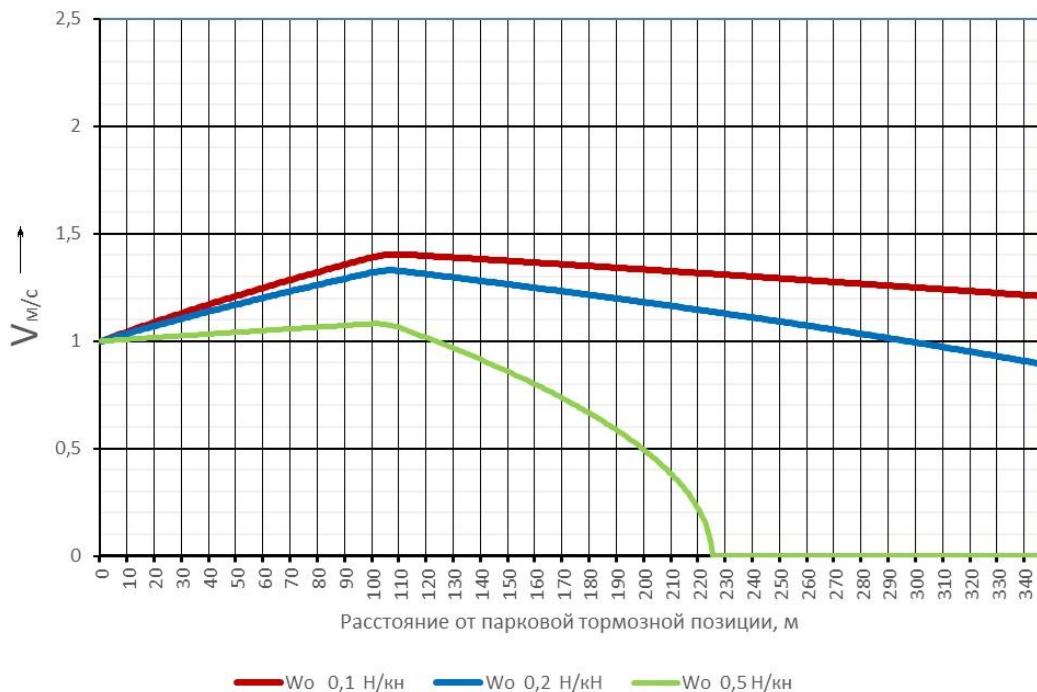


Рис. 6. Скорость движения отцепов в сортировочном парке при расположении первых 100 м пути на уклоне 0,6 %, а остального пути на горизонтальной площадке

что при расположении сортировочных путей на горизонтальной площадке обеспечиваются наилучшие условия для соблюдения допустимых скоростей соударения вагонов при скатывании. В качестве альтернативного варианта

предлагается размещать на уклоне 0,6 % только первые 100 м пути.

4. Проведенные расчеты показывают, что для движения отцепов в сортировочном парке такая мера не повлечет негативных последствий.

Список источников

1. Распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов на сортировочных горках / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Клинов [и др.] // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 52–62.
2. Исследование параметров основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Клинов [и др.] // Известия Транссиба. 2023. № 1 (53). С. 53–62.
3. Бессоненко С. А., Гунбин А. А., Клинов А. А. Актуализация параметров «расчетных бегунов», используемых при проектировании сортировочных горок // Вестник ВНИИЖТ. 2024. № 1. С. 60–68.
4. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм : утверждены МПС РФ 10.10.2003. Москва : Техинформ, 2003. 168 с.
5. Посоbие по применению правил и норм проектирования сортировочных устройств / Ю. А. Муха, Л. Б. Тишков, В. П. Шейкин [и др.] Москва : Транспорт, 1994. 220 с.
6. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / под ред. Е. А. Сотникова // Труды ВНИИЖТа. Москва : Транспорт, 1975. Вып. 545. 104 с.
7. 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.
8. Сортировочные станции: взаимодействие, размещение, развитие. Методологические принципы / А. Ф. Бородин, Р. В. Агеев, А. С. Крылов, М. Б. Сиротич // Железнодорожный транспорт. 2010. № 7. С. 20–27.
9. Корниенко К. И. Исследование влияния профиля горки на скорость движения отцепов в сортировочном парке при встречном ветре // Наука и молодежь СГУПСа в третьем тысячелетии. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2017. № 6. С. 104–111.
10. Корниенко К. И. Алгоритм расчета точки остановки отцепа в сортировочном парке // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 11. С. 36–40.

References

1. Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. [et al.]. Probability distributions of specific resistance to the movement of detachments on hump yards. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):52–62. (In Russ.).
2. Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. [et al.]. Study of the parameters of the main specific resistance to the movement of cars when rolling down a hump yard. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2023;(53):53–62. (In Russ.).
3. Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. Updating the parameters of “calculated runners” used in the design of hump yards. *Russian Railway Science Journal*. 2024;(1):60–68. (In Russ.).
4. Rules and regulations for the design of marshalling devices on 1520 mm gauge railways: approved. MPS RF 10.10.03. Moscow: Tekhninform; 2003. 168 p. (In Russ.).
5. Mukha Yu. A., Tishkov L. B., Sheikin V. P. [et al.]. Manual for the application of rules and regulations for the design of marshalling devices. Moscow: Transport; 1994. 220 p. (In Russ.).
6. Resistance to the movement of freight cars when rolling down hills. Ed. E. A. Sotnikov. *Proceedings of the All-Russian Research Institute of Railway Transport*. Issue 545. Moscow: Transport; 1975. 104 p. (In Russ.).
7. 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.).
8. Borodin A. F., Ageev R. V., Krylov A. S., Sirotich M. B. Classification yards: interaction, location, development. Methodological principles. *Railway Transport*. 2010;(7):20–27. (In Russ.).
9. Kornienko K. I. Investigation of the influence of the slide profile on the speed of cuts in the marshalling yard under headwinds. *Science and Youth of STU in the Third Millennium*. 2017;(6):104–111. (In Russ.).
10. Kornienko K. I. Algorithm for calculating the cut stop point in the classification yard. *Transport: Science, Equipment, Management*. 2017;(11):36–40. (In Russ.).

Информация об авторах

С. А. Бессоненко – профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

А. А. Климов – доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

S. A. Bessonenko – Professor of the Operational Management Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

A. A. Klimov – Associate Professor of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 15.11.2024; одобрена после рецензирования 04.12.2024; принята к публикации 05.12.2024.

The article was submitted 15.11.2024; approved after reviewing 04.12.2024; accepted for publication 05.12.2024.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.212.7
doi 10.52170/1815-9265_2024_72_65

Оценка возможности формирования поездов весом 7 100 т с массовым грузом на угледогрузочной станции П

Игорь Олегович Тесленко¹, Диана Юрьевна Гришкова^{2✉}, Сергей Эдуардович Ольховиков³

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

¹ teslenko.io@mail.ru

² raigas@inbox.ru✉

³ smot@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрена значимость и актуальность развития тяжеловесного и длинносоставного движения на сети железных дорог. Как показывает мировой опыт, развитие данного движения является актуальной и востребованной мерой при активном внедрении инноваций на железнодорожном транспорте. Тяжеловесное движение применяется в Австралии, Бразилии, Канаде, Китае, США, Швеции, Норвегии, ЮАР. Длина линий, на которых обращаются такие поезда, составляет от 180–200 до 1 100–1 500 км. В большинстве случаев это специализированные магистрали. В состав поездов включается до 340 вагонов.

ОАО «РЖД» еще в 2015 г. разработало программу развития тяжеловесного движения поездов. Полигон обращения поездов повышенной массы постоянно увеличивается. Несомненно, развитие тяжеловесного и длинносоставного движения оказывает большое положительное влияние на деятельность железнодорожной отрасли: использование инновационных вагонов с повышенной осевой нагрузкой, ускорение оборота вагонов, увеличение пропускной и перерабатывающей способности железнодорожных объектов и т. д. Однако есть и ряд задач, которые необходимо решить при рассмотрении организации тяжеловесного движения на сети дорог. В частности, требуется системный подход к проблемам взаимодействия экипажа и пути, колеса и рельса, продольной динамики поездов, перегрузок в системе энергоснабжения, бесперебойности обеспечения локомотивами при отправлении, учета длины станционных путей и промышленных предприятий и ряду других вопросов.

В статье рассмотрена возможность формирования поездов весом 7 100 т с массовым грузом. Выполнены расчеты достаточности длины путей станции П, а также станции З для формирования длинносоставного поезда. Установлено, что наиболее целесообразным вариантом является формирование поезда на путях станции З, так как из-за формирования поездов повышенной массы на двух путях по станции П будут увеличиваться прости, а также появятся недостатки в технологии работы с тяжеловесными составами. Приведена возможность отправления состава весом 7 100 т по условию трогания с места. Даны рекомендации по проектированию контактной сети на перегоне П–З, а также по организации пункта технического обслуживания вагонов на станции З. Проведена экономическая оценка целесообразности формирования длинносоставного поезда.

Ключевые слова: тяжеловесное движение, длинносоставное движение, вместимость пути, вес поезда, расчетная длина состава, пункт технического обслуживания вагонов

Для цитирования: Тесленко И. О., Гришкова Д. Ю., Ольховиков С. Э. Оценка возможности формирования поездов весом 7 100 т с массовым грузом на угледогрузочной станции П // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 65–71. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_65.

TRANSPORT

Original article

Assessment possibility of forming trains weighing 7,100 tons with a mass load at the coal loading station P

Igor O. Teslenko[✉], Diana Yu. Grishkova^{2✉}, Sergey E. Olkhovikov³

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

¹ teslenko.io@mail.ru

² raigas@inbox.ru✉

³ smot@mail.ru

Abstract. The article considers the importance and relevance of the development of heavy and long-distance traffic on the railway network. As world experience shows, the development of heavy and long-distance traffic is an urgent and in-demand measure for the active introduction of innovations in railway transport. Heavy lifting is used in Australia, Brazil, Canada, China, USA, Sweden, Norway, South Africa. The length of the lines where such trains run ranges from 180-200 to 1100-1500 kilometres. In most cases, these are specialized highways. The trains include up to 340 wagons.

Back in 2015, Russian Railways developed a program for the development of heavy-duty train traffic. On the network of Russian Railways, the number of trains with an increased mass is constantly increasing. Undoubtedly, the development of heavy and long-component traffic has a great positive impact on the activities of the railway industry: the use of innovative wagons with increased axial load, acceleration of the turnover of wagons, increase in throughput and processing capacity of railway facilities, etc. However, like any solution, there are also a number of tasks that need to be solved when considering the organization of heavy traffic on the road network. In particular, the development of heavy traffic requires a systematic approach to the problems of interaction between the crew and the track, wheel and rail, the longitudinal dynamics of trains, overloads in the power supply system, the reliability of providing locomotives during departure, taking into account the length of station tracks and industrial enterprises, and a number of other issues.

The article considers the possibility of forming trains weighing 7,100 with a mass load. Calculations of the sufficiency of the length of the tracks of station P, as well as station Z, for the formation of a long-composite train are performed. It has been established that the most appropriate option is to form a train on the tracks of the Z station. Since due to the formation of high-mass trains on two tracks at station P, downtime will increase, there are also shortcomings in the technology of working with heavy trains at this station. The possibility of sending a train weighing 7,100 tons under the condition of starting from the place was checked. There are recommendations on the design of the contact network on the P-Z stage, as well as the organization of a car maintenance point at the Z station. An economic assessment of the feasibility of forming a long-component train has been carried out.

Keywords: heavy traffic, long-distance traffic, track capacity, weight of the train, estimated length of the train, car maintenance point

For citation: Teslenko I. O., Grishkova D. Yu., Olkhovikov S. E. Assessment possibility of forming trains weighing 7,100 tons with a mass load at the coal loading station P. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2024;(72):65–71. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_65.

Введение

Тяжеловесное движение возникло из потребности обеспечить наиболее экономичный способ перевозки руды, угля и других однородных насыпных типов грузов из мест их добычи до мест погрузки на суда или до мест потребления [1].

Для увеличения веса грузовых поездов в ОАО «Российские железные дороги» создается ряд программ по инновационному развитию железнодорожной отрасли и проводятся различные мероприятия. Повышение весовых норм является одним из приоритетных направлений, которое позволяет увеличить провозную способность, повысить эффективность работы железнодорожных дорог без капитоемких мероприятий по строительству дополнительных главных путей на грузонапряженных участках сети [2].

ЗС железную дорогу можно считать местом для апробирования формирования тяжеловесных поездов за счет массовой погрузки угля на станциях K и отправления для экспорта через морские порты [3]. К станциям отправления массовых грузов относится и железнодорожная станция P. Современный город P – один из основных центров добычи коксующего угля и машиностроения. Основными потребителями угля являются ЗС, У, Е ч. Р, но, кроме этого, большая

часть угля идет на экспорт. Наиболее мощные потоки угля следуют в западном, восточном и северо-западном направлениях [4, 5].

Станция P является односторонней грузовой станцией, отнесена к первому классу. Состоит из одного парка с поперечным расположением путей.

Вся грузовая работа производится круглогодично на местах необщего пользования, принадлежащих ОАО «ПГУ». Железнодорожный путь необщего пользования ОАО «ПГУ» имеет три промышленные станции: ЦК, В и З, предназначенные для приема и отправления поездов, производства маневровой работы, связанной с подборкой, подачей, расстановкой и уборкой вагонов на грузовых фронтах, накоплением вагонов и формированием поездов, а также выполнения погрузочно-разгрузочных работ.

Известно, что провозная способность железнодорожного транспорта зависит от двух факторов: пропускной способности и массы поезда. Увеличение пропускной способности в основном связано с большими затратами, включая финансовые и временные. Поэтому целесообразно, в отдельных случаях, основное внимание уделять увеличению массы поезда за счет использования современных, более мощных локомотивов или применения кратной тяги.

Согласно прогнозным оценкам экспертов, объемы отправления угля возрастут к 2030 г. в 1,6 раза. Из этого следует, что транспортные потребности увеличиваются с каждым годом и требуют принятия новых решений, в частности увеличения провозной способности железнодорожных линий. Рассмотрим возможность формирования поездов массой 7 100 т на станции З, примыкающей к железнодорожной станции П.

Материалы и методы исследования

Тяжеловесными называют поезда, масса которых существенно превышает установленную графиком движения (от 6 000 до 16 000 т), с одним или несколькими действующими локомотивами в голове, в голове и хвосте, в голове и в последней трети состава [6]. Основными факторами, которые ограничивают вес грузового поезда, являются тяговые возможности локомотивов, эффективность тормозных средств, эффективность торможения и продольно-динамические реакции при торможении и отпуске тормозов [7].

Поезд повышенного веса формируют из груженых вагонов, по участку с наиболее сложным планом и профилем железнодорожного пути устанавливается норма веса поезда в границах тягового полигона или направления. Формируются поезда повышенного веса, как правило, из однородного по загрузке подвижного состава [8].

Для определения возможности формирования поезда весом 7 100 т на железнодорожной станции необщего пользования З выполним проверку массы состава по длине приемо-отправочного пути, по условию трогания поезда с места, а также анализ экономической рациональности протягивания контактной сети до станции З и установки на ней пункта технического обслуживания вагонов.

При движении поездов повышенной длины или массы, а также использовании в качестве поездных двух и более локомотивов (система многих единиц) масса поезда может быть ограничена полезной длиной приемо-отправочных путей раздельных пунктов.

Длина поезда, согласно требованиям Инструкции по движению поездов и маневровой работе, не должна выходить за границы полезной длины приемо-отправочных путей, обращающихся на конкретном железнодорожном

участке при учете до 10 м на неточность установки состава:

$$l_{\text{п}} \leq l_{\text{поп}}, \quad (1)$$

где $l_{\text{п}}$ – длина поезда, м; $l_{\text{поп}}$ – длина приемо-отправочных путей, м.

Длина поезда определяется выражением

$$l_{\text{п}} = l_{\text{с}} + m_{\text{л}}l_{\text{л}} + 10, \quad (2)$$

где $l_{\text{с}}$ – расчетная длина состава, м; $m_{\text{л}}$ – число локомотивов, шт.; $l_{\text{л}}$ – длина локомотива по осям автосцепки, м.

При выполнении расчетов будем учитывать, что на пути необщего пользования в настоящее время используется локомотив серии ТЭМ-2, длина которого по осям автосцепки равна 17 м, и серии ТЭМ-7А, длина по осям автосцепки – 21,5 м.

Расчетная длина состава

$$l_{\text{с}} = l_4n_4 + l_8n_8, \quad (3)$$

где n_4 , n_8 – число однотипных вагонов в составе, шт.; l_4 , l_8 – длина вагонов 4-осного или 8-осного типа соответственно, м.

На железнодорожном транспорте длина состава рассчитывается в условных вагонах, за условный вагон принимаем 4-осный полуваагон грузоподъемностью 69 т и длиной 13,9 м [9].

Количество однотипных вагонов составляет

$$n_j = \frac{Q}{q_j^{\text{бр}}}, \quad (4)$$

$$n_4 = \frac{7\ 100}{92} = 78 \text{ ваг.},$$

где Q – масса поезда брутто, т; $q_j^{\text{бр}}$ – средняя масса брутто вагона, т.

Длина состава

$$l_{\text{с}} = 78 \cdot 13,9 = 1\ 084,2 \text{ м.}$$

Для приема и отправления составов повышенной массы и принятия поездов со станции З могут использоваться следующие пути станции П: № 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13. Для примерного расчета возьмем приемо-отправочный путь № 8, имеющий полезную длину 1 087 м.

Длина поезда $l_{\text{п}}$ с локомотивом серии ТЭМ-2 – 1 111,2 м; ТЭМ-7А – 1 115,7 м.

Получаем неравенства $1\ 087 < 1\ 111,2$; $1\ 087 < 1\ 115,7$. Следовательно, условие не выполняется, значит, необходимо будет формировать поезд повышенной массы на двух путях железнодорожной станции общего пользования П.

Из-за формирования поездов повышенной массы на двух путях на станции П, с последу-

ющей прицепкой поездного локомотива и полным опробованием тормозов, будет увеличиваться время простоев, также появятся недостатки в технологии работы с тяжеловесными составами [10].

Рассмотрим технологию работы, при которой формирование поезда массой 7 100 т будет производиться на двух путях станции 3, после чего состав маневровым порядком переместится на железнодорожную станцию пути общего пользования P , где к нему будет произведена прицепка поездного локомотива, опробование тормозов и последующее отправление поезда.

Учитывая длину приемо-отправочного пути № 3 (1 064 м) станции 3 получим неравенства $1 064 < 1 111,2$; $1 064 < 1 115,7$. Следовательно, условие не выполняется, значит, необходимо будет формировать поезд повышенной массы на двух путях на станции 3, один из которых будем использовать на полную вместимость (рисунок).

Выполним расчет вместимости первого пути для локомотива серии ТЭМ-2:

$$1 064 - 1 \cdot 17 - 10 = 1 037 \text{ м},$$

$$l_{\text{п}} = \frac{1 037}{13,9} = 74 \text{ ваг.}$$

Остальные 4 ваг. разместим на пути № 6 станции 3.

Полезная длина пути № 6 равна 375 м.

$$l_{\text{п}} = 4 \cdot 13,9 + 1 \cdot 17 + 10 = 82 \text{ м.}$$

Полученное неравенство $82 < 375$ свидетельствует о том, что условие выполняется. Проведя расчет для вместимости путей № 3 и 6

для локомотива серии ТЭМ-7А, получим аналогичные результаты. Из этого можно сделать вывод, что поезд массой $Q = 7 100$ т с локомотивами серии ТЭМ-2 или ТЭМ-7А можно разместить на двух приемо-отправочных путях станции 3 – № 3 и 6.

Технологическое время на окончание формирования состава с использованием двух путей для накопления вагонов (головная группа накапливается на одном пути, а хвостовая – на другом) определяется по формуле

$$T_{\text{оф}}^{\text{ДВ}} = T_{\text{ПТЭ}}^{\text{гол}} + T_{\text{ПТЭ}}^{\text{хв}}. \quad (5)$$

Время на расстановку вагонов по правилам технической эксплуатации (ПТЭ) для хвостовой части состава, находящейся на том же пути сборки после выполнения этой операции, определяется по формуле (5) с учетом числа операций по расцепке вагонов $\rho_0^{\text{хв}}$ и количества вагонов в хвостовой части $m^{\text{хв}}$:

$$T_{\text{ПТЭ}}^{\text{хв}} = B + Em^{\text{хв}}, \quad (6)$$

где B, E – нормативные коэффициенты, значения которых зависят от среднего числа расцепок вагонов ρ_0 в местах несовпадения продольных осей автосцепки и постановки вагонов прикрытия.

Время на расстановку вагонов по ПТЭ для головной части состава, переставляемой на путь сборки, рассчитывается по формуле

$$T_{\text{ПТЭ}}^{\text{гол}} = \mathcal{K} + Im^{\text{гол}}, \quad (7)$$

где \mathcal{K}, I – нормативные коэффициенты, значения которых зависят от числа операций по расцепке вагонов в головной части $\rho_0^{\text{гол}}$ и учитывают затраты времени на перестановку этой части состава на путь сборки; $m^{\text{гол}}$ – количество вагонов в головной части состава.

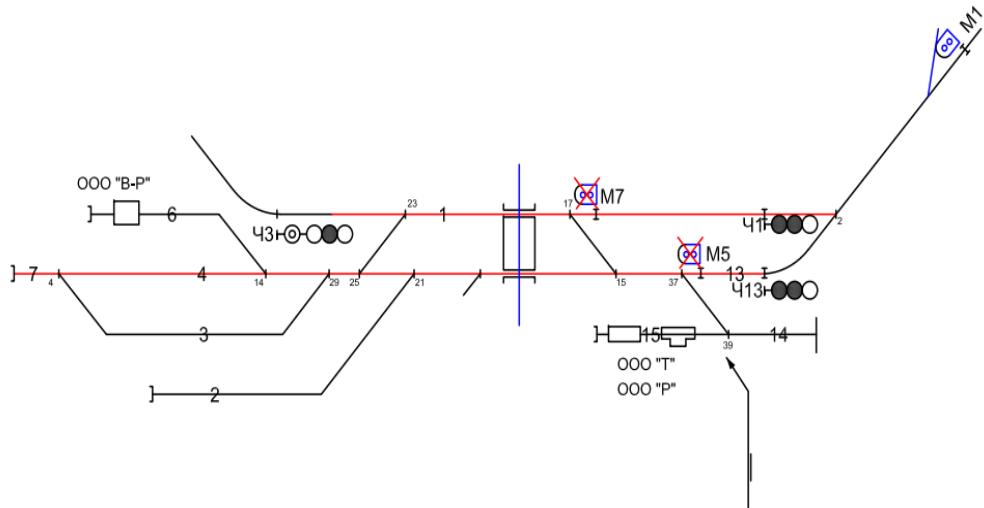


Схема станции 3

При $\rho_0^{\text{гол}} = 0,1$ $JK = 2,02$ мин; $I = 0,328$ мин;
при $\rho_0^{\text{хв}} = 0,1$ $B = 0,32$ мин; $E = 0,03$ мин.

$$T_{\text{ПТЭ}}^{\text{гол}} = 2,02 + 0,328 \cdot 26 = 10,55 \text{ мин},$$

$$T_{\text{ПТЭ}}^{\text{хв}} = 0,32 + 0,03 \cdot 34 = 1,34 \text{ мин},$$

$$T_{\text{оф}}^{\text{дл}} = 10,55 + 1,34 + 4,8 = 16,69 \text{ мин}.$$

В дальнейшем полученные значения времени необходимо учитывать в графиках обработки поезда весом 7 100 т.

Проверяем возможность отправления состава весом 7 100 т по условию трогания с места:

$$Q_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{к.тр}}}{\omega_{\text{тр}} + i_{\text{тр}} \cdot 9,81} - P, \quad (8)$$

где $F_{\text{к.тр}}$ – касательная сила тяги локомотива при трогании с места, Н; $\omega_{\text{тр}}$ – удельное сопротивление троганию состава с места, Н/т; $i_{\text{тр}}$ – крутизна подъема наиболее трудного элемента на раздельном пункте, %.

Проанализировав данные по продольному профилю пути № 3, возьмем уклон 0,072 как наиболее трудный.

Для локомотива серии ТЭМ-2 – $F_{\text{к.тр}} = 362\,000$ Н, $P = 123$ т; ТЭМ-7А – $F_{\text{к.тр}} = 530\,000$ Н, $P = 184$ т.

Средневзвешенное значение удельного сопротивления при трогании с места для состава, сформированного из разнотипных вагонов, определяем по формуле

$$\omega_{\text{тр}}^{\text{ср}} = \omega_{\text{тр}} \beta_1, \quad (9)$$

где $\omega_{\text{тр}}$ – удельное сопротивление при трогании с места вагонов, Н/т; β_1 – весовые доли в составе вагонов, объединенных по типу подшипниково-буксового узла (принимаем $\beta_1 = 1$).

Удельное сопротивление при трогании с места вагонов на подшипниках качения, кгс/тс, рассчитываем по формуле

$$\omega_{\text{тр}} = \frac{275}{q_0 + 7}, \quad (10)$$

где q_0 – нагрузка от оси на рельс, т.

Для грузовых вагонов $q_0 = 21$ т. Тогда

$$\omega_{\text{тр}} = \frac{275}{21+7} = 10 \text{ Н/т},$$

$$\omega_{\text{тр}} = 1 \cdot 1 = 10 \text{ Н/т};$$

$$Q_{\text{тр}} = \frac{362\,000}{(10+0,072 \cdot 9,81)} - 123 = 33\,688 \text{ т},$$

$$Q_{\text{тр}} = \frac{530\,000}{(10+0,072 \cdot 9,81)} - 184 = 49\,319 \text{ т}.$$

В результате произведенных расчетов должно быть соблюдено условие

$$Q_{\text{тр}} > Q_p, \quad (11)$$

где Q_p – расчетная масса состава, т.

Условие трогания состава с места выполняется для обоих локомотивов, так как $33\,688 > 7\,100$ и $49\,319 > 7\,100$ т.

В связи с перспективным ростом объема погрузки для возможности формирования тяжеловесных поездов весом 7 100 т целесообразно разместить пост технического обслуживания вагонов на станции 3, что приведет к уменьшению загруженности работников ПТОВ на станции P .

Пост необходим для работников ПТОВ, которые обеспечат техническое обслуживание, безотцепочный ремонт вагонов и опробование автотормозов; для приемо-сдатчиков, проводящих коммерческий осмотр.

Результаты исследования

Из расчетов, приведенных выше, можно сделать вывод, что формирование поезда весом 7 100 т на станции 3 возможно. Вместе с тем необходимо учитывать, что продолжительность выполнения технологических операций при формировании тяжеловесного поезда на станции P из двух групп вагонов, переданных со станции 3, составит 202 мин, а время формирования тяжеловесного состава на станции 3 с прицепкой поездного локомотива на станции P – 179,21 мин.

Из-за отсутствия контактной сети на перегоне $P-3$ и на станции 3 полное формирование поезда массой 7 100 т с прицепкой поездного локомотива на пути необщего пользования в настоящее время невозможно.

Однако, если объемы отправления будут возрастать, можно предложить проектирование контактной сети от станции P до станции 3. Тогда полное формирование тяжеловесного состава весом 7 100 т, прицепка поездного локомотива и дальнейшее отправление поезда будет возможно выполнять на станции 3, что позволит сократить занятость технологических линий станции P . Общая продолжительность операций при этом может составить 113 мин.

С увеличением массы поезда сокращается потребное количество локомотивов, локомотивных бригад, расход топлива или электроэнергии для тяги поездов. Все эти факторы ведут к положительному экономическому эффекту.

Выполним сравнение двух вариантов организации движения с одинаковыми объемами за год (9 417 000 т):

1) формирование унифицированных поездов на станции З, технический и коммерческий осмотр, а также прицепка поездного локомотива осуществляется на станции П: 2 190 поездов по 42 ваг. (4 300 т один состав) за год;

2) формирование тяжеловесных поездов на станции З, технический и коммерческий осмотр, а также прицепка поездного локомотива осуществляется на станции П: 730 поездов по 78 ваг. (7 100 т один состав) за год.

Сравнение экономической эффективности будет основываться на методике расчета экономической эффективности тяжеловесного движения в структуре локомотивного комплекса, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 01.04.2016 № 292.

Экономический эффект Э при сравнении двух вариантов из расчета за один год:

$$\mathcal{E} = n (\mathcal{E}_n + \mathcal{E}_l + \mathcal{E}_{tr}), \quad (12)$$

$\mathcal{E} = 1(3,3 + 6,18 + 49,2) = 58,68$ млн р., где n – значение расчетного периода (лет); \mathcal{E}_n , \mathcal{E}_l , \mathcal{E}_{tr} – экономический эффект от сокращения количества локомотивов, количества локомотивных бригад, расходов на топливо и электроэнергию соответственно, млн р.

Из расчета получаем, что экономический эффект с заданным объемом груза при варианте с использованием тяжеловесного поезда весом 7 100 т будет равен 58,68 млн р., следовательно, данный вариант является экономически целесообразным.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно заключить следующее:

1. Проведен анализ технико-эксплуатационной характеристики станции и пути необщего пользования.

2. Выполнен анализ технологии взаимодействия станции П и пути необщего пользования.

3. Определен прогноз динамики отправления массовых грузов.

4. Выполнены тяговые расчеты: проверка по длине приемо-отправочного пути показала, что для формирования поезда весом 7 100 т на станции З весь тяжеловесный состав невозможно разместить на одном пути, было принято решение использовать два пути (№ 1 и 13), путь № 1 используется на полную вместимость, условие трогания с места для локомотивов серии ТЭМ-2 и ТЭМ-7а выполняется. Обоснована необходимость создания отдельного поста пункта технического осмотра вагонов на станции З.

5. Проанализирована последовательность и продолжительность выполнения технологических операций со сформированными составами с массовым грузом: сформированного на станции З с перестановкой на станцию П; сформированного на станции З с прицепкой поездного локомотива на станции П; сформированного на станции З с имеющейся там электрификацией (на дальнейшую перспективу).

6. Рассчитана экономическая эффективность предлагаемой технологии, доказывающая целесообразность использования тяжеловесного поезда 7 100 т.

Таким образом, можно сделать вывод, что формирование поезда весом 7 100 т на станции З возможно при определенных условиях, а если запроектировать электрификацию участка П–З, то время на выполнение технологических операций с поездом, загруженным массовым грузом, можно будет значительно сократить.

Список источников

1. Развитие тяжеловесного движения в мире / С. М. Захаров, К. П. Шенфельд. Москва : ВНИИЖТ, 2013. № 4. 10 с.
2. Гришкова Д. Ю. Мероприятия по сокращению простоя транзитного вагона с переработкой // Техник транспорта: образование и практика. 2020. № 1 (1/2). С. 18–22.
3. Югрина О. П., Танайно Ю. А. Эффективность организации тяжеловесного движения и вождения соединенных поездов на примере Западно-Сибирской железной дороги // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 4 (51). С. 22–27.
4. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р. Москва, 2009. 177 с.
5. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. Москва, 2008. 171 с.
6. Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенного веса и длины на железнодорожных путях общего пользования ОАО «РЖД» : введена в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 17.12.2010 № 2610р. Москва, 2011.

7. Кузьмина Н. А. Исследование влияния движения поездов повышенной массы и длины как элемента увеличения эффективности перевозочного процесса // Евразийское научное объединение. 2020. № 1 (1). URL: <https://zenodo.org/records/3662107> (дата обращения: 01.09.2024).
8. Югрина О. П., Танайно Ю. А. Организация тяжеловесных поездов на Западно-Сибирской железной дороге // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. Донецк, 2017. № 46. С. 25–30.
9. Правила тяговых расчетов для поездной работы : нормативное производственно-практическое издание / ОАО «Российские железные дороги». Москва, 2013. 515 с.
10. Гришкова Д. Ю., Наперов В. В. Оптимизация выполнения операций на железнодорожной станции // Передовые инновационные разработки, перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство : сборник научных статей по итогам одиннадцатой научной международной конференции. Казань : Конверт, 2019. С. 112–113.

References

1. Zakharov S. M., Schoenfeld K. P. The development of the heavyweight movement in the world. Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport; 2013. No. 4. 10 p. (In Russ.).
2. Grishkova D. Yu. Measures to reduce the downtime of a transit wagon with recycling. *Transport Technician: Education and Practice*. St. Petersburg; 2020. No. 1 (1-2). P. 18–22. (In Russ.).
3. Yugrina O. P., Tanaino Yu. A. Efficiency of the organization of heavy traffic and driving of connected trains on the example of the West Siberian Railway. *The Siberian Transport University Bulletin*. Novosibirsk; 2019. No. 4 (51). P. 22–27. (In Russ.).
4. The Transport Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated 22.11.2008 No. 1734-R. Moscow; 2009. 177 p. (In Russ.).
5. The Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030: approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated June 17.06. 2008 No. 877-R. Moscow; 2008. 171 p. (In Russ.).
6. Instructions for organizing the circulation of freight trains of increased weight and length on public railways of Russian Railways: put into effect by Order of Russian Railways dated 17.12.2010 No. 2610r. (In Russ.).
7. Kuzmina N. A. Influence investigation of the increased mass and length train movement as an element of the transportation process increasing efficiency. *Eurasian Scientific Association*. 2020. No. 1 (1). (In Russ.). URL: <https://zenodo.org/records/3662107>.
8. Yugrina O. P., Tanaino Yu. A. Organization of heavy trains on the Western Siberian Railway. *Proceedings of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport*. Donetsk; 2017. No. 46. P. 25–30.
9. Rules of traction calculations for train operation: regulatory production and practical edition. Russian Railways. Moscow; 2013. 515 p. (In Russ.).
10. Grishkova D. Yu., Naperov V. V. Optimization of operations at a railway station. *Proceedings of Scientific Articles on the Results of the Eleventh Scientific International Conference Advanced Innovative Developments, Prospects and Experience of Use, Problems of Introduction into Production*. Kazan: Konvert; 2019. P. 112–113. (In Russ.)

Информация об авторах

- И. О. Тесленко* – доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.
- Д. Ю. Гришкова* – доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.
- С. Э. Ольховиков* – доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

- I. O. Teslenko* – Associate Professor of the Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.
- D. Yu. Grishkova* – Associate Professor of the Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department Siberian Transport University, Candidate of Engineering.
- S. E. Olkhovikov* – Associate Professor of the Logistics, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 12.11.2024; одобрена после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 12.11.2024; approved after reviewing 21.11.2024; accepted for publication 10.12.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 72–79.
The Siberian Transport University Bulletin. 2024. No. 5 (72). P. 72–79.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 691.32

doi 10.52170/1815-9265_2024_72_72

Энергетические аспекты малоциклической усталости обычных и фиброармированных бетонов

Инна Геннадьевна Корнеева^{1✉}, Борис Израилевич Пинус²

^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

¹ kornee-inna@yandex.ru✉

² pinusb@list.ru

Аннотация. Усталость является одним из последствий структурной деградации цементосодержащих композитов при нестационарных внешних воздействиях различного происхождения. Одним из апробированных направлений повышения их усталостного сопротивления является модификация структуры мелкодисперсными волокнами материалов высокой прочности и растяжимости, физически совместимых с цементной матрицей. В статье анализируются статистически представительные экспериментальные данные по изменению демпфирующего потенциала обычного и фиброполипропиленармированного бетона при немногократных циклических воздействиях, уровень которых моделирует колебания напряжений в конструкциях при фоновых сейсмических воздействиях. Приведены результаты динамических испытаний призматических образцов с различными уровнями максимальных напряжений, находящихся в диапазоне $R^0_{cyc} \dots R^V_{cyc}$, и нулевом коэффициенте асимметрии. Отклик конструкций рассматривается как колебательный процесс, кинетика которого оценивается по изменению энергии разрушения в стандартизованных условиях монотонного нагружения. Испытания проведены на универсальном испытательном комплексе Instron 5989 в жестком режиме циклического и последующего монотонного сжатия с постоянной скоростью деформирования 0,04 мм/с вплоть до разрушения. Использована оригинальная методика многофакторного автоматизированного контроля параметров, времени поэтапного сопротивления, энергии разрушения и других параметров на каждом цикле нагрузки и разгрузки. Приведена сравнительная оценка энергетического потенциала бетона и фибробетона и кинетика энергетических показателей на этапах циклических нагрузений. Установлена высокая чувствительность композитов к циклическим воздействиям принятой интенсивности, подтвержденная ощутимым снижением энергии постциклического сжатия (разрушения). Доказана возможность и технико-экономическая целесообразность усиления усталостного сопротивления железобетонных элементов посредством введения мелкодисперсных полипропиленовых волокон.

Ключевые слова: фоновая сейсмичность, цементные композиты, усталость, фибробетон, полипропилен, энергия сопротивления

Для цитирования: Корнеева И. Г., Пинус Б. И. Энергетические аспекты малоциклической усталости обычных и фиброармированных бетонов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 72–79. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_72.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Energy aspects of low cycle fatigue of conventional and fiber reinforced concrete

Inna G. Korneeva^{1✉}, Boris I. Pinus²

^{1,2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹ kornee-inna@yandex.ru✉

² pinusb@list.ru

Abstract. Fatigue is one of the consequences of the structural degradation of cement-containing composites under non-stationary external influences of various origins. One of the proven ways to increase their fatigue resistance is to modify the structure of fine fibers of materials of high strength and extensibility and physically compatible with the cement matrix. The article analyzes statistically representative experimental data on changes in the damping potential of conventional and fibropolypropylene reinforced concrete under a few cyclic influences, the level of which simulates stress fluctuations in structures under background seismic influences. The results of dynamic tests of prismatic samples with different levels of maximum stresses in the range $R^0_{cyc} \dots R^V_{cyc}$ and a zero-

asymmetry coefficient are presented. The response of structures is considered as an oscillatory process, the kinetics of which is estimated by the change in the fracture energy under standardized conditions of monotonic loading. The tests were carried out on the Instron 5989 universal test complex in a rigid mode of cyclic and subsequent monotonic compression with a constant deformation rate of 0.04 mm/s up to destruction. An original technique of multifactorial automated control of parameters, time of phased resistance, energy of destruction and other parameters at each cycle of loading and unloading is used. A comparative assessment of the energy potential of concrete and fiber concrete and the kinetics of energy indicators at the stages of cyclic loading is given. The high sensitivity of composites to cyclic effects of the accepted intensity has been established, confirmed by a noticeable decrease in the energy of post-cyclic compression (destruction). The possibility and technical and economic feasibility of strengthening the fatigue resistance of reinforced concrete elements through the introduction of finely dispersed polypropylene fibers has been confirmed.

Keywords: background seismicity, cement composites, fatigue, fiber concrete, polypropylene, resistance energy

For citation: Korneeva I. G., Pinus B. I. Energy aspects of low cycle fatigue of conventional and fiber reinforced concrete. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):72–79. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_72.

Введение

Эксплуатация строительных конструкций объективно связана с периодическими (циклическими) динамическими воздействиями переменной (в том числе знакопеременной) интенсивности с уровнем ниже расчетного нормативного значения. Соответствующий отклик конструкций представляет собой затухающий колебательный процесс, физические закономерности и кинетика которого определяются способностью к рассеиванию (поглощению) энергии за счет потенциала внутреннего сопротивления (внутреннего трения) [1–3]. При этом неоднородность многофазных, поликристаллических структур с различными деформативными свойствами компонентов обуславливает двойственный характер расходования внешней энергии на упругие (обратимые) и неупругие (необратимые) последствия. Экспериментально это подтверждается наличием петли гистерезиса в диаграммах циклического нагружения и разгрузки [4].

Наиболее распространенным и сравнительно объективным показателем внутреннего сопротивления материалов и конструкций принято считать коэффициент поглощения энергии ψ , характеризующий долю энергии неупругого деформирования в полной энергии цикла колебательного процесса. С учетом особенностей работы и предъявляемых эксплуатационных требований внутреннее сопротивление строительных конструкций целесообразно увязывать с кинетикой процесса затухания вынужденных колебаний. Последняя, согласно гипотезе W. Voigta [5], пропорциональна скорости деформирования, а по мнению Мартышкина, Сорокина [3], зависит от абсолютной величины вынужденных деформаций. Несмотря на принципиальные

различия теоретических предпосылок, указанные функциональные модели позволяют получать сопоставимые с экспериментами результаты. Однако практическое использование приведенных теоретических прогнозов ограничено и объяснимо тем, что внутреннее сопротивление не является свойством материала [1, 5, 6]. Его величина изменяется в большом диапазоне (см. табл. IV.2 [7]) и зависит от вида, уровня, продолжительности нагружения, типа конструкций, ее напряженного состояния, предыстории деформирования и других факторов.

Метастабильность значений и неоднозначность прогнозов потенциала внутреннего сопротивления предопределяют целесообразность экспериментального подхода к его оценке с учетом специфики ожидаемых колебательных процессов. Численное моделирование колебательных процессов с использованием масштабированных акселерограмм различной интенсивности [8] позволяет утверждать, что фоновые землетрясения силой 4–5 баллов способны вызывать в железобетонных конструкциях напряжения, превышающие уровень их сопротивления образованию и развитию микротрещин. Следовательно, возникают объективные условия развития необратимых процессов, снижающих кондиционные качества материалов и конструкций.

Использование синтетических волокон в качестве армирующих компонентов цементоодержащих матриц обусловлено их физико-химической совместимостью, широкой номенклатурой прочностных и деформативных свойств, технологической доступностью и приемлемой экономичностью. Обзор литературных данных [9–14] подтверждает наличие объективных предпосылок высокой усталост-

ной сопротивляемости полипропиленармированных композитов.

Методика экспериментальных исследований

Ниже представлен сравнительный анализ кинетики демпфирующего потенциала обычного (ОБ) и фибропропиленармированного (ФБ) бетонов при малоцикловых воздействиях, адекватных фоновой геоактивности сейсмических районов.

С целью оценки кинетики и последствий немногократных динамических воздействий проведены циклические испытания на сжатие двух серий образцов:

- ОБ – обычный бетон с соотношением компонентов Ц : П : Щ : В = 1 : 1,42 : 3,57 : 0,55 и расходом цемента 380 кг/м³ (марки М400 Д20 «Ангарскцемент»);

- ФБ – бетон аналогичного состава с 1,5%-м объемным содержанием фибролированных полипропиленовых волокон диаметром 0,8 мм и длиной 40 мм производства ООО «Технополимер» (Иркутск).

Их фракционный состав и соотношение (табл. 1) подобраны с учетом рекомендаций по проектированию оптимальных дисперсно-армированных структур [15, 16] по критериям деформационного взаимодействия матрицы и волокна, а также обеспечения анкеровки фибр до момента разрушения. Изготовление образцов (кубов и призм) и температурно-влажностные условия 28-суточного хранения соответствовали ГОСТу.

По истечении 3–4 месяцев лабораторного хранения проведена ультразвуковая выработанка образцов и определены контролируемые показатели прочности бетонов обеих серий (табл. 2).

Динамические испытания проведены на испытательном комплексе Instron 5989 в автоматическом режиме циклического нагружения–разгрузки с постоянной скоростью деформирования и записью всех параметров силового воздействия и отклика образца. Контроль усилий осуществлялся с точностью до 1 кН динамометрическим датчиком Instron 2580-305. Запись деформаций в обоих направлениях производилась с помощью экстензометров материнской серии Instron с точностью 1·10⁻⁵ е. о. д. При этом измерение продольных деформаций велось на полной базе (400 мм). Отметим, что наличие в испытательном комплексе специального шарнирного механизма позволило добиться автоматического центрирования загружения и, как следствие, получить полные диаграммы σ–ε. Одновременно на каждом цикле нагрузки и разгрузки производился контроль затрачиваемой энергии, модуля упругости, изменения объема и других параметров.

Выбор режима циклических силовых воздействий осуществлялся с учетом:

а) результатов численного моделирования вероятных последствий фоновой сейсмоактивности;

б) физических закономерностей развития усталостных явлений в цементосодержащих композитах как процесса образования, развития и накопления микротрещин [17–23];

в) зависимости кинетики усталостных процессов от уровня σ_b и перепада ρ напряжений;

г) установленных в предварительных испытаниях показателей прочности и деформативности опытных образцов (см. табл. 2).

В совокупности это определило целесообразность проведения трех режимов цикличес-

*Таблица 1
Фракционный состав бетона и фибробетона экспериментальных образцов, кг/м³*

Серия	Щебень (5–10 мм)	Песок ($M_k = 2,03$)	Цемент	Вода	Волокна (1,5 %)
ОБ	1 357	540	380	210	–
ФБ	1 357	540	380	210	13,85

Таблица 2

Стандартизованные показатели качества бетонов

Серия	Время ультразвука τ , мкс	Приизменная прочность R_b , МПа	Модуль упругости E_b , МПа	Уровень границы микроразрушений		Деформации $\epsilon \cdot 10^5$				
				R^o_{crc}	R^v_{crc}	ϵ_0	ϵ_y	ϵ_{pl}	$\epsilon_{0,8}$	ϵ_u
ОБ	28,19	40,61	28804	0,47	0,88	21	159	64	66	223
ФБ	28,86	35,06	21503	0,32	0,74	45	170	65	61	235

Примечание. Деформации: ϵ_0 – начальные; ϵ_y – упругие; ϵ_{pl} – пластические; $\epsilon_{0,8}$ – соответствующие нисходящей ветви; ϵ_u – соответствующие максимальным напряжениям.

ских воздействий с параметрами $\eta = \sigma_b / R_b = 0,6; 0,7; 0,8$ и нулевым напряжением при разгрузке ($\rho = 0$). На всех этапах скорость нагружения соответствовала постоянству скорости деформирования образцов 0,04 мм/с. Измерение значимых параметров отклика осуществлялось автоматически после первого и через каждые 10 циклов.

Общий вид диаграмм циклических воздействий и сопротивления представлен на рисунке.

Результаты и их обсуждение

Исходный потенциал внутреннего сопротивления образцов W устанавливался при их монотонном сжатии вплоть до разрушения с указанной ранее скоростью деформирования. Он соответствовал полной площади диаграммы $\sigma-\varepsilon$ и был проанализирован с учетом обратимости (необратимости) затрачиваемой энергии. Предполагается, что энергия, расходуемая на участке условно-упругого деформирования W_e ($0-\varepsilon_{max}$), обратима, а на нисходящей ветви (W_{pl}) – расходуется на необратимые внутриструктурные изменения. Сравнительная оценка энергетического потенциала бетона и фибробетона характеризуется данными табл. 3.

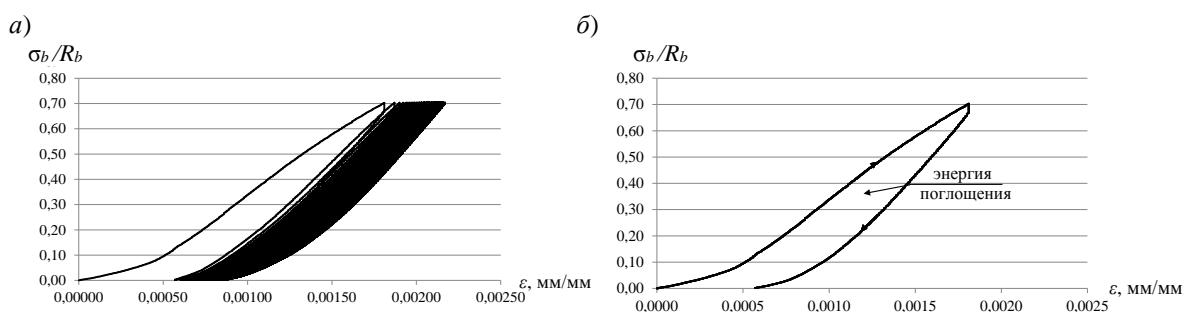
Примечательно, что увеличение статического внутреннего сопротивления фиброподармированного композита происходит за счет преимущественного роста его упругой составляющей. Именно эта особенность может явиться определяющим фактором устойчиво-

сти фибробетона при циклических динамических воздействиях.

Для проверки этой гипотезы проведены динамические испытания призматических образцов, изготовленных из бетонов обеих серий. Кинетика энергетических показателей на этапах циклических нагрузений представлена в табл. 4.

Здесь же приведены данные, характеризующие поведение образцов на первых циклах нагружения. Они существенно отличаются от соответствующих показателей на этапах установившихся циклических воздействий.

Согласно современным представлениям [16, 21] это объяснимо единовременными (начальными) затратами энергии на внутриструктурную трансформацию, сопровождающуюся ликвидацией случайных концентраторов напряжений, слабых когезионных связей и других технологически обусловленных несовершенств. В откликах конструкций подобные явления прослеживаются в образовании необратимых остаточных деформаций с неоднозначными последствиями. В частности, в условиях последующего свободного деформирования ожидаемо снижение энергетических затрат из-за уменьшения внутриструктурного напряженно-деформированного состояния. При стесненных условиях (например, в статически неопределеных системах) накопление остаточных деформаций способствует развитию усталостных процессов.



Диаграммы нагружения (а) и отклика (б) опытных образцов бетона и фибробетона при динамических испытаниях

Таблица 3

Энергетические параметры исходного внутреннего сопротивления, МПа·мм/мм

Показатель	Индекс	Серия		ФБ/ОБ
		ОБ	ФБ	
Общий	W	105 500	132 500	1,25
Упругий	W_e	46 250	69 900	1,51
Пластический	W_{pl}	59 250	62 600	1,06
Относительный	W_{pl}/W	0,562	0,472	0,84

Таблица 4

Изменение энергетических параметров в процессе циклических воздействий

Серия	Режим η	Цикл нагружения											
		1-й				100-й				200-й			
		W_1	ΔW_1	ψ_1	$\frac{\Delta W_1}{W_1}$	W_i	ΔW_i	ψ_i	$\frac{\Delta W_i}{W}$	W_i	ΔW_i		
ОБ	0,6	13 600	3972	0,29	0,038	10 538	958	0,09	0,009	10 377	813	0,08	0,008
	0,7	22 157	8843	0,40	0,084	15 932	1 438	0,09	0,014	15 400	1 617	0,105	0,015
	0,8	20 499	6703	0,33	0,063	15 356	1 273	0,083	0,012	—	—	—	—
	0,85	—	—	—	—	26 700	3 300	0,123	—	Разрушение			
ФБ	0,6	11 904	3569	0,30	0,027	9 434	615	0,06	0,005	9 126	717	0,08	0,005
	0,7	15 632	5209	0,33	0,039	12 337	950	0,08	0,007	13 508	1 163	0,09	0,009
	0,8	18 310	5289	0,29	0,040	14 734	1 005	0,07	0,08	—	—	—	—
	0,85	—	—	—	—	18 200	1 570	0,09	—	Не разрушился			

Примечание. В таблице обозначено: W – начальный потенциал энергии; W_i – затраченная энергия нагружения на i -м цикле; ΔW_i – площадь петли гистерезиса i -го цикла; ψ_i – коэффициент поглощения на i -м цикле.

Сравнивая энергетические затраты на 1-м цикле нагружения ($\eta = 0,6$), находим, что они составляют 13 % исходного потенциала внутреннего статического сопротивления бетона и 9 % фибробетона, при практически одинаковой величине поглощенной энергии. Однако увеличение уровня максимального напряжения ($\eta = 0,7$) сопровождается существенными различиями в показаниях. В образцах обычного бетона резко возрастают затраты внешней (в 1,63 раза) и поглощенной (в 2,23 раза) энергии. Аналогичные показатели фибробетона составляют 1,31 и 1,46 раза соответственно. Оба состава изначально характеризуются высокой демпфирующей способностью ($\psi = 0,3 \dots 0,33$).

Ввиду существенного различия исходного потенциала сопротивления бетона и фибробетона, кинетику его реализации во временном аспекте целесообразно анализировать в относительных изменениях параметров. С точки зрения усталостной деградации наиболее значимым показателем представляется отношение изменения затрат поглощенной энергии ΔW_i в цикловом процессе к общему потенциальному. В качестве последнего принят показатель внутреннего сопротивления при монотонном нагружении до момента разрушения, что существенно ниже энергии циклового нагружения [22].

Коэффициент поглощения цикловой энергии ψ характеризуется различным трендом

при увеличении диапазона и количества циклов, что объяснимо различием физических закономерностей усталостных процессов с ростом уровня нагружений. Однако в сопоставительном плане фибробетон на принятой базе испытаний характеризуется существенно меньшей долей цикловой энергии, затрачиваемой на трещинообразование, и, как следствие, большей усталостной долговечностью.

Подобные выводы более наглядно подтверждаются сравнением коэффициентов удельных затрат энергии на остаточные последствия (гистерезис цикла) и начального потенциала внутреннего сопротивления. В сопоставимых условиях циклического воздействия они почти в два раза ниже для фиброполипропиленового композита.

Выводы

1. Энергетические показатели цементно-матричных композитов являются чувствительным и информативным критерием их усталостного сопротивления.

2. Армирование композитов мелкодисперсными волокнами полипропилена позволяет существенно увеличить демпфирующую способность их внутреннего сопротивления и рекомендуется для бетонных и железобетонных конструкций, подвергаемых системным или случайным (включая фоновые сейсмические) нестационарным воздействиям.

Список источников

1. Сорокин Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. Москва : Издательство литературы по строительству, архитектуре и строительной механике, 1960. 253 с.
2. Сорокин Е. С. Метод учета неупругого сопротивления материалов при расчете конструкций на колебания // Исследования по динамике сооружений. Москва : Стройиздат, 1951. С. 170–176.
3. Пановко Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. Москва : Госиздат физико-математической литературы, 1960. 196 с.
4. Сейсмостойкое строительство зданий : учебное пособие для вузов / под ред. И. Л. Корчинского. Москва : Высшая школа, 1971. 320 с.
5. Chopra A. K. Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. New Jersey : Prentice Hall, USA, 1995. 729 p.
6. Корчинский И. Л., Беченева Г. В. Прочность строительных материалов при динамических нагрузках. Москва : Стройиздат, 1966. 212 с.
7. Сейсмостойкое строительство зданий : учебное пособие для вузов / И. Л. Корчинский, Л. А. Бородин, А. Б. Гроссман [и др.] ; под ред. И. Л. Корчинского. Москва : Высшая школа, 1971. 319 с.
8. Созонов П. С., Пинус Б. И. Статистические закономерности изменения прочности железобетонных конструкций при циклических знакопеременных воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 6. С. 33–36.
9. Zollo R. F. Collated Fibrillated Polypropylene Fibers in FRC // SP-81. Detroit : American Concrete Institute, 1984. P. 397–409.
10. Ramakrishnan V., Gollapudi S., Zellers R. Performance Characteristics and Fatigue of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete // SP-105. Detroit : American Concrete Institute, 1987. P. 159–177.
11. Nagabhushanam M., Ramakrishnan V., Vondran G. Fatigue Strength of Fibrillated Polypropylene Fiber Reinforced Concrete // Transportation Research Record. 1989. No. 1226. P. 36–47.
12. Hannant D. J. Fibre Cements and Fibre Concretes. New York: John Wiley and Sons Ltd., 1978. 213 p.
13. Guirguis S., Potter R. J. Polypropylene Fibres in Concrete // Technical Report TR/F90 Cement and Concrete Association of Australia. 1985. 21 p.
14. Vondran G. L., Nagabhushanam M., Ramakrishnan V. Fatigue Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Concretes // Fiber Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments / edited by R. N. Swamy, B. Barr. London ; New York : Elsevier Applied Science, 1990. P. 533–543.
15. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов: вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. Москва : АСБ, 2011. 639 с.
16. Рабинович Ф. Н. Моделирование структуры дисперсно армированных бетонов // Строительство и архитектура. Известия вузов. 1986. № 1. С. 22–29.
17. Cachim Paulo B., Figueiras Joaquim A., Pereira Paulo A. A. Fatigue model for steel fiber-reinforced concrete // Cement & Concrete Composites. 2002. No. 24. P. 211–217.
18. Banthia N. Fibre-Reinforced-Concrete // Seminar-Reports. 2013. No. 7. URL: <http://38871626-Banthia-Fibre-Reinforced-Concrete.pdf> (123seminarsonly.com) (дата обращения: 28.06.2024).
19. Барашиков А. Я. Шевченко Б. Н., Валовой А. И. Малоцикловая усталость при сжатии // Бетон и железобетон. 1985. № 4. С. 27–28.
20. Кузовчикова Е. А., Яшин А. В. Исследование влияния малоцикловых сжимающих воздействий на деформативность, прочность и структурные изменения бетона // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1976. № 10. С. 30–35.
21. Pinus B. I., Kustov A. S. Low-cycle fatigue of concrete with alternating loads // Investments, Construction, Real Estate : New Technologies and Special-Purpose Development Priorities : Proceedings of conference, Irkutsk, Russian Federation, April 26–27, 2018. IOP Publishing Ltd, 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/3/033014>.
22. Ghosni N., Samali B., Vessallas K. Evaluation of structural behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete beam under cyclic loading // 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials : Proceedings of conference, Byron Bay, Australia, 9–12 December, 2014. Lismore, N. S.W : Southern Cross University, 2014. Vol. I. P. 319–326.
23. Korneeva I. G., Pinus B. I. Energy aspects of low-cycle fatigue of fibropolypropylene concrete // International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety : Proceedings of conference, Sochi, Russia, September 6–12, 2020. IOP Publishing Ltd, 2020. P. 1–5. DOI 10.1088/1757-899X/962/2/022020.

References

1. Sorokin E. S. On the theory of internal friction during vibrations of elastic systems. Moscow: Publishing house of literature on construction, architecture and structural mechanics; 1960. 253 p. (In Russ.).
2. Sorokin E. S. Method of accounting for the inelastic resistance of materials when calculating structures for vibrations. *Research on the dynamics of structures*. Moscow: Stroyizdat; 1951:170–176. (In Russ.).
3. Panovko Ya. G. Internal friction during vibrations of elastic systems. Moscow: Publishing house of Physics and Mathematics literature; 1960. 196 p. (In Russ.).
4. Earthquake-resistant construction of buildings. Edited by I. L. Korchinsky, a textbook for universities. Moscow: Higher School; 1971. 320 p. (In Russ.).
5. Chopra A. K. Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice Hall, USA; 1995. 729 p.
6. Korchinsky I. L., Becheneva G. V. Strength of Building Materials under Dynamic Loads. Moscow: Stroyizdat; 1966. 212 p. (In Russ.).
7. Korchinsky I. L., Borodin L. A., Grossman A. B. [et al]. Earthquake-resistant construction of buildings. Edited by I. L. Korchinsky. Study guide for universities. Moscow: Higher School; 1971. 319 p.
8. Sozonov P. S., Pinus B. I. Statistical patterns of changes in the strength of reinforced concrete structures under cyclic alternating influences. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. 2015;6:33–36. (In Russ.).
9. Zollo R. F. Collated Fibrillated Polypropylene Fibers in FRC. *SP-81*. Detroit: American Concrete Institute. 1984. P. 397–409.
10. Ramakrishnan V., Gollapudi S., Zellers R. Performance Characteristics and Fatigue of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. *SP-105*. Detroit: American Concrete Institute. 1987. P. 159–177.
11. Nagabhushanam M., Ramakrishnan V., Vondran G. Fatigue Strength of Fibrillated Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. *Transportation Research Record*. 1989;1226:36–47.
12. Hannant D. J. Fibre Cements and Fibre Concretes. New York: John Wiley and Sons Ltd.; 1978. 213 p.
13. Guirguis S., Potter R. J. Polypropylene Fibres in Concrete. *Technical Report TR/F90 Cement and Concrete Association of Australia*. 1985. 21 p.
14. Vondran G. L., Nagabhushanam M., Ramakrishnan V. Fatigue Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Concretes. *Fiber Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments*. Edited by R. N. Swamy, B. Barr. London and New York: Elsevier Applied Science; 1990. P. 533–543.
15. Rabinovich F. N. Composites based on dispersed reinforced concrete: theory and design issues, technology, structures. Moscow: ASV; 2011. 639 p. (In Russ.).
16. Rabinovich F. N. Modeling of the structure of dispersed reinforced concrete. *Construction and Architecture. Proceedings of Universities*. 1986;1:22–29. (In Russ.).
17. Cachim Paulo B., Figueiras Joaquim A., Pereira Paulo A. A. Fatigue model for steel fiber-reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites*. 2002;24:211–217.
18. Banthia N. Fibre-Reinforced-Concrete. *Seminar-Reports*. 2013;7. URL: <http://38871626-Banthia-Fibre-Reinforced-Concrete.pdf> (123seminarsonly.com) html.
19. Barashikov A. Ya. Shevchenko B. N., Valovoy A. I. Low-cycle fatigue during compression. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1985;4:27–28. (In Russ.).
20. Kuzovchikova E. A., Yashin A.V. Investigation of the effect of low-cycle compressive effects on deformability, strength and structural changes of concrete. *Proceedings of Universities. Construction and Architecture*. 1976;10:30–35. (In Russ.).
21. Pinus B. I., Kustov A. S. Low-cycle fatigue of concrete with alternating loads. *Investments, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities: Proceedings of conference*, Irkutsk, Russian Federation, April 26–27, 2018. IOP Publishing Ltd, 2019:1–6. DOI 10.1088/1757-899X/687/3/033014.
22. Ghosni N., Samali B., Vessallas K. Evaluation of structural behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete beam under cyclic loading. *23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials: Proceedings of conference*, Byron Bay, Australia, 9–12 December, 2014. Southern Cross University, Lismore, N.S.W, 2014;1:319–326.
23. Korneeva I. G., Pinus B. I. Energy aspects of low-cycle fatigue of fibropolypropylene concrete. *International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety: Proceedings of conference*, Sochi, Russia, September 6–12, 2020. IOP Publishing Ltd, 2020:1–5. DOI 10.1088/1757-899X/962/2/022020.

Информация об авторах

И. Г. Корнеева – доцент кафедры «Строительное производство» Иркутского национального исследовательского технического университета, кандидат технических наук.

Б. И. Пинус – профессор кафедры «Строительное производство» Иркутского национального исследовательского технического университета, доктор технических наук.

Information about the authors

I. G. Korneeva – Associate Professor of the Building Production Department, Irkutsk National Research Technical University, Candidate of Engineering.

B. I. Pinus – Professor of the Building Production Department, Irkutsk National Research Technical University, Doctor of Engineering.

Статья поступила в редакцию 27.06.2024; одобрена после рецензирования 23.08.2024; принятая к публикации 03.10.2024.

The article was submitted 27.06.2024; approved after reviewing 23.08.2024; accepted for publication 03.10.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 625.143

doi 10.52170/1815-9265_2024_72_80

Многовариантное моделирование параметров конструкции упругих клемм в виде пружины кручения, с анализом их напряженно-деформированного состояния

Максим Александрович Карюкин^{1✉}, Дмитрий Валерьевич Величко²

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

¹ m.caryuckin@yandex.ru✉

² vdv.nsk@mail.ru

Аннотация. Основными современными промежуточными рельсовыми скреплениями на железнодорожных путях ОАО «РЖД» являются скрепления с упругими прутковыми клеммами. Конструкция данных скреплений, в том числе самих упругих прутковых клемм, продолжает постоянно развиваться. Одним из главных недостатков в-образных упругих клемм является неэффективное распределение монтажного усилия: на прижатие подошвы рельса направлено около половины от прикладываемого на болт (прикрепитель) усилия.

В качестве перспективной конструкции упругой прутковой клеммы для промежуточных рельсовых скреплений рассмотрена клемма в виде пружины кручения (или витковая клемма), главным преимуществом которой является более удачная схема распределения прижимного усилия.

В статье приведены результаты многовариантного моделирования геометрических параметров витковых клемм (42 шт.) с анализом их напряженно-деформированного состояния. Расчеты проведены с использованием программно-вычислительных комплексов SolidWorks и Ansys Workbench.

В результате расчетов многовариантных моделей выполнен анализ напряженно-деформированного состояния витковой клеммы и определены степени влияния интервалов варьирования геометрических параметров клеммы: шага витка клеммы (17–30 мм); диаметра прутка клеммы (12–20 мм); числа витков клеммы (1,4–3,4); диаметра витка клеммы (50–70 мм).

Исходя из геометрии рельса, взаимного расположения предполагаемых элементов узла скрепления, обеспечения оптимального напряженно-деформированного состояния и как можно меньшей материалаомкости клеммы наиболее оптимальными параметрами конструкции упругих клемм в виде пружины кручения являются: диаметр витка 50 мм, количество витков полу克莱ммы 2,4; диаметр прутка 16 мм, шаг витка 17 мм.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельсовое скрепление, программно-вычислительный комплекс, SolidWorks, Ansys, геометрические параметры, напряжения

Для цитирования: Карюкин М. А., Величко Д. В. Многовариантное моделирование параметров конструкции упругих клемм в виде пружины кручения, с анализом их напряженно-деформированного состояния // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 80–89. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_80.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Multivariate modeling of design parameters of elastic terminals in the form of a torsion spring, with the analysis of their stress-strain state

Maxim A. Karyukin^{1✉}, Dmitriy V. Velichko²

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

¹ m.caryuckin@yandex.ru✉

² vdv.nsk@mail.ru

Abstract. The main modern intermediate rail fasteners on the railways of Russian Railways are fasteners with elastic bar terminals. The design of these fasteners continues to be constantly developed by developers, including the emphasis on the design of the elastic bar terminals themselves. One of the main disadvantages of B-shaped elastic terminals is the inefficient distribution of the mounting force – about half of the force applied to the bolt (fastener) is directed at pressing the sole of the rail.

A terminal in the form of a torsion spring (or a coil terminal) is considered as a promising design of an elastic bar terminal for intermediate rail fasteners, the main advantage of which is a more successful clamping force distribution scheme.

The article presents the results of multivariate modeling of the geometric parameters of the winding terminals (42 pieces) with an analysis of their stress-strain state. The calculations were carried out using the SolidWorks and Ansys Workbench software and computing systems.

As a result of calculations of multivariate models the stress-strain state of the coil terminal was analyzed and the degrees of influence of the intervals of variation of the geometric parameters of the terminal were determined: terminal coil pitch (17–30 mm); terminal rod diameter (12–20 mm); number of terminal coils (1.4–3.4); terminal coil diameter (50–70 mm).

Based on the geometry of the rail, the relative location of the proposed elements of the fastening unit, ensuring an optimal stress-strain state and the lowest possible material consumption of the terminal, the most optimal design parameters of elastic terminals in the form of a torsion spring are: the diameter of the coil is 50 mm, the number of coils of the semi-terminal is 2.4, the diameter of the rod is 16 mm, the pitch of the coil is 17 mm.

Keywords: railway track, rail fastening, software and computing complex, SolidWorks, Ansys, geometric parameters, stresses

For citation: Karyukin M. A., Velichko D. V. Multivariate modeling of design parameters of elastic terminals in the form of a torsion spring, with the analysis of their stress-strain state. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2024;(72):80–89. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_80.

Введение

Для значительного увеличения упругости и работоспособности современных упругих прутковых клемм необходимы дальнейшие исследования по разработке нового типа промежуточного рельсового скрепления с принципиально иной формой (отличной от современной в-образной формы) упругой прутковой клеммы [1]. Альтернативой в-образным прутковым клеммам является клемма в виде пружины кручения – витковая пружинная прутковая клемма (витковая клемма).

Одним из главных недостатков в-образных упругих клемм [2] является неэффективное распределение монтажного усилия (рис. 1): на прижатие подошвы рельса направлено около половины от прикладываемого на болт (прикрепитель) усилия.

Для обеспечения необходимого погонного сопротивления смещению плети в 25 кН/м узел скрепления должен обеспечивать нормативное прижатие рельса к основанию не менее 20 кН [3–5]. С учетом существующего неэффективного распределения величина прижатия одной в-образной клеммы должна также составлять 20 кН (для половины клеммы – 10 кН).

Материалы и методы исследования

Известны конструкции анкерных скреплений, в том числе с симметричной клеммой круглого поперечного сечения, выполненной в виде пружины кручения одинарной навивки (рис. 2, 3) [6–9].

В работе рассматривается конструкция витковой пружинной прутковой клеммы в виде пружины кручения двойной навивки (рис. 4). Такие пружины имеют два симметричных

участка (стороны) навивки и позволяют равномерно распределять нагрузку.

Витковая клемма состоит из средней части, расположенной между двумя участками навивки, которые оканчиваются двумя прямыми участками опирания.

Определение наиболее оптимальных геометрических параметров упругих прутковых клемм в виде пружины кручения выполняется в результате анализа их напряженно-деформированного состояния, на основе многовариантного компьютерного моделирования с использованием программно-вычислительных комплексов SolidWorks и Ansys Workbench.

При многовариантном компьютерном моделировании параметров витковых клемм (42 шт.) использовалась сталь марки 60С2А с пределом текучести 1 570 МПа.

Результаты исследования

Главным преимуществом витковой клеммы в виде пружины кручения двойной навивки (рис. 5) является уменьшение плеча приложения прижимного усилия клеммы, что позволяет снизить его величину при сохранении необходимого погонного сопротивления сдвигу рельсовой нити. Таким образом, усилие прижатия таких клемм будет составлять порядка 11 кН.

Область применения пружин кручения, или торсионных пружин, довольно многогранна. В основном они используются в технике для создания прижимного, возвратного усилий в разнообразных машинах и механизмах, а также в бытовой технике, например в механизмах открытия-закрытия, тормозных и фиксирующих, возвратных устройствах.

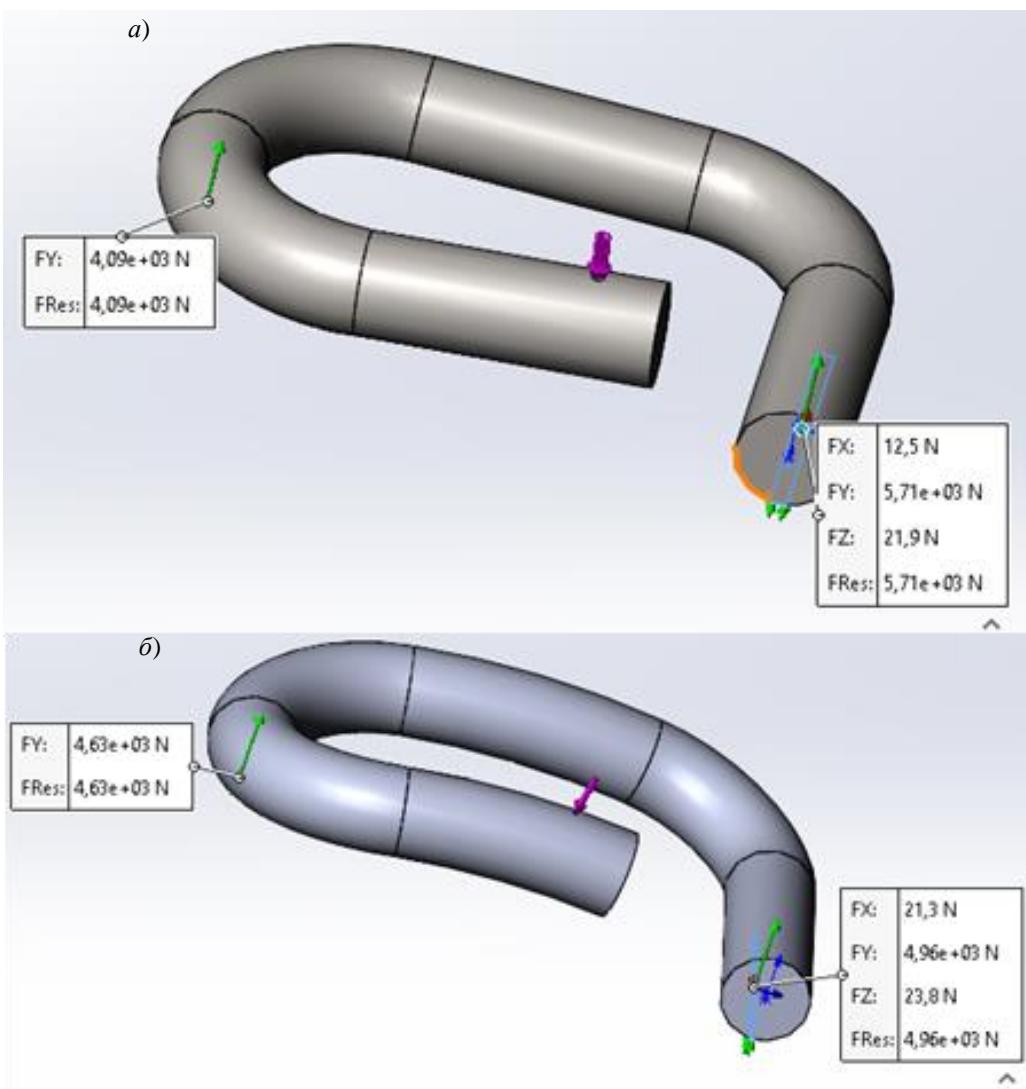


Рис. 1. Распределение монтажного усилия в в-образных упругих клеммах промежуточных скреплений:
а – APC-4; б – ЖБР-65

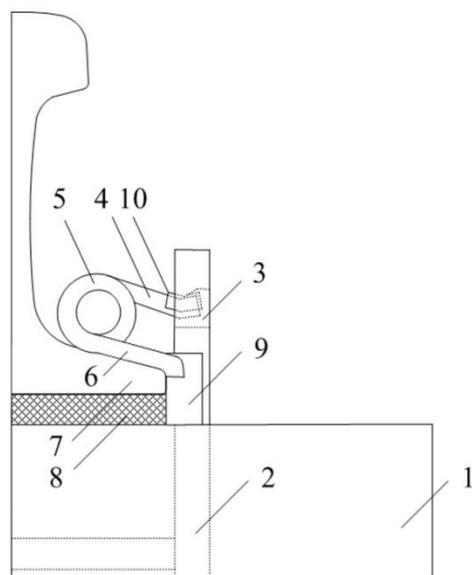


Рис. 2. Вариант скрепления с витковой клеммой:

1 – шпала; 2 – анкер; 3 – криволинейное отверстие; 4 – упругая витковая клемма; 5 – средняя часть клеммы; 6 – конец клеммы; 7 – рельс; 8 – подрельсовая прокладка; 9 – изолятор; 10 – изолирующая U-образная прокладка

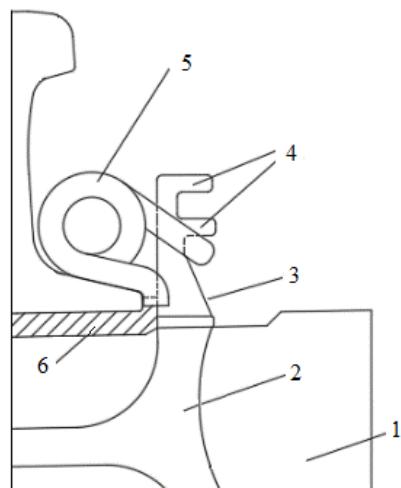


Рис. 3. Вариант скрепления с витковой клеммой с полимерным анкером:
1 – шпала; 2 – полимерный анкер; 3 – стойка анкера; 4 – фиксаторы; 5 – пружинная витковая клемма;
6 – подрельсовая прокладка

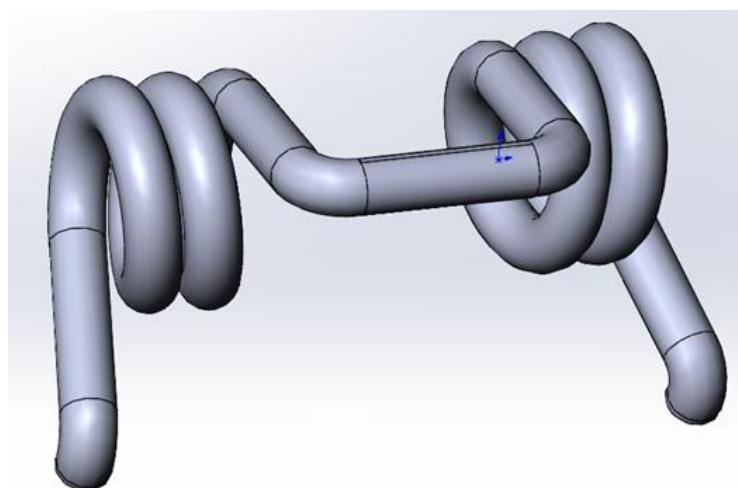


Рис. 4. Витковая клемма в виде пружины кручения двойной навивки

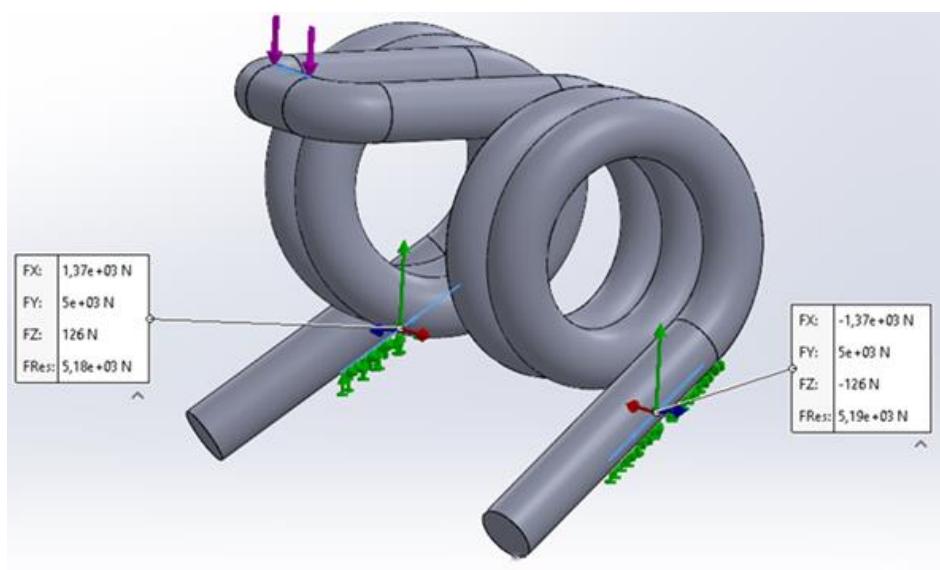


Рис. 5. Распределение прижимного усилия в витковой клемме

Основными параметрами витковой клеммы являются: диаметр витка (оборота) клеммы D , диаметр прутка клеммы d , шаг витка l , количество витков.

Главной особенностью данных пружин кручения является то, что для них нет стандартизованных размеров, параметры пружины подбираются индивидуальным проектированием [10–12]. При этом инженерные расчеты пружин кручения учитывают прогнозируемую нагрузку, сферу и условия будущей эксплуатации изделия.

Существующая методика расчетов пружин кручения, используемая в настоящее время отечественными заводами-изготовителями, основана на определении наибольшего рабочего крутящего момента и предельно допустимого крутящего момента для наибольшей испытательной нагрузки. В таких расчетах используется понятие индекса пружины – отношения среднего диаметра витка пружины D к диаметру прутка проволоки d . Чем меньше диаметр проволоки, тем больше рекомендуется брать индекс пружины: следует использовать индекс пружины, равный или больший пяти, в исключительных случаях – равный четырем.

Существующая методика расчетов учитывает диаметр проволоки до 12 мм, индекс пружины при котором считают граничным и равным четырем. Следовательно, наибольший средний диаметр такой пружины будет равен 48 мм.

Таким образом, для расчета упругой прутковой клеммы в виде пружины кручения существующая методика расчета не является в полной мере *адекватной*, поскольку рассматриваемые геометрические параметры клеммы, которые обеспечивают необходимое погонное сопротивление сдвигу рельсовой плети, лежат за пределами параметров, учтенных в существующей методике расчета.

Из анализа результатов исследований [6] следует, что при усилии нажатия 10 кН в конструкции витковой клеммы рекомендуется 3–4 витка. В связи с этим более подробно рассматривается конструкция витковой клеммы с примерно двумя витками для каждого участка (стороны) навивки. Необходимо установить влияние количества витков на напряженно-деформированное состояние данной конструкции клеммы. Исходя из геометрии рельса и предположительной геометрии будущего

скрепления витковая клемма должна обеспечивать предельный угол закручивания, равный 25° [13], что определяет начальный угол витка в 90° , обеспечивающий количество витков 1,4; 2,4; 3,4 и т. д.

Исходя из геометрии рельса и обеспечения как можно меньшей материалоемкости клеммы [14–16], а также во избежание нарушения целостности скрепления при производстве путевых работ диаметр витка клеммы (в осях) не должен превышать 70 мм. В то же время минимальный диаметр витка не должен быть менее 50 мм для обеспечения возможности использования всего выбранного диапазона диаметра прутка. Диаметр прутка не имеет конкретных ограничений и рассматривается в диапазоне от 12 до 20 мм. Для обеспечения необходимой малогабаритности шаг витка следует выбирать равным диаметру прутка, увеличенному на 1 мм.

Для определения наиболее оптимального сочетания геометрических параметров витковой клеммы проведено многовариантное компьютерное моделирование.

Результаты исследования многовариантных моделей витковой клеммы (42 шт.) приведены на рис. 5–10. Графики представлены для трех диаметров витка клеммы: 50, 60 и 70 мм.

На рис. 6–7 представлены результаты исследования влияния количества витков на напряженно-деформированное состояние витковой клеммы. Количество витков указано для одного участка навивки (для половины клеммы).

При увеличении количества витков полуклеммы с 2,4 до 3,4 наблюдается значительное перемещение средней части клеммы (с 12,8–19,3 до 19–27,8 мм), что в среднем больше на 46 %, при разных диаметрах витка (50–70 мм). При этом напряжения не превышают предела текучести стали и остается запас для работы под воздействием поездной нагрузки. Однако такое количество витков (3,4) сильно увеличивает металлоемкость клеммы, а соответственно и ее вес. Вес клеммы с 3,4 витками для каждого участка (стороны) навивки (2,1 кг) больше веса клеммы с 2,4 витками (1,6 кг) на 32,4 %.

При увеличении количества витков полуклеммы с 1,4 до 2,4, увеличивается перемещение средней части клеммы (с 7,8–11,7 до 12,8–19,3 мм), что в среднем больше на 64,5 %, при разных диаметрах витка (50–70 мм).

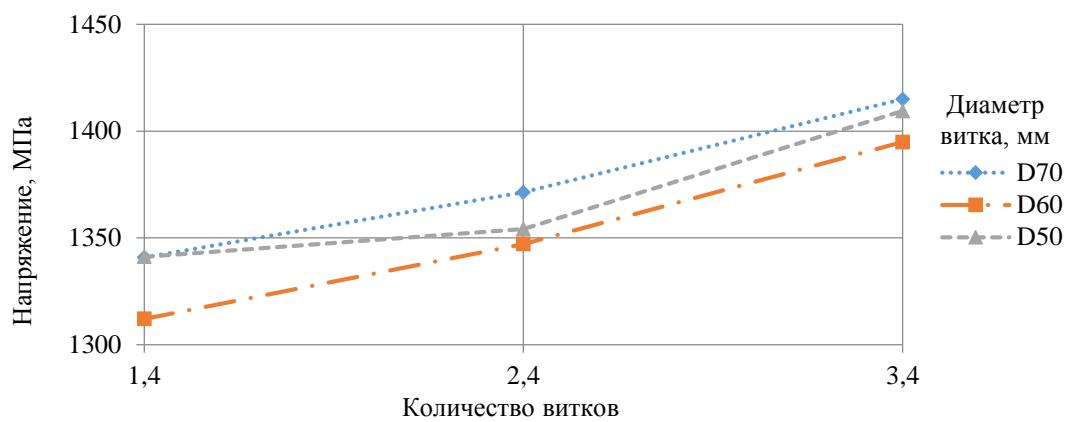


Рис. 6. Зависимость напряжений витковой клеммы от количества витков полу克莱ммы

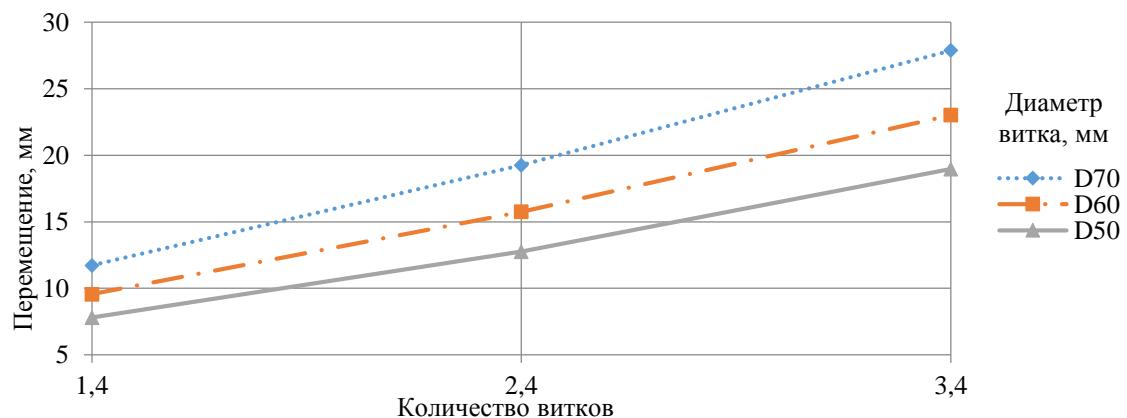


Рис. 7. Зависимость перемещения средней части витковой клеммы от количества витков полу克莱ммы

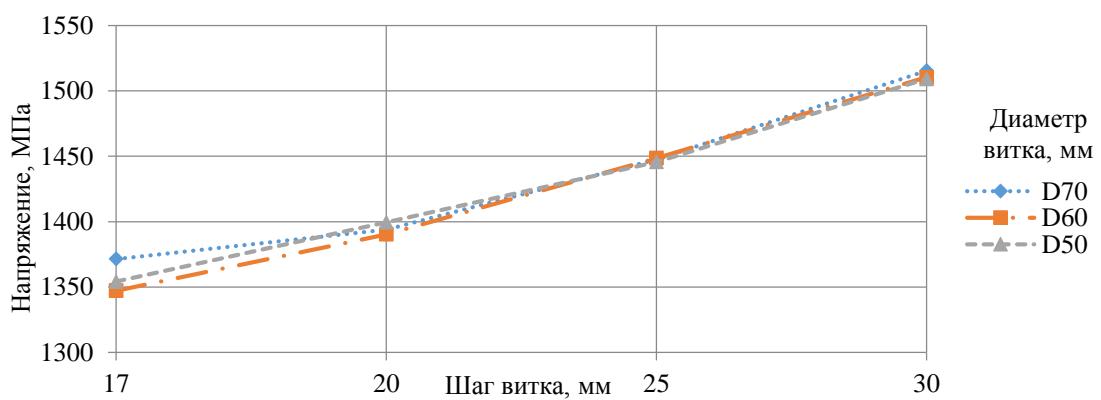


Рис. 8. Зависимость напряжений витковой клеммы от шага витка клеммы

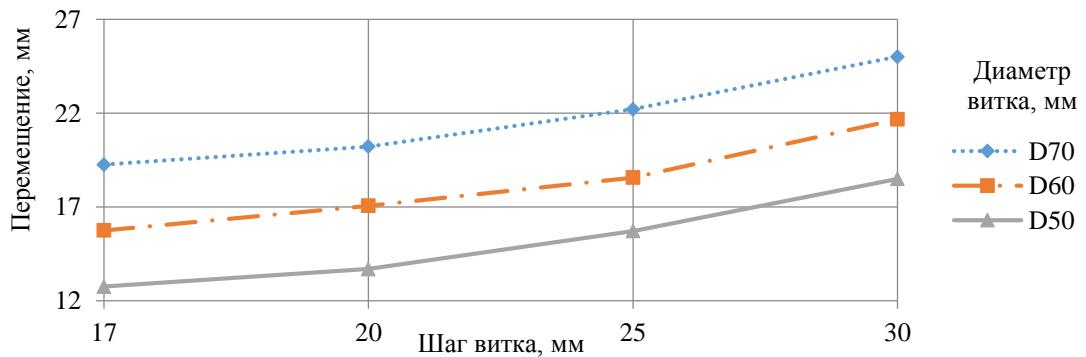


Рис. 9. Зависимость перемещений средней части витковой клеммы от шага витка клеммы

В связи с вышесказанным принимается, что 2,4 витка для каждого участка (стороны) навивки клеммы является более оптимальным вариантом конструкции.

На рис. 8, 9 представлены результаты исследования влияния шага витка на напряженно-деформированное состояние витковой клеммы при количестве витков полуклеммы 2,4.

Для обеспечения необходимой малогабаритности клеммы принимается шаг витка, равный диаметру прутка клеммы, увеличенному на 1 мм: $d + 1$. При величине шага витка клеммы 17 мм наблюдаются различия в напряжениях порядка 2,2 % при разных диаметрах витка (50–70 мм), однако с ростом шага витка (до 30 мм) различия сводятся к минимуму (менее 1 %).

При увеличении шага с 17 до 30 мм увеличивается перемещение средней части клеммы (с 12,8–19,3 до 18,5–25 мм), что в среднем больше на 37,5 %, при разных диаметрах

витка (50–70 мм). Однако горизонтальные габариты клеммы увеличиваются при этом в среднем на 30,9 %.

На рис. 10–11 представлены результаты исследования влияния диаметра прутка на напряженно-деформированное состояние витковой клеммы. Количество витков 2,4; шаг витка 17 мм.

Как можно увидеть на рис. 10, при изменении диаметра прутка клеммы разница в диаметрах витка клеммы незначительна, менее 1 %. Наиболее оптимальным при этом является диаметр прутка 16 мм, так как он обеспечивает наибольшие перемещения средней части клеммы, а напряжения при этом не превышают предела текучести.

Таким образом, наиболее оптимальными геометрическими параметрами конструкции упругих клемм в виде пружины кручения с двумя участками навивки являются: диаметр витка клеммы $D = 50$ мм; диаметр прутка

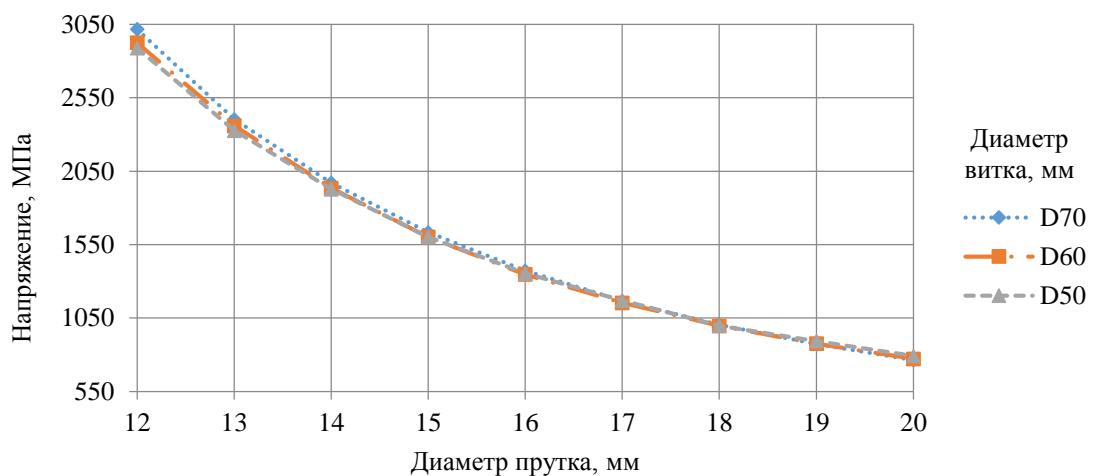


Рис. 10. Зависимость напряжений витковой клеммы от диаметра прутка клеммы

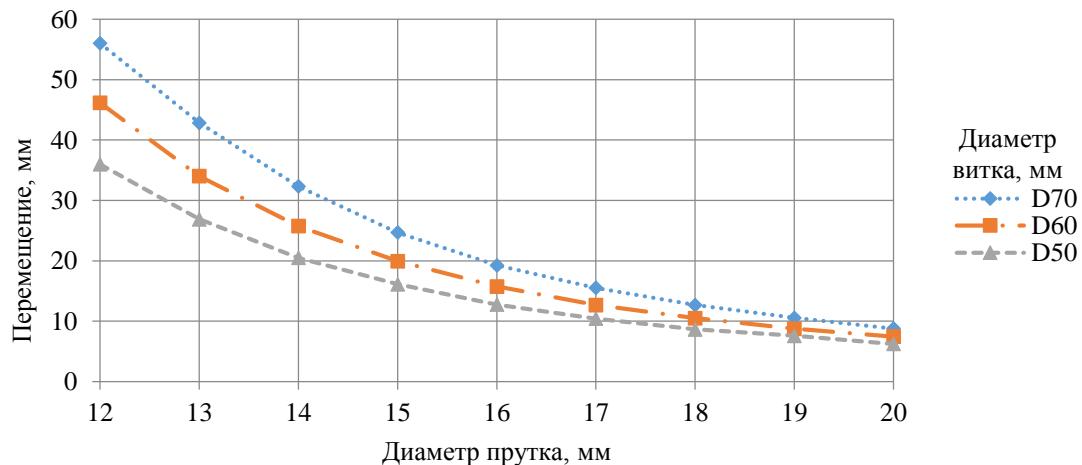


Рис. 11. Зависимость перемещений средней части витковой клеммы от диаметра прутка клеммы

Напряженно-деформированное состояние компьютерной модели витковой клеммы с оптимальными геометрическими параметрами

Нагрузка, кН	Напряжение внешнего витка, МПа	Напряжение среднего витка, МПа	Напряжение внутреннего витка, МПа	Перемещение в точке приложения силы, мм
2	266,5	267,7	270,8	2,6
4	538,0	532,2	546,7	5,1
6	814,0	802,9	820,0	7,7
8	1 085,3	1 070,6	1 093,3	10,3
10	1 344,2	1 338,2	1 354,2	12,8

клеммы $d = 16$ мм; шаг витка клеммы $l = 17$ мм; количество витков $n = 2,4$ на один участок навивки (на полуклемму).

Изменение напряженно-деформированного состояния такой клеммы в зависимости от прикладываемого усилия приведено в таблице.

Выводы

Главным преимуществом витковой клеммы в виде пружины кручения двойной навивки является минимизация плеча приложения прижимного усилия клеммы, что позволит снизить его величину при сохранении необходимого погонного сопротивления сдвигу рельсовой нити. Таким образом, усилие прижатия такой клеммы будет составлять порядка 11 кН.

Проведен анализ 48 компьютерных моделей витковых пружинных прутковых клемм с целью выявить закономерности изменения их напряженно-деформированного состояния. Границы вариантов рассматриваемых геометрических параметров:

- диаметр витка клеммы D : 50, 60 и 70 мм;
- диаметр прутка клеммы d : от 12 до 20 мм;
- шаг витка клеммы l ($d+1$): 20 мм, 25 мм, 30 мм;
- количество витков клеммы n : 1,4; 2,4 и 3,4.

Анализ напряженно-деформированного состояния витковой клеммы показал влияние параметров клеммы при их варьировании: шаг витка клеммы – низкий рост напряжений в среднем на 11,3 %, рост перемещений средней части клеммы на 37,4 % (17–30 мм); диаметр прутка клеммы – снижение напряжений в среднем на 75,3 %, снижение перемещений на 84,7 % (12–20 мм); число витков клеммы – снижение напряжений в среднем на 75,3 %, рост перемещений на 141 % (1,4–3,4); диаметр витка клеммы – низкий рост напряжений в среднем на 1,8 %, рост перемещений на 50,9 % (50–70 мм).

Исходя из геометрии рельса, взаимного расположения предполагаемых элементов узла скрепления, обеспечения оптимального напряженно-деформированного состояния и как можно меньшей материалоемкости клеммы наиболее оптимальными параметрами конструкции упругих клемм в виде пружины кручения являются: диаметр витка 50 мм; количество витков полуклеммы 2,4; диаметр прутка 16 мм; шаг витка 17 мм.

Список источников

1. Карюкин М. А. Многовариантное моделирование параметров конструкции упругих клемм современных рельсовых скреплений, с анализом их напряженно-деформированного состояния // Известия ПГУПС. 2023. № 3. С. 507–518.
2. Альбом элементов и конструкций верхнего строения пути : утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 19.12.2011. Москва, 2012.
3. Определение напряженно-деформированного состояния и усталостной прочности клемм ЖБР-3 / Л. Г. Крысанов, А. А. Дорошкевич, А. С. Антипов [и др.] // Повышение надежности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации : сборник научных трудов. Москва : Интекст, 2000. С. 93–99. (Труды Всероссийского ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института железнодорожного транспорта).
4. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2288/р от 14.11.2016. Москва, 2016. 286 с.
5. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2544/р от 14.12.2016. Москва, 2016. 176 с.
6. Карпушенко Н. И., Антонов Н. И. Совершенствование рельсовых скреплений. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2003. 300 с.

7. Патент № 141875 Российской Федерации, МПК E01B 9/48 (2006.01). Устройство для крепления рельса : № 2014101576/11 : заявл. 20.01.2014 : опубл. 20.06.2014 / Величко Д. В., Антонов Н. И., Карпушченко Н. И. ; заявитель СГУПС. 5 с.

8. Патент № 162250 Российской Федерации, МПК E01B 9/48 (2006.01). Устройство для крепления рельса : № 2015150589/11 : заявл. 25.11.2015 : опубл. 27.05.2016 / Величко Д. В., Антонов Н. И., Карпушченко Н. И. ; заявитель СГУПС. 8 с.

9. Патент № 2744086 Российской Федерации, МПК E01B 9/14 (2006.01), E01B 9/30 (2006.01), E01B 9/48 (2006.01). Анкерное рельсовое скрепление : № 2020130537 : заявл. 15.09.2020 : опубл. 02.03.2021 / Каюкин М. А., Величко Д. В., Банул В. В. ; заявитель СГУПС. 4 с.

10. ГОСТ Р 50753–95. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из специальных сталей и сплавов. Общие технические условия : утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 03.09.95 № 109. Москва : Госстандарт России, 1995. 36 с.

11. ГОСТ 13768–86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения I класса, разряда 3 из стали круглого сечения. Основные параметры витков. Москва : Издательство стандартов, 2008. 10 с.

12. ГОСТ 16118–70. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2005. 13 с.

13. Ливотов В. С., Просвирев А. С., Напалков А. В. Технологические расчеты упругих элементов. Руководящий технический материал. Часть 1. Проверочные расчеты пружин и пружинных колец. Волгоград, 2002. 16 с.

14. Величко Д. В., Антонов Н. И., Каюкин М. А. О разработке безрезьбовых скреплений // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 6. С. 31–32.

15. Тензометрия в транспортном машиностроении / А. Н. Серебренов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов [и др.]. Новосибирск : Наука, 2014. 272 с.

16. Karyukin M. A., Velichko D. V. Turn contact device for low-maintenance rail fastening // Networked control systems for connected and automated vehicles. 2023. Vol. 1. P. 337–346.

References

1. Karyukin M. A. Multivariate modeling of the design parameters of elastic terminals of modern rail fasteners, with an analysis of their stress-strain state. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2023;(3):507–518. (In Russ.).

2. Album of elements and structures of the upper structure of the path. Approved by the order of Russian Railways from 19.12.2011. Moscow; 2012. (In Russ.).

3. Krysanov L. G., Doroshkevich A. A., Antipov A. S. [et al.]. Determination of the stress-strain state and fatigue strength of the ZHBR-3 terminals. *Increasing the Reliability of the Upper Structure of the Track in Modern Operating Conditions. Proceedings of All-Russian Order of the Red Banner of Labour Research Institute of Railway Transport*. Moscow: Intext; 2000. P. 93–99. (In Russ.).

4. Instructions for the current maintenance of the railway track. Approved by the Order of Russian Railways No. 2288/r on 14.11.2016, Moscow; 2016. 286 p. (In Russ.).

5. Instructions for the installation, installation, maintenance and repair of a jointless track. Approved by the Order of Russian Railways No. 2544/r dated 14.12.2016. Moscow; 2016. 176 p. (In Russ.).

6. Karpushchenko N. I., Antonov N. I. Improvement of rail fasteners. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Transport University; 2003. 300 p. (In Russ.).

7. Patent No. 141875 Russian Federation, IPC E01B 9/48 (2006.01). Rail mounting device: No.2014101576/11: application 20.01.2014: published 20.06.2014 / Velichko D. V., Antonov N. I., Karpushchenko N. I.; applicant Siberian Transport University. 5 p. (In Russ.).

8. Patent No. 162250 Russian Federation, IPC E01B 9/48 (2006.01). Rail mounting device: No.2015150589/11: application 25.11.2015: published 27.05.2016 / Velichko D. V., Antonov N. I., Karpushchenko N. I.; applicant Siberian Transport University. 8 p. (In Russ.).

9. Patent No.2744086 Russian Federation, IPC E01B 9/14 (2006.01), E01B 9/30 (2006.01), E01B 9/48 (2006.01). Anchor rail fastening: No. 2020130537: application 15.09.2020: published 02.03.2021 / Karyukin M. A., Velichko D. V., Banul V. V.; applicant Siberian Transport University. 4 p. (In Russ.).

10. ГОСТ Р 50753–95. Цилиндрические helical compression and tension springs made of special steels and alloys. General technical conditions. Approved and put into effect by Decree of Gosstandart of Russia from 03.09.95 No. 109. Moscow: Gosstandart of Russia; 1995. 36 p. (In Russ.).

11. ГОСТ 13768–86. Цилиндрические helical compression and tension springs of class I, category 3 made of round-section steel. The main parameters of the coils. Moscow: Publishing House of Standards; 2008. 10 p. (In Russ.).

12. GOST 16118–70. Cylindrical helical compression and tension springs made of round-section steel. Technical specifications. Moscow: Standartform; 2005. 13 p. (In Russ.).
13. Livotov V. S., Prosvirov A. S., Napalkov A. V. Technological calculations of elastic elements. Technical guidance material. Part 1. Verification calculations of springs and spring rings. Volgograd; 2002. 16 p. (In Russ.).
14. Velichko D. V., Antonov N. I., Karyukin M. A. On the development of threadless fasteners. *Track and Track Facilities*. 2020;(6):31–32. (In Russ.).
15. Sereznov A. N., Stepanova L. N., Kabanov S. I. [et al.]. Tensometry in transport engineering. Novosibirsk: Nauka; 2014. 272 p. (In Russ.).
16. Karyukin M. A., Velichko D. V. Turn contact device for low-maintenance rail fastening. *Networked control systems for connected and automated vehicles*. 2023;1:337–346.

Информация об авторах

М. А. Кaryukin – доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

Information about the authors

M. A. Karyukin – Associate Professor of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

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

Статья поступила в редакцию 11.07.2024; одобрена после рецензирования 24.09.2024; принятa к публикации 03.10.2024.

The article was submitted 11.07.2024; approved after reviewing 24.09.2024; accepted for publication 03.10.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 620.172.21

doi 10.52170/1815-9265_2024_72_90

Определение углов наклона поверхности тонких пластин методом голографического муара

Анатолий Михайлович Попов^{1✉}, Виктор Михайлович Тихомиров²,
Владимир Борисович Зиновьев³

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

¹ 47604@mail.ru[✉]

² twm@stu.ru

³ vbtzinoviev@mail.ru

Аннотация. В данной работе показано, что если при записи голограмм регистрирующую среду располагать на значительном расстоянии от поверхности рабочего растра, то регистрируемая оптическая информация в большей степени определяется углами наклона изучаемой поверхности. При выводе разрешающего уравнения нормальная компонента вектора перемещения раскладывалась в ряд Тейлора в окрестности точки исследуемой поверхности, формирующей опорный пучок. В уравнении удерживался только линейный член ряда. Также учтено, что для пластин средней толщины касательные к пластине перемещения пропорциональны углу наклона. В статье описывается методика нанесения рабочего растра на исследуемую поверхность с применением растр-реплики. Приведены результаты исследования изгиба тонкой, круглой, жестко защемленной пластины. Жесткое защемление моделировалось резким изменением толщины пластины. Пластина изготавливается на токарном станке. Средняя цилиндрическая жесткость определялась экспериментально, по величине максимального прогиба пластины, определенной с помощью голографической интерферометрии. При проведении испытаний записывалась двухэкспозиционная голограмма во встречных пучках при разных уровнях гидростатического давления на пластину. Регистрировались картины интерференционных полос, наблюдавшиеся в проходящем через голограмму свете в +1-м и -1-м порядках дифракции. Координаты центра интерференционных полос на картинах определялись вручную. Информация, полученная в +1-м и -1-м порядках, аппроксимировалась степенными полиномами с помощью программы для работы с электронными таблицами Excel. За уравнение углов наклона средней линии пластины принималась полуразность этих полиномов. Получено хорошее совпадение экспериментальных данных, обработанных с помощью новых разрешающих уравнений, с теоретическим решением.

Ключевые слова: пластины, изгиб, голографическая интерферометрия, муар, углы наклона поверхности

Для цитирования: Попов А. М., Тихомиров В. М., Зиновьев В. Б. Определение углов наклона поверхности тонких пластин методом голографического муара // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 90–96. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_90.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Determination of surface inclination angles of thin plates by holographic moiré method

Anatoliy M. Popov^{1✉}, Victor M. Tikhomirov², Vladimir B. Zinov'yev³

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

¹ 47604@mail.ru[✉]

² twm@stu.ru

³ vbtzinoviev@mail.ru

Abstract. This work shows that if, when recording holograms, the recording medium is located at a considerable distance from the surface of the working raster, then the recorded optical information is largely determined by the angles of inclination of the surface being studied. When deriving the resolving equation, the normal component of the displacement vector was expanded into a Taylor series in the vicinity of a point on the surface under study, forming a reference beam. Only the linear term of the series was retained in the equation. It is also taken into account that for plates of medium thickness, the displacements tangent to the plate are proportional to the angle of inclination. The article describes the technique of applying a working raster to the surface under study using a replica raster. The results of a study of the bending of a thin, round, rigidly clamped plate are presented. Hard

pinching was modeled by a sharp change in the thickness of the plate. The plate was made on a lathe. The average cylindrical stiffness was determined experimentally, based on the maximum deflection of the plate determined using holographic interferometry. During the tests, a spirit-exposure hologram was recorded in colliding beams at different levels of hydrostatic pressure on the plate. The patterns of interference fringes observed in light passing through the hologram in +1 and -1 diffraction orders were recorded. The coordinates of the center of the interference fringes in the paintings were determined manually. Information obtained in the +1 and -1 orders was approximated by power polynomials using the Excel spreadsheet program. The half-difference of these polynomials was taken as the equation for the inclination angles of the midline of the plate. A good agreement between the experimental data processed using new resolving equations and the theoretical solution was obtained.

Keywords: plates, bending, holographic interferometry, moiré, surface inclination angles

For citation: Popov A. M., Tikhomirov V. M., Zinov'yev V. B. Determination of surface inclination angles of thin plates by holographic moiré method. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):90–96. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_90.

Введение

Предложенный Ю. Н. Денисюком способ записи голограмм [1, 2] привел к возникновению нового направления развития экспериментальных методов исследования деформированного состояния изделий. Принципиальной их особенностью была запись голограмм в две экспозиции на регистрирующую среду, закрепленную непосредственно на исследуемом объекте [3–5]. При восстановлении голограмм во встречных пучках, записанных в две экспозиции у поверхности исследуемого объекта, удается, изменяя направления наблюдения, регистрировать различные интерференционные картины [6, 7]. Ранее картины полос, наблюдаемые в отраженном голограммой свете, интерпретировались как голографическая интерферометрия [8–10]. Картины полос, восстанавливаемые в проходящем сквозь голограмму свете, если голограмма записывалась у поверхности металлизированного растра [11, 12], считались эквивалентными картинам метода муаровых полос, а при записи голограмм у диффузно отражающих поверхностей – эквивалентными картинам метода спекл-фотографии [13, 14]. В каждом из перечисленных здесь случаев использовались свои разрешающие уравнения, не связанные между собой.

При исследовании плоских задач теории упругости результаты расшифровки этих картин отличались друг от друга более чем на 10 %. Расширение круга исследуемых задач показало, что использование традиционного соотношения метода спекл-фотографии в ряде случаев приводит к неверному результату; дифракционные картины, наблюдаемые на отражение, не совпадают с наблюдаемыми на просвет; интерференционные картины, наблюдаемые в дифракционном гало при освещении голограммы неразведенным пучком света, зачастую не являются системами эквидистантных прямолинейных по-

лос. В связи с этим возникла задача корректировки разрешающих уравнений.

В работе [15] показано, что положение интерференционных полос, регистрируемых в проходящем через регистрирующую среду свете, описывается уравнением

$$U_B \sin \alpha + W_B (1 + \cos \alpha) - 2W_D = N\lambda, \quad (1)$$

где U_B , W_B – перемещения вдоль осей X и Z точки, формирующей объектную волну; α – угол между направлением наблюдения и осью Z ; W_D – перемещение вдоль оси Z точки, формирующей опорную волну; N – номер интерференционной полосы; λ – длина используемой световой волны.

При записи выражения (1) предполагалось, что картина полос зарегистрирована в плоскости XOZ . Ось Z направлена по нормали к изучаемой поверхности, ось X – по касательной к данной поверхности в наблюдаемой точке.

Материалы и методы исследования

Учитывая гладкость функций перемещений, можно в первом приближении воспользоваться линейной аппроксимацией компоненты перемещения W . Для этого разложим в ряд Тейлора нормальное перемещение в окрестности точки B и удержим только первый член:

$$U_B \sin \alpha + W_B (1 + \cos \alpha) - 2 \left(W_B + \frac{\partial W}{\partial x} \Delta x \right) = N\lambda. \quad (2)$$

В уравнении (2) Δx – расстояние между точками, создающими объектную и опорную волну. При изучении плоских поверхностей $\Delta x = H \operatorname{tg} \alpha$, где H – расстояние между регистрирующей средой и изучаемой поверхностью.

Для тонких пластин выполняется выражение $U = \frac{\partial W}{\partial x} h$, где h – половина толщины пластины, тогда уравнение (2) принимает вид

$$W_B (\cos \alpha - 1) - \frac{\partial W}{\partial x} (2H \operatorname{tg} \alpha - h \sin \alpha) = N\lambda. \quad (3)$$

Если зарегистрировать с двух симметричных относительно оси Z направлений интерференционные картины полос, то можно определить закон изменения угла наклона исследуемой поверхности:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{(N_2 - N_1)\lambda}{2(2H \tan \alpha - h \sin \alpha)}, \quad (4)$$

где N_2 и N_1 – порядки полос, наблюдаемых с симметричных относительно оси Z направлений.

При записи двух экспозиционных голограмм во встречных пучках вблизи диффузно отражающих поверхностей качество интерференционных картин резко ухудшается с увеличением угла наблюдения и зазора между регистрирующей средой и изучаемой поверхностью. Вследствие этого определение углов наклона диффузно отражающих поверхностей практически невозможно. Применение металлизированных рабочих растров [15, 16] позволяет значительно улучшить качество картин, наблюдаемых на просвет, и допускает возможность исследования углов наклона поверхности растра. В этом случае углы наблюдения строго определены:

$$\sin \alpha = n\lambda\Psi, \quad (5)$$

где n – дифракционный порядок; Ψ – частота растра.

Учитывая это, углы наклона поверхностей пластин средней толщины можно определять по картинам полос, наблюдаемых в +1-м и -1-м порядках дифракции в проходящем свете, сквозь голограммы, записанные у поверхности металлизированного рабочего растра. Разрешающие уравнения при этом принимают вид:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{(N_2 - N_1)\sqrt{1 - \lambda^2\Psi^2}}{2\Psi(2H - h\sqrt{1 - \lambda^2\Psi^2})}. \quad (6)$$

Для проверки полученного уравнения был поставлен тестовый эксперимент по исследованию изгиба изотропной круглой, жестко защемленной пластины, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой. Углы наклона срединной плоскости пластины описываются уравнением [14]:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{qR^3\xi}{16D}(1 - \xi^2 - \eta^2), \quad (7)$$

где q – интенсивность распределенной нагрузки; R – радиус пластины; $\xi = \frac{x}{R}$,

$\eta = \frac{y}{R}$ – относительные координаты; x и y –

координаты точки, отсчитываемые от центра пластины; D – цилиндрическая жесткость.

Внешний вид нагружного устройства и исследуемой пластины представлены на рис. 1. Во время эксперимента объем под пластиной заполнялся водой. Резервуар с помощью резиновой трубки соединялся со стеклянной измерительной трубкой.

Когерентный волновой фронт

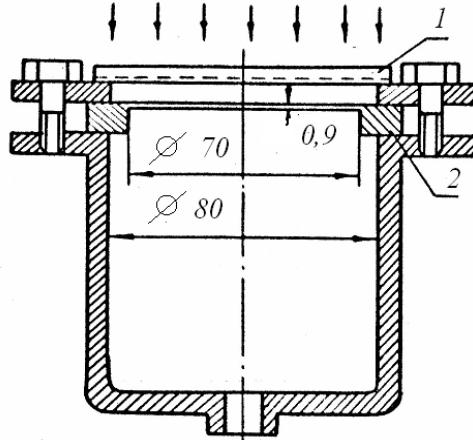


Рис. 1. Внешний вид нагружного устройства:
1 – регистрирующая среда; 2 – изучаемая
пластина

Опытным путем было определено, что жесткое защемление пластины лучше всего моделируется резким изменением ее толщины. Пластина изготавливалась на токарном станке, ее толщина в тонкой части изменяется 0,87 до 0,91 мм, в толстой части составляет 10 мм. Гидростатическое давление на пластину осуществлялось изменением уровня воды в измерительной трубке. Для определения средней величины цилиндрической жесткости был проведен предварительный эксперимент, во время которого в две экспозиции записывалась голограмма во встречных пучках и регистрировалась интерференционная картина, наблюдаемая в отраженном свете по нормали к голограмме. В этом случае интерференционные полосы являются линиями равных прогибов поверхности пластины, с ценой полосы $\frac{\lambda}{2}$. На рис. 2 представлена картина по-

лос, зарегистрированная при разности нагрузок между экспозициями 1,8 кПа. В центре пластины расположена интерференционная полоса с номером 27, следовательно, максимальный прогиб составляет 8,54 мкм. Максимальный прогиб пластины определяется выражением

$$W_{\max} = \frac{qR^4}{64D}. \quad (8)$$

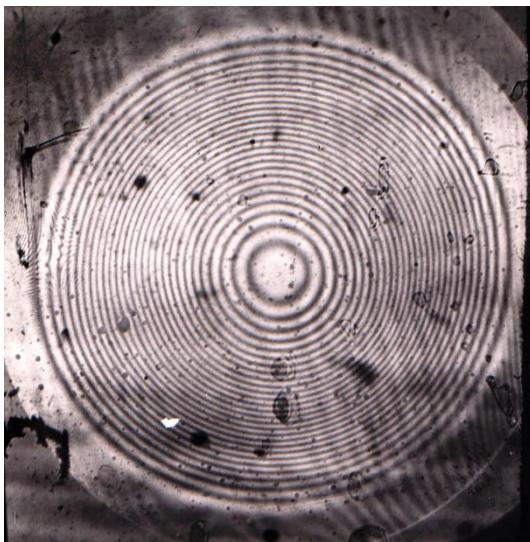


Рис. 2. Интерференционная картина в нулевом отраженном порядке

Отсюда следует, что средняя цилиндрическая жесткость пластины составляет 4,76 Н·м.

На поверхность пластины наносится рабочий растр частотой 120 мм⁻¹ [17]. Для его нанесения предварительно изготавливается растр-реплика. Для этого на фотопластинке типа ПЭ-2 записывается стоячее интерференционное поле (рис. 3, а). Фотопластинка подвергается фотохимической обработке и отбеливается (см. рис. 3, б), затем естественным способом сушится.

На поверхность обработанной эмульсии с помощью термического вакуумного напыле-

ния наносится слой алюминия или другого металла (см. рис. 3, в). Таким образом получается растр-реплика. Для создания рабочего растра растр-реплика слоем металла приклеивается к участку изучаемой поверхности (рис. 4, а, б), при этом используется любой полимеризующийся клей. Далее стеклянная основа фотопластинки удаляется, а на поверхности остается слой металла (рабочий растр), который представляет собой отражающую фазовую решетку (см. рис. 4, в).

Голограмма записывалась в две экспозиции на фотопластинку ПЭ-2, установленную на расстоянии 19 мм от поверхности растра.

Результаты исследования

На рис. 5 приведены фотографии картин полос, восстанавливаемых голограммой, записанной в две экспозиции: рис. 5, а – в +1-м порядке дифракции и рис. 5, б – в -1-м. Плоскость регистрации картин, приведенных на рис. 5, горизонтальна. Давление на поверхность пластины между первой и второй экспозициями изменялось на 3,3 кПа. Цена полосы, вычисленная по формуле

$$\frac{\sqrt{1-\lambda^2\Psi^2}}{\Psi(2H-h\sqrt{1-\lambda^2\Psi^2})},$$

составляет $2,16 \cdot 10^{-4}$.

Координаты интерференционных полос снимались вручную по фотографиям в большом масштабе. Полученная информация обрабатывалась с помощью программы Excel. При том экспериментальные данные по



Рис. 3. Изготовление растр-реплики:
а – регистрация волнового фронта; б – поверхность фотэмульсии I после химической обработки;
в – напыление слоя металла

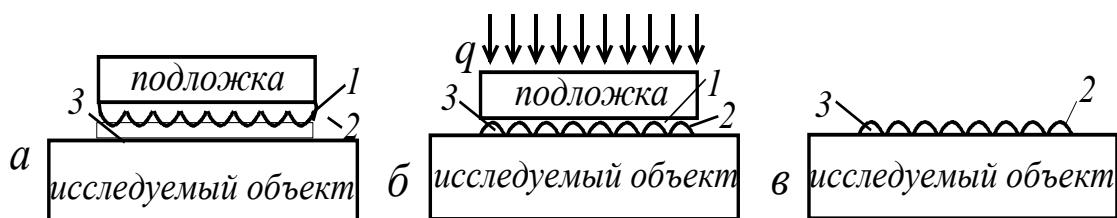


Рис. 4. Нанесение рабочего растра:
а – приклеивание растр-реплики; б – сушка клея; в – объект с удаленной подложкой;
1 – фотэмulsionия; 2 – напыленный металл; 3 – слой клея

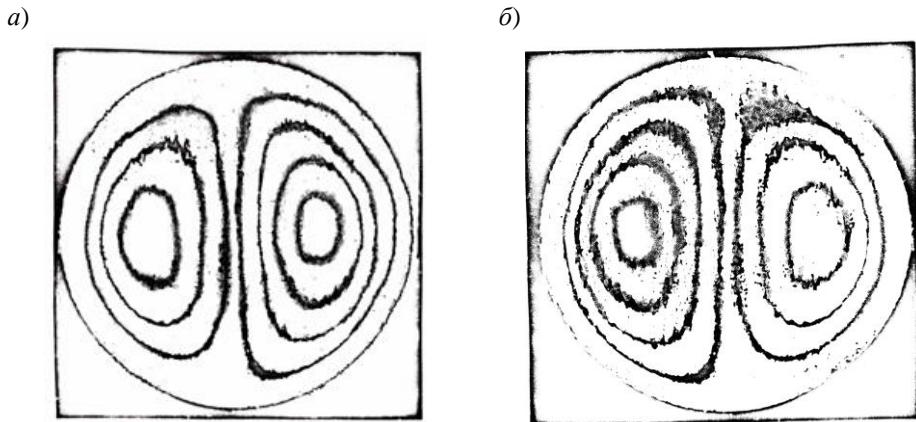


Рис. 5. Фотографии картин полос, наблюдаемых в +1-м (а) и -1-м (б) порядках, $\Psi = 120 \text{ мм}^{-1}$

методу наименьших квадратов сглаживались полиномом третьей степени. На рис. 6 приведены результаты обработки картин полос вдоль горизонтального диаметра.

Кривая 1 – результат обработки информации, зарегистрированной в -1-м порядке; сглаживающий полином имеет вид

$$f_1 = (18,355\xi^3 - 1,2868\xi^2 + 18,2323\xi + 1,1262) \cdot 10^{-4}. \quad (9)$$

Кривая 2 – то же для +1-го порядка, и полином имеет вид

$$f_1 = (-18,0455\xi^3 - 1,3519\xi^2 + 17,963\xi + 1,1044) \cdot 10^{-4}. \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10) сохранены только первые четыре члена ряда, так как множители при высших порядках относительной координаты ξ на два порядка меньше.

Кривая 3 – это эпюра $\frac{dW}{dx}$, которая является полуразностью кривых 1 и 2. Уравнение этой кривой представляет собой полуразность уравнений (9) и (10) и имеет вид

$$\frac{dW}{dx} = (18,2\xi^3 + 0,0326\xi^2 - 18,097\xi + 0,0109) \cdot 10^{-4}. \quad (11)$$

При записи выражений (9)–(11) не учитывалась точность определения координат. Приведенные уравнения выданы программой Excel.

Теоретически максимум угла наклона находится при $\xi = \pm \frac{\sqrt{3}}{3} = \pm 0,577$ и в рассматриваемом случае, вычисленный по формуле (7), равен $\pm 6,89 \cdot 10^{-4}$. Уравнение (11) имеет

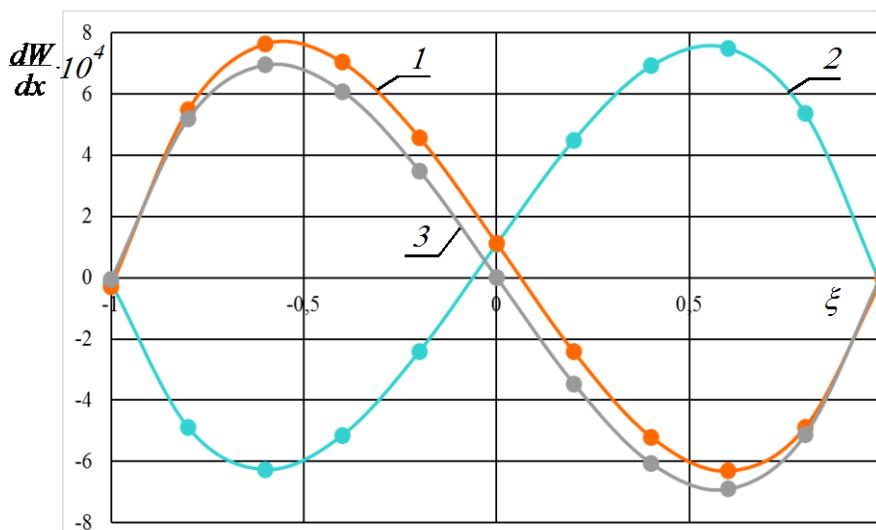


Рис. 6. Результаты обработки оптической информации

экстремумы при $\xi = -0,576$ и $\xi = 0,575$. Максимальные углы наклона, вычисленные по формуле (11), составляют $6,97 \cdot 10^{-4}$ и $-6,93 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, максимальные значения углов наклона, вычисленные по теоретическим формулам и определенные экспериментально, отличаются менее чем на 1,2 %.

Выводы

Предложенная методика позволяет с высокой чувствительностью определять поле углов наклона тонких пластинок. Увеличение зазора между поверхностью исследуемой пластины и регистрирующей средой повышает

чувствительность, но при этом ухудшается качество интерференционных картин.

Описанный способ определения углов наклона поверхности является аналогом метода сдвиговой интерферометрии, который используется в голографической интерферометрии и в методе муаровых полос. Сущность метода заключается в том, что регистрируются интерференционные полосы, возникающие при наложении со сдвигом картин полос. В нашем случае накладывались картины полос, аналогичные приведенным на рис. 2, только с большей частотой полос. Величина сдвига составляла порядка 1,2 мм.

Список источников

1. Денисюк Ю. Н. Принципы голографии. Ленинград : Издательство Государственного оптического института имени С. И. Вавилова, 1979. 125 с.
2. Yoshizawa T. Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications. Second Edition. CRC Press, 2015. 919 p.
3. Zhilkin V. A. Application of superimposed holographic interferometers in experimental mechanics // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 1992. № 2. Р. 245–283.
4. Герасимов С. И., Жилкин В. А. Накладная голографическая интерферометрия непрозрачных объектов при низких температурах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 1 С. 63–69.
5. Герасимов С. И., Жилкин В. А. Контактный голографический интерферометр для исследования деформаций оболочек вращения малой кривизны // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47, № 3 (277). С. 176–183.
6. Жилкин В. А., Зиновьев В. Б. Возможные методы расшифровки голографических объемных интерферограмм, записанных у поверхности металлизированных растротов // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений. Новосибирск, 1980. С. 113–120.
7. Накладные голографические интерферометры / В. А. Жилкин, Л. А. Борыняк, С. И. Герасимов, В. Б. Зиновьев // Интерференционно-оптические методы механики твердого деформируемого тела и механики горных пород : сборник тезисов. 1985. С. 68.
8. Жилкин В. А., Герасимов С. И. О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного интерферометра // Журнал технической физики. 1982. Т. 52, № 10. С. 2079–2085.
9. Герасимов С. И., Жилкин В. А. Исследование деформирования деревянного нагельного соединения элемента моста методом контактной голографической интерферометрии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 12 (636). С. 105–109.
10. Герасимов С. И., Жилкин В. А. Исследование деформирования деревянного соединения элемента моста методом контактной голографической интерферометрии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 12 (636). С. 105–109.
11. Жилкин В. А., Попов А. М. Голографический муаровый метод. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1979. Т. 45, № 11. С. 1039–1042.
12. Жилкин В. А. Исследование упругопластических задач методом голографического муара // Проблемы прочности. 1984. № 12. С. 69–75.
13. Волков И. В. Внестендовая спекл-голография, использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натурных конструкций // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 1. С. 82–89.
14. Razumovsky I. A. Interference-Optical Methods of Solid Mechanics. Berlin Heidelberg : Springer, 2011. 180 p.
15. Экспериментальное определение допустимых расстояний между нагелями в древесине / А. М. Попов, В. Б. Зиновьев, Л. И. Ким, Л. А. Сподарева // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2012. № 28. С. 160–167.
16. Чижевский К. Г. Расчет круглых и кольцевых пластин : справочное пособие. Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1977. 184 с.
17. Попов А. М., Зиновьев В. Б., Сподарева Л. А. Деформированное состояние элементов деревянных конструкций вблизи нагеля круглого сечения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 3. С. 77–80.

References

1. Denisyuk Yu. N. Principles of holography. Leningrad: Publishing House of the S. I. Vavilov State Optical Institute; 1979. 125 p. (In Russ.).
2. Yoshizawa T. Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications. Second Edition. CRC Press; 2015. 919 p.
3. Zhilkin V.A. Application of superimposed holographic interferometers in experimental mechanics. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 1992;(2):245–283.
4. Gerasimov S. I., Zhilkin V. A. Superimposed holographic interferometry of opaque objects at low temperatures. *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. 2004;(1):63–69. (In Russ.).
5. Gerasimov S. I., Zhilkin V. A. Contact holographic interferometer for studying deformations of shells of rotation of small curvature. *Applied Mechanics and Technical Physics*. 2006;47(277):176–183. (In Russ.).
6. Zhilkin V. A., Zinovyev V. B. Possible methods for deciphering holographic volumetric interferograms recorded near the surface of metallized rasters. *Mechanics of a Deformable Body and Calculation of Transport Structures*. Novosibirsk; 1980. P. 113–120. (In Russ.).
7. Zhilkin V. A., Borynyak L. A., Gerasimov S. I., Zinovyev V. B. Surface-mounted holographic interferometers. *Interference-optical Methods of Mechanics of Solid Deformable Bodies and Mechanics of Rocks. Collection of abstracts*. 1985. P. 68. (In Russ.).
8. Zhilkin V. A., Gerasimov S. I. On the possibility of studying the deformed state of products using a surface-mounted interferometer. *Journal of Technical Physics*. 1982;52(10):2079–2085. (In Russ.).
9. Gerasimov S. I., Zhilkin V. A. Study of deformation of a wooden dowel connection of a bridge element using contact holographic interferometry. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2011;(636):105–109. (In Russ.).
10. Gerasimov S. I., Zhilkin V. A. Study of deformation of a wooden connection of a bridge element using the method of contact holographic interferometry. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2011;(636):105–109. (In Russ.).
11. Zhilkin V. A., Popov A. M. Holographic moiré method. Factory laboratory. *Diagnostics of Materials*. 1979.;45(11):1039–1042. (In Russ.).
12. Zhilkin V. A. Study of elastoplastic problems using the holographic moiré method. *Problems of Strength*. 1984;(12):69–75. (In Russ.).
13. Volkov I. V. Off-bench speckle holography, the use of holographic and speckle interferometry in measuring deformations of full-scale structures. *Computer Optics*. 2010;34(1):82–89. (In Russ.).
14. Razumovsky I. A. Interference-Optical Methods of Solid Mechanics. Berlin Heidelberg: Springer; 2011. 180 p.
15. Popov A. M., Zinovyev V. B., Kim L. I., Spodareva L. A. Experimental determination of permissible distances between dowels in wood. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2012;(28):160–167. (In Russ.).
16. Chizhevsky K. G. Calculation of round and ring plates. Reference manual. Leningrad: Mechanical Engineering, Leningrad department, 1977. 184 p. (In Russ.).
17. Popov A. M., Zinovyev V. B., Spodareva L. A. Deformed state of wooden structural elements near a round dowel. *Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East*. 2015;(3):77–80. (In Russ.).

Информация об авторах

А. М. Попов – заведующий кафедрой «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.

В. М. Тихомиров – профессор кафедры «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, доцент.

В. Б. Зиновьев – доцент кафедры «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A. M. Popov – Head of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.

V. M. Tikhomirov – Professor of the Construction Mechanics Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Associate Professor.

V. B. Zinovyev – Associate Professor of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering, Associate Professor.

Статья поступила в редакцию 10.07.2024; одобрена после рецензирования 04.10.2024; принята к публикации 15.10.2024.

The article was submitted 10.07.2024; approved after reviewing 04.10.2024; accepted for publication 15.10.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 625.7.8

doi 10.52170/1815-9265_2024_72_97

Анализ физико-механических характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог в зонах расположения железобетонных водопропускных труб

Елена Леонидовна Карелина

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, karelinaelena23@mail.ru

Аннотация. В статье выполнен анализ физико-механических характеристик грунтов земляного полотна в зонах расположения железобетонных водопропускных труб на основании изысканий, проведенных на одной из важнейших для Сибирского региона автомобильных дорог. Определены физико-механические характеристики грунтов земляного полотна в зонах расположения железобетонных водопропускных труб и объединены в инженерно-геологические элементы, приведены графики зависимости коэффициента уплотнения грунта от глубины проходки шурфа и динамического сопротивления грунтов, сопоставлены значения физико-механических характеристик грунтов и состояние дорожного покрытия в зонах расположения железобетонных водопропускных труб.

Установлено, что в зонах расположения железобетонных водопропускных труб при приближении к трубе увеличивается количество дефектов и деформаций дорожного покрытия. Физико-механические характеристики грунтов земляного полотна, расположенного вблизи железобетонной водопропускной трубы и на расстоянии 30 м от оси трубы, различаются. При удалении от оси железобетонной водопропускной трубы физико-механические характеристики грунтов улучшаются. Проведенные визуальные, натурные, лабораторные исследования и динамическое зондирование подтверждают этот вывод. Так, в пазухах водопропускных труб установлено динамическое сопротивление грунта земляного полотна 3 МПа, а на расстоянии 30 м от оси железобетонной водопропускной трубы – 4 МПа.

Рассматриваемое направление исследований является актуальным, так как своевременная, точная и быстрая оценка физико-механических характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог необходима для снижения дорожно-транспортных происшествий, рационального содержания и ремонта.

Ключевые слова: автомобильная дорога; земляное полотно; водопропускная труба; физико-механические характеристики грунтов

Для цитирования: Карелина Е. Л. Анализ физико-механических характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог в зонах расположения железобетонных водопропускных труб // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 97–105. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_97.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Analysis of the physical and mechanical characteristics of the roadbed soils in the areas of reinforced concrete culverts

Elena L. Karelina

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, karelinaelena23@mail.ru

Abstract. The article provides the analysis of the physical and mechanical characteristics of the roadbed soils in the areas of reinforced concrete culverts based on surveys conducted on one of the most important highways for the Siberian region. The physical and mechanical characteristics of the roadbed soils in the areas of reinforced concrete culverts are determined and combined into engineering and geological elements, graphs of the dependence of the soil compaction coefficient on the depth of the pit and the dynamic resistance of the soils are given, the values of the physical and mechanical characteristics of soils and the condition of the pavement in the areas of reinforced concrete culverts are compared.

It was found that in the areas of reinforced concrete culverts, when approaching the pipe, the number of defects and deformations of the pavement increases. The physical and mechanical characteristics of the roadbed soils located near the reinforced concrete culvert and at a distance of 30 m from the pipe axis differ. When moving away from the axis of the reinforced concrete culvert, the physical and mechanical characteristics of the soils improve. The conducted visual, field, laboratory studies and dynamic sensing confirm this conclusion. So, in the sinuses of

culverts, the dynamic resistance of the roadbed soil is set at 3 MPa, and at a distance of 30 m from the axis of the reinforced concrete culvert 4 MPa.

The research area under consideration is relevant, since timely, accurate and rapid assessment of the physical and mechanical characteristics of the roadbed soils is necessary to reduce road accidents and rational maintenance and repair.

Keywords: highway; roadbed; culvert; physical and mechanical characteristics of the roadbed soils

For citation: Karelina E. L. Analysis of the physical and mechanical characteristics of the roadbed soils in the areas of reinforced concrete culverts. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):97–105. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_97.

Введение

Улучшить содержание проблемных участков автомобильных дорог в зонах расположения водопропускных труб и оптимизировать финансовые затраты в случае ремонта позволит проведение качественного анализа физико-механических характеристик грунта земляного полотна [1–4].

Сибирский регион является крупным транспортным узлом нашей страны и характеризуется спектром железных и автомобильных дорог. Проектирование, строительство и ремонт автомобильных дорог осуществляются с учетом особенностей климатических условий региона. В дорожном строительстве наиболее распространены железобетонные водопропускные трубы, отличающиеся повышенными показателями герметичности и надежности. Благодаря удобству монтажа и невысокой стоимости эти изделия считаются наиболее экономически выгодными, осуществляют качественный и эффективный отвод воды с полотна дороги [5, 6].

В рамках данной работы обследованы участки автомобильной дороги Новосибирск – Кочки – Павлодар. Дорога имеет II техническую категорию: капитальный тип дорожной одежды – асфальтобетонное покрытие; две полосы движения. Соединяет г. Новосибирск с Таджикистаном, Узбекистаном, Киргизией и Казахстаном. С каждым годом это направление становится все более востребованным. Необходимо отметить, что пропорционально увеличиваются и нагрузки на сооружение, возрастает интенсивность и на некоторых участках скорость движения.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены в летний период, когда влажность наиболее стабильна, так как в весенний и осенний периоды дорожное покрытие подвержено воздействию избыточной влаги и перепадов температуры.

Состав экспериментальных исследований представлен на рис. 1.

Результаты исследования

Протяженность исследованных участков составила 334 км, в этих рамках автором рассмотрены 14 зон расположения железобетонных водопропускных труб, включающих трубу, земляное полотно и дорожную одежду. На рис. 2 представлен фотоотчет по объектам изысканий.

На обследуемых участках автомобильной дороги установлены сборные железобетонные водопропускные трубы диаметром от 0,8 до 1,5 м, одно-, двух- и трехчековые. Тип входного и выходного оголовков раструбный. Режим работы труб безнапорный.

Выявлено, что покрытие дороги находится в неудовлетворительном состоянии, с высокой степенью деформированности на 10 из 14 исследуемых участках. В аварийном состоянии находятся трубы на двух участках, а именно: на 20-м и 201-м км.

На рис. 3 приведена схема изысканий.

Исследования грунтов земляного полотна проведены в соответствии с ГОСТ 5180–2015 [7]. Определены следующие показатели грунта: влажность, консистенция, влажность на границе текучести, влажность на границе пластичности, плотность, плотность частиц (рис. 4), плотность сухого грунта, пористость, коэффициент пористости. Методом одноплоскостного среза [8] в соответствии с ГОСТ 12248.1–2020 получены: сопротивление срезу; угол внутреннего трения и удельное сцепление.

Анализ физико-механических характеристик грунтов позволил сгруппировать шесть инженерно-геологических элементов:

- ИГЭ-1п, ИГЭ-1с, ИГЭ-1р – супесь пылеватая, твердая, от плотной до рыхлой консистенции;

- ИГЭ-2п, ИГЭ-2с, ИГЭ-2р – суглинок пылеватый, легкий от плотной до рыхлой консистенции.

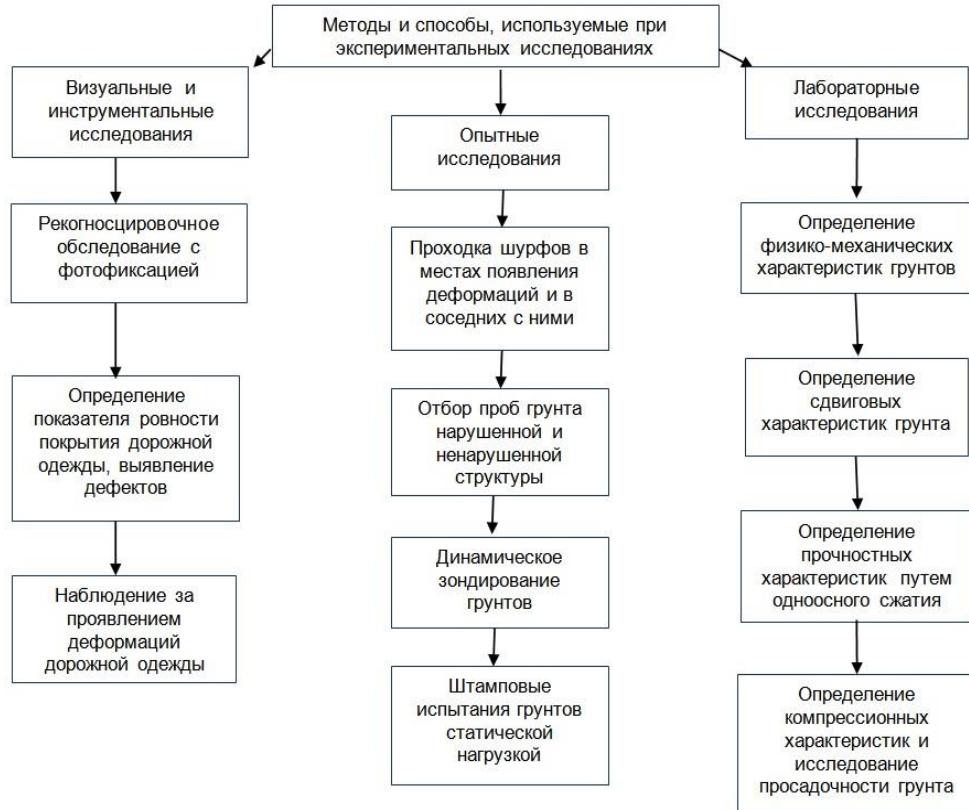


Рис. 1. Состав экспериментальных исследований

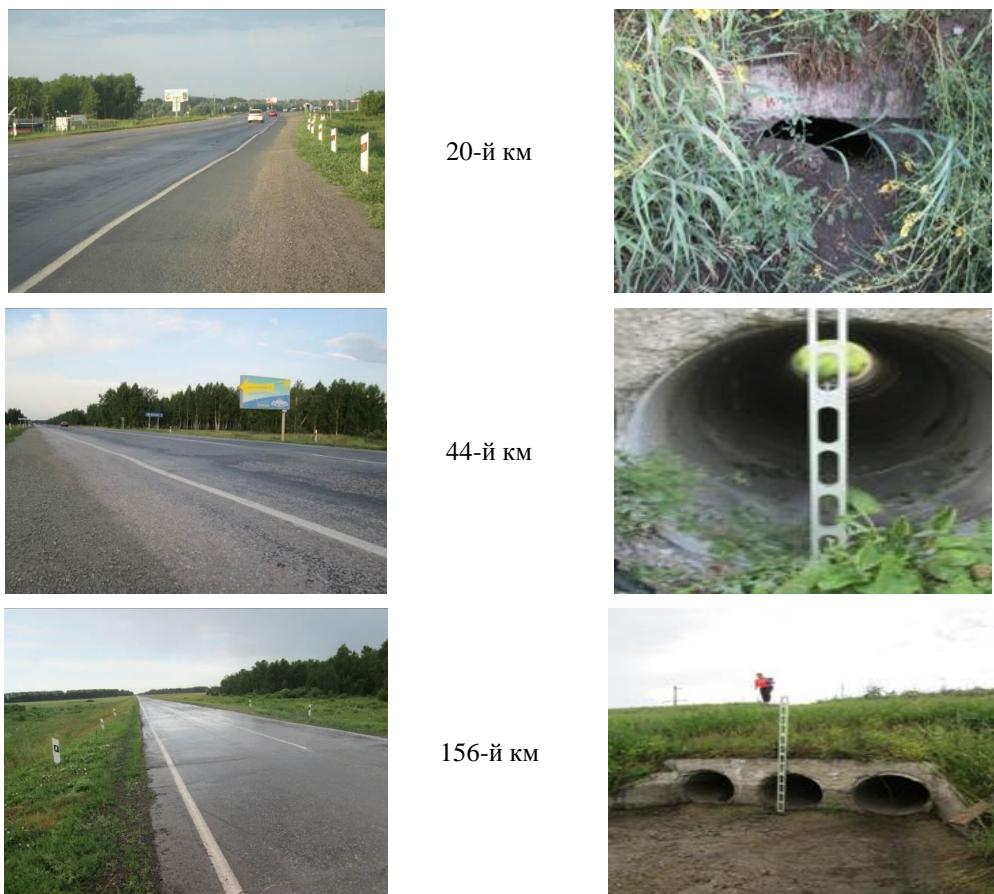


Рис. 2. Фотоотчет по объектам изысканий (начало)



171-й км



180-й км



182-й км



201-й км



205-й км



226-й км



Рис. 2. Фотоотчет по объектам изысканий (*продолжение*)



Рис. 2. Фотоотчет по объектам изысканий (окончание)

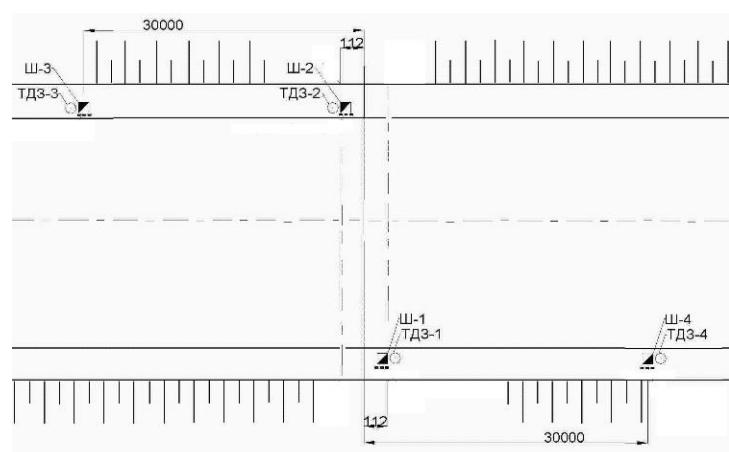


Рис. 3. Схема изысканий

В таблице приведены физико-механические характеристики грунтов по выделенным инженерно-геологическим элементам.

В соответствии с ГОСТ 22733–2016 [9] определены максимальная плотность грунта и коэффициент уплотнения грунта, построены графики по всем изучаемым зонам автомобильной дороги [10, 11]. На рис. 5 представлена зависимость коэффициента уплотнения

грунта от глубины проходки шурфов 1–4 на 20-м км.

На рис. 6 представлены графики условного динамического сопротивления P_d , соответствующего глубине зондирования h на 20-м км.

В процессе исследований обнаружено, что условное динамическое сопротивление грунтов в точках динамического зондирования 1 и 2 составляет 3 МПа, в точках 3 и 4 – 4 МПа.



Рис. 4. Определение физико-механических характеристик в лабораторных условиях

Физико-механические характеристики грунтов по выделенным инженерно-геологическим элементам

Инженерно-геологический элемент	Плотность частиц грунта ρ_s	Плотность грунта ρ	Плотность сухого грунта ρ_d	Пористость n	Коэффициент пористости e	Влажность W	Коэффициент водонасыщения S_r	Влажность на границе текучести W_1	Влажность на границе пластиичности W_p	Число пластиичности I_p	Показатель текучести I_L	Модуль деформации E , МПа	Угол внутреннего трения ϕ , град	Удельное сцепление C , МПа
ИГЭ-1п	2,69	1,88	1,66	38	0,620	0,13	0,56	0,27	0,22	5	< 0	10,3	28,8	0,020
ИГЭ-1с	2,69	1,77	1,55	42	0,739	0,14	0,51	0,28	0,23	5	< 0	8,3	26,9	0,018
ИГЭ-1р	2,69	1,67	1,46	46	0,841	0,14	0,45	0,27	0,22	5	< 0	3,8	25,7	0,014
ИГЭ-2п	2,70	1,90	1,64	39	0,651	0,16	0,67	0,33	0,22	10	< 0	9,9	25,6	0,027
ИГЭ-2с	2,71	1,84	1,55	43	0,746	0,19	0,69	0,33	0,22	10	< 0	7,8	24,4	0,023
ИГЭ-2р	2,71	1,75	1,48	45	0,830	0,19	0,61	0,33	0,22	10	< 0	5,9	23,2	0,022

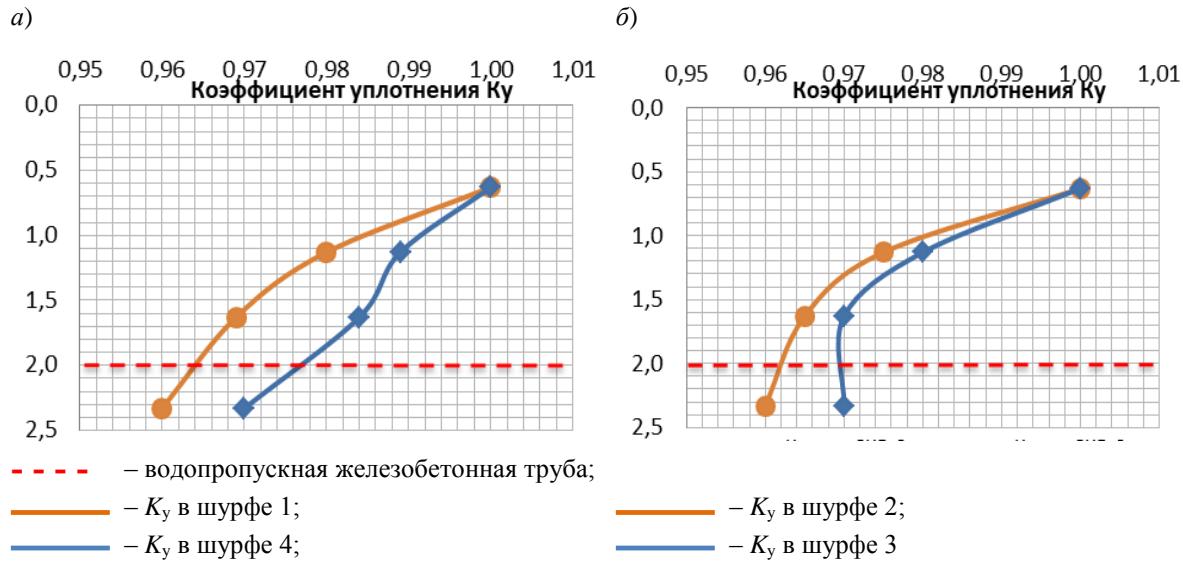


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента уплотнения грунта от глубины проходки шурfov 1–4 на 20-м км:
а – шурфы 1, 4; б – шурфы 2, 3

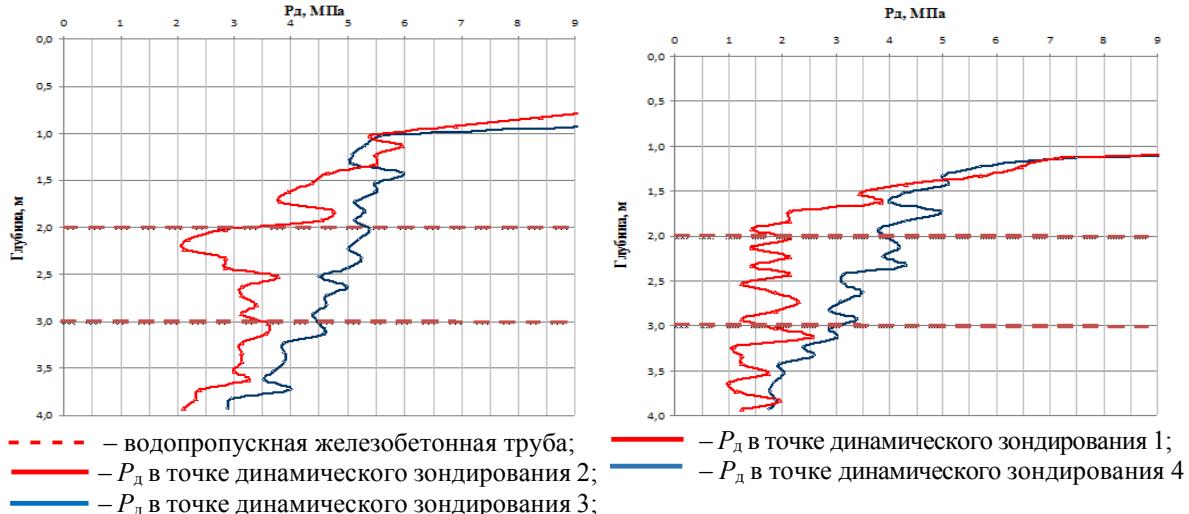


Рис. 6. Графики условного динамического сопротивления, соответствующего глубине зондирования на 20-м км

Выводы

В рамках исследования автомобильной дороги Новосибирск – Кочки – Павлодар выявлены места с дефектами и деформациями земляного полотна и, как следствие, нарушения ровности покрытия дорожной одежды. Скопление деформационных участков особенно характерно для зон расположения железобетонных водопропускных труб. В этих зонах наблюдаются провалы, разуплотнение грунта в теле насыпи земляного полотна, что подтверждено данными, полученными в ходе проведения визуальных, натуральных, лабораторных исследований и динамиче-

ского зондирования. Нарушения ровности покрытия характеризуются просадками, выбоинами, трещинами и составляют 93 %. Характерны и провалы в теле земляного полотна.

Благодаря объективному анализу физико-механических характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог удастся снизить темпы роста аварийности, вызываемой высокой интенсивностью движения на автомобильных дорогах в зонах расположения железобетонных водопропускных труб, и ликвидировать места концентрации дорожно-транспортных происшествий.

Список источников

1. Семенова Т. В., Кузин Н. В. Влияние влажности и степени уплотнения грунта земляного полотна на параметры прочности и деформируемости // Научный альманах. 2016. № 7-1 (21). С. 451–453.
2. Николенко Д. А., Кмета А. Г. Прогнозирование деформаций и разрушений дорожных конструкций автомобильных дорог // Строительство. 2014. С. 35–36.
3. Воробьев В. С., Карелина Е. Л., Репина И. Б. Мониторинг несущей способности основной площадки земляного полотна автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 106–113.
4. Разуваев Д. А. Определение деформационных параметров верхней части рабочего слоя земляного полотна // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. № 4 (32). С. 71–75.
5. Schanz T. Experimental Unsaturated Soil Mechanics : book. Berlin : Springer Proceedings in Physics, 2007. 494 p.
6. Seed H. B., Mitchell J. K., Chan C. K. The strength of Compacted Cohesive Soils. Research conference on Shear strength of cohesive soils // ASCE Conference Proceedings. [S. l.] : Univ. of Colorado, 1960. P. 877–964.
7. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик : взамен ГОСТ 5180-84 : дата введения 2016-04-01. Москва : Стандартинформ, 2016. 21 с.
8. ГОСТ 12248.1–2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза : утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2020 г. № 821-ст : введен в действие с 1 июня 2021 г. Москва : Стандартинформ, 2020. 14 с.
9. ГОСТ 22733–2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности : утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 июля 2016 г. № 891-ст : введен в действие с 1 января 2017 г. Москва : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2016. 15 с.
10. Карелина Е. Л. Мониторинг и прогнозирование физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб автомобильных дорог : специальность 2.1.8 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Карелина Елена Леонидовна ; Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет. Омск, 2023. 24 с.
11. Статистические модели физико-механических характеристик грунтов автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб / В. С. Воробьев, Е. Л. Карелина, О. А. Бендер, К. В. Каталымова // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15, № 4 (62). С. 560–573.

References

1. Semenova T. V., Kuzin N. V. The influence of humidity and the compaction degree of the roadbed soils on the strength and deformability parameters. *Scientific Almanac*. 2016;7-1(21):451–453. (In Russ.).
2. Nikolenko D. A., Kmeta A. G. Forecasting deformations and failures of road structures of highways. *Construction*. 2014. P. 35–36. (In Russ.).
3. Vorobyev V. S., Karelina E. L., Repina I. B. Monitoring the bearing capacity of the main site of the roadbed in the area of culverts. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):106–113. (In Russ.).
4. Razuvaev D. A. Determination of deformation parameters of the upper part of the working layer of the roadbed. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy*. 2013;(32):71–75. (In Russ.).
5. Schanz T. Experimental Unsaturated Soil Mechanics: book. Berlin: Springer Proceedings in Physics; 2007. 494 p.
6. Sed H. B., Mitchell J. K., Chan C. K. The strength of Compacted Cohesive Soils. Research conference on Shear strength of cohesive slims. *ESSE Conference Proceedings*. University of Colorado. 1960. P. 877–964.
7. GOST 5180–2015. Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics. Replacing GOST 5180-84. Introduced on the 01.04.2016. Moscow: Standartinform; 2016. 21 p. (In Russ.).
8. GOST 12248.1–2020. Soils. Determination of strength characteristics by the single-plane shear method. Approved by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from 14.10.2020 № 821-st and effective from 01.06.2020. Moscow: Standartinform; 2020. 14 p. (In Russ.).
9. GOST 22733–2016. Soils. The method of laboratory determination of the maximum density. Approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of 28.07.2016 No. 891-st: and effective from 01.01.2017. Moscow: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology; 2016. 15 p. (In Russ.).
10. Karelina E. L. Monitoring and forecasting of physical and mechanical characteristics of soils in the area of the location of culverts of highways. Specialty 2.1.8 Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels. Abstract of Thesis for the Degree of Candidate of Engineering. Karelina Elena Leonidovna; The Siberian State Automobile and Highway University. Omsk; 2023. 24 p. (In Russ.).

11. Vorobyev V. S., Karelina E. L., Bender O. A., Katalymova K. V. Statistical models of physical and mechanical characteristics of highway soils in the area of culverts. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. 2018;15(62):560–573. (In Russ.).

Информация об авторе

E. L. Karelina – доцент кафедры «Изыскания, проектирование, постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the author

E. L. Karelina – Associate Professor of the Surveying, Design, Construction of Railways and Highways Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 03.09.2024; одобрена после рецензирования 15.10.2024; принятa к публикации 17.10.2024.

The article was submitted 03.09.2024; approved after reviewing 15.10.2024; accepted for publication 17.10.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 625.114

doi 10.52170/1815-9265_2024_72_106

Система мобильного лазерного сканирования для железных и автомобильных дорог

Владимир Васильевич Щербаков¹, Иван Александрович Бунцев²,
Иван Владимирович Щербаков³, Сергей Сергеевич Акимов^{4✉},
Егор Николаевич Тимофеев⁵

1,2,3,4,5 Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ vvs@stu.ru

² geodep@ngs.ru

³ sibdorproect@bk.ru

⁴ ak_s_s@mail.ru✉

⁵ egtini@vk.com

Аннотация. Мобильное лазерное сканирование нашло широкое применение на железных и автомобильных дорогах. Одним из направлений его использования на железных дорогах является контроль габаритов приближения строений. Определение габаритов таким способом повышает производительность полевых работ. При этом обработка полученных данных и определение габаритов – трудоемкий процесс. В некоторых случаях при выполнении работ на железнодорожном пути измерение и оценка габаритов должны выполняться в реальном времени. Для определения и оценки фактических габаритов приближения строений в реальном времени разработана система контроля габаритов приближения строений (СКГ) на базе лидара, технического зрения и компьютерного обучения. Работа СКГ основана на измерении координат окружающего пространства в заданном секторе и селективном выделении из облака точек координат объектов железнодорожной инфраструктуры, которые заданы в цифровом проекте и внесены в базу данных. Компьютерное обучение позволяет создавать математическую модель объекта и при натурных измерениях распознавать образ, что дает возможность определять габариты в реальном времени. Один проход системы по участку пути обеспечивает определение геометрии рельсовой колеи и фактических габаритов приближения строений. Результаты испытаний СКГ показали высокую степень устойчивости системы к внешним факторам, стабильность работы и обеспечение требуемой точности измерений. СКГ на железных дорогах предназначена для приемки в эксплуатацию железнодорожных путей после окончания ремонтных работ, выявления и оценки негабаритных мест, выполнения исполнительных съемок и операционного контроля в процессе ремонта.

Ключевые слова: мобильное лазерное сканирование, габариты приближения строений, техническое зрение, компьютерное обучение, железные дороги, автомобильные дороги

Для цитирования: Система мобильного лазерного сканирования для железных и автомобильных дорог / В. В. Щербаков, И. А. Бунцев, И. В. Щербаков, С. С. Акимов, Е. Н. Тимофеев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 106–115. DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_106.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Mobile laser scanning system for railways and highways

Vladimir V. Shcherbakov¹, Ivan A. Buntsev², Ivan V. Shcherbakov³, Sergey S. Akimov^{4✉},
Egor N. Timofeev⁵

1,2,3,4,5 Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ vvs@stu.ru

² geodep@ngs.ru

³ sibdorproect@bk.ru

⁴ ak_s_s@mail.ru✉

⁵ egtini@vk.com

Abstract. Mobile laser scanning has found wide application on railways and highways. Control of building approach dimensions is one of the areas of laser scanning application on railways. Determining dimensions using mobile laser scanning increases the productivity of field work. At the same time, processing the obtained data and

determining the dimensions is a labor-intensive process. In some cases, when performing work on a railway track, the measurement and assessment of dimensions must be performed in real time. To determine the building approach dimensions in real time, a building approach dimensions control system (BAC) has been developed based on lidar, machine vision and computer learning. The BAC operation is based on measuring the coordinates of the surrounding space in a given sector and selectively selecting from the point cloud the coordinates of railway infrastructure objects that are specified in the digital project and entered into the database. Computer learning allows you to create a mathematical model of an object and recognize an image during in-kind measurements, which makes it possible to determine the dimensions in real time. One pass of the system along a section of the track ensures the definition of the track geometry and the clearances of approaching structures. The results of the SKG tests showed a high degree of the system's resistance to external factors, operational stability and provision of the required measurement accuracy. The system for monitoring the clearances of approaching structures on railways is designed for the acceptance into operation of completed railway repairs, assessment of oversized areas, execution of executive surveys and operational control during repairs.

Keywords: mobile laser scanning, building approach dimensions, technical vision, computer training, railways, highways

For citation: Shcherbakov V. V., Buntsev I. A., Shcherbakov I. V., Akimov S. S., Timofeev E. N. Mobile laser scanning system for railways and highways. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(72):106–115. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_72_106.

Введение

Мобильное лазерное сканирование широко применяется при обследовании, диагностике и проектно-изыскательских работах на железных и автомобильных дорогах [1, 2]. Лазерное сканирование выполняется с использованием передвижных мобильных лабораторий, диагностических комплексов на базе железнодорожных вагонов, портативных средств диагностики, беспилотных авиационных систем, самолетов и других летательных аппаратов.

На автомобильных дорогах лазерное сканирование выполняется при проектно-изыскательских работах, диагностике, контроле качества ремонтов, определении габаритов, продольной ровности дорожных покрытий [3, 4].

Одним из приоритетных направлений применения лазерного сканирования на железных дорогах является контроль габаритов приближения строений [5, 6]. При определении габаритов на железной дороге таким способом значительно повышается производительность полевых работ. При этом обработка данных лазерного сканирования и определение габаритов – трудоемкий процесс, который выполняется в «ручном» режиме, с локальной автоматизацией отдельных процессов обработки [7]. Автоматизация процесса получения габаритов ограничена возможностями программных комплексов. Соотношение времени выполнения работ, натурных съемок и обработки данных лазерного сканирования равно 1 : 5.

Сроки определения габаритов приближения строений в процессе выполнения исполнительной съемки железнодорожного пути не ограничены какими-либо жесткими рамками. Фактор времени обеспечения данными по габаритам

приближения строений в отдельных случаях является критичным, поэтому измерения и оценка должны выполняться в реальном времени, например при ремонте железнодорожного пути «в окно», когда на ремонт выделяется время в диапазоне 3–10 ч. В этот период необходимо выполнить комплекс ремонтных работ в соответствии с техпроцессом, определить габариты, выполнить оценку соответствия габаритов нормативным требованиям и открыть движение поездов. Поэтому для открытия движения поездов мобильное лазерное сканирование в традиционном представлении, включая получение облака точек и постобработку данных, не приемлемо, так как объективная информация о соответствии габаритов нормативным требованиям необходима в процессе измерений.

Материалы и методы исследования

Для определения габаритов приближения строений в реальном времени коллективом НИЛ «Диагностика дорожных одежд и земляного полотна» СГУПС разработана система контроля габаритов приближения строений (СКГ) на базе лидара, технического зрения и компьютерного обучения [8]. СКГ содержит портативный лидар 1, установленный соосно с демпфирующим блоком 2, и портативный компьютер 3 (рис. 1).

Устройство системы контроля габаритов (см. рис. 1) включает платформу, на которой установлен демпфирующий блок, содержащий медные пластины и магниты, они обеспечивают при динамических нагрузках компенсацию угловых колебаний лидара относительно горизонта за счет изменения магнитного поля. Функциональные возможности лидара позволяют проводить настройку подключения и установ-



*Rис. 1. Система контроля габаритов:
1 – портативный лидар; 2 – демпфирующий блок; 3 – портативный компьютер*

ливать параметры работы встроенного веб-сервера. Демпфирующее устройство обеспечивает устойчивую и надежную работу в условиях вибрации и повышенных динамических нагрузок при установке оборудования на подвижные объекты. Компьютер обеспечивает управление, настройки, сбор и визуализацию данных (информации) с лидара.

Принцип работы СКГ заключается в измерении координат окружающего пространства в заданном секторе, например 45 угл. градусов; селективном выделении из облака точек координат только тех объектов, которые заданы в цифровом проекте (ЦП) [9] и внесены в базу данных (БД), например головки рельса, железнодорожной платформы, опоры контактной сети (ОКС). Для этих объектов железнодорожной инфраструктуры, представленных в ЦП, создается математическая модель. В БД ЦП также экспортируются контрольные параметры, характеризующие объект, его пространственное положение и положение относительно оси пути.

Технические решения обеспечивают отказ от использования облака точек и постобработки данных. Компьютерное обучение позволяет создавать математическую модель объекта и при натурных измерениях распознавать образ, что дает возможность определять габариты в реальном времени.

Поиск и распознавание образа базируются на сравнении двух схожих объектов с целью

найти эквивалентность и определить характеристику. Данный подход к анализу данных позволяет проводить сравнение на наличие различий даже без классического экспериментального проектирования. Метод сопоставления используется в статистическом анализе и при наличии искажений, вызванных различиями в характеристиках исследуемых объектов, так как исходное представление объекта с помощью лазерного сканирования не является полным аналогом сравниваемого образа из-за погрешности измерений, которая приводит к небольшим колебаниям (изменениям) получаемых данных.

После того как найдено соответствие, происходит расчет ключевых метрик, расстояния и превышения. Такой метод поиска позволяет учитывать исходные различия между полученным сканом и сравниваемым образом, обеспечивая более точные и надежные результаты.

Определение образа, который будет использоваться для сопоставления, является критически важным этапом. Недостаточно точное его представление может привести к искажению результата, слишком большой объем данных может усложнить сопоставление и снизить его эффективность. В процессе моделирования и формирования математической модели образа объекта необходимо учитывать его особенности и характеристики.

Образ (часть образа) должен быть прямоугольной формы, при этом не весь прямоугольник имеет значение. Поэтому можно ис-

пользовать маску, чтобы изолировать часть, которая должна быть использована для поиска соответствия.

Исходными данными лазерного сканирования являются пары значений: расстояние до измеряемой точки и ее угловое положение. Для представления полученных данных в вертикальной плоскости (в заданном секторе) выполняется дополнительное преобразование каждой точки (рис. 2).

Представлением образа является набор последовательно записанных двоичных разрядов или массив битов, где отсутствие точки объекта представляется в виде нуля или пустой ячейки, а наличие точки объекта – в виде единицы или заштрихованной ячейки (рис. 3). Близким представлением этих данных является черно-белое представление, без градаций серого.

Под сопоставлением рассматривается перемещение искомого образа по одному положению сканированных данных. В каждом текущем местоположении в процессе линейных и угловых перемещений рассчитывается метрика, показывающая, насколько искомый образ соответствует сканированным данным. Для каждого местоположения T (сопоставляемый образ) над I (полученный скан) метрика сохраняется в результирующей матрице R .

Каждое положение, представленное в виде пары значений x и y в матрице R размером $(W - w + 1) \times (H - h + 1)$, содержит метрику соответствия, где w и h – ширина и высота сопоставляемого образа, а W и H – ширина и высота исходных данных лидара.

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T'(x', y') I'(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x', y'} T'(x', y')^2 \sum_{x', y'} I'(x + x', y + y')^2}}, \quad (1)$$

где

$$T'(x', y') = T(x', y') - \frac{1}{wh} \sum_{x'', y''} T(x'', y''); \quad (2)$$

$$I'(x + x', y + y') = I(x + x', y + y') - \frac{1}{wh} \sum_{x'', y''} I(x + x'', y + y''); \quad (3)$$

x', y' и x'', y'' – положение на искомом образе и данных лазерного сканирования, м.

Например, яркие точки на рис. 4, являющиеся представлением матрицы R на плоскости, указывают на наибольшее количество совпадений.

Так как матрица R представлена с помощью трех параметров – положения на плоскости и коэффициента сопоставления, то ее также можно представить в виде объемной фигуры (рис. 5). На рисунке положение определяется на плоскости XY , а коэффициент соответствия

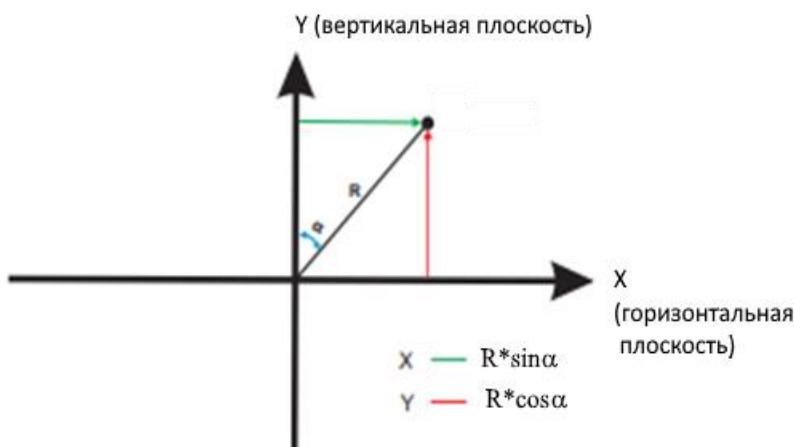


Рис. 2. Преобразование данных лазерного сканирования на координатную плоскость

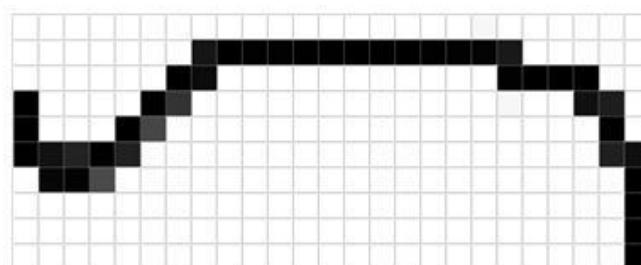


Рис. 3. Представление образа (рельса) в виде битовой карты

представлен по оси Z . Цветовым градиентом выделено изменение коэффициента матрицы R .

Для практического применения полученной матрицы R необходимо использовать наибольшее значение градиента.

Матрицы R могут отличаться для одной и той же области сопоставления. Поэтому их необходимо нормализовать по амплитудам, прежде чем сравнивать. Полученные значения изменяются от 1, что соответствует полному совпадению, до -1 , или полного отсутствия взаимосвязи.

Каждое положение скана необходимо дополнительно фиксировать в линейной координате. При движении лидара изменяется расстояние и положение искомого образа, полученное изменение представлено в виде

$$S_x = x - x_0; \quad S_y = y - y_0, \quad (4)$$

где S_x и S_y – пройденные расстояния по осям x и y в текущей точке, м; x_0 и y_0 – координаты искомого образа на предыдущем шаге (рис. 6).

Так как смещение лидара относительно начала движения является перемещением в статической системе отсчета, то конечное смещение будет равно:

$$S = \sum S_x + \sum S_y. \quad (5)$$

Необходимо заметить, что изменение размера искомого образа приведет к тому, что метод не будет качественно работать, поэтому нормализация по величине является одним из ключевых факторов стабильности при захвате и удержании образа объекта в активной зоне.



Рис. 4. Пример плоскостного представления матрицы R с помощью черно-белого градиента

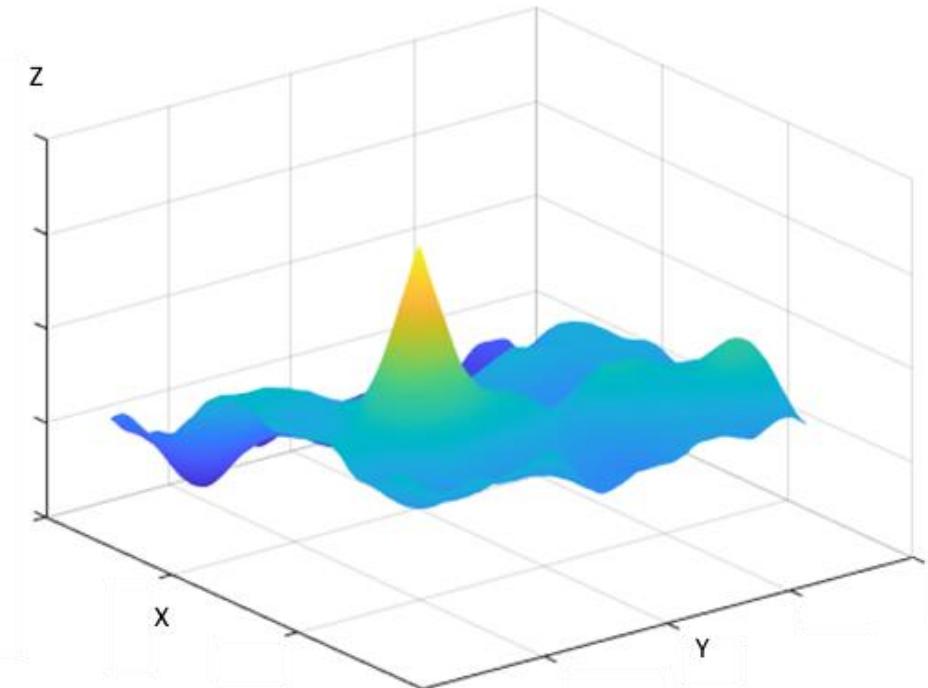


Рис. 5. Поверхность матрицы R для полученных данных лазерного сканирования и сопоставляемого образа

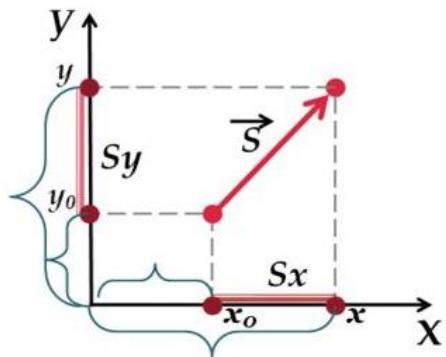


Рис. 6. Связь между перемещением искомого образа и его координатным положением

Результаты исследования и их обсуждение

Конструктивно, с учетом специфики измерений, СКГ изготавливается в нескольких вариантах реализации, один из которых представлен на рис. 7. Система контроля габаритов приближения строений СКГ-2.1 предназначена для приемки в эксплуатацию железнодорожного пути после завершения его ремонта. СКГ также может применяться для контроля габаритов приближения строений в целях оценки негабаритных мест и их классификации, выполнения исполнительных съемок и операционного контроля в процессе реконструкции (ремонта). СКГ-2.1 включает ходовую тележку 1, спутниковый приемник 2 для пространственной привязки данных лазерной съемки, лидар 3, систему стабилизации 4, инерциальную систему 5 для обеспечения

пространственной ориентации лидара, радиомодем 6 для связи со спутниковой референцсетью и компьютер 7.

На рис. 8 показана исполнительная съемка объектов инфраструктуры железнодорожной линии после завершения ремонта одного из путей. Один проход тележки (один цикл измерения) обеспечивает определение геометрии рельсовой колеи и фактических габаритов приближения строений с оценкой соответствия нормативным требованиям.

Для расчета геометрических параметров железнодорожного пути и оценки их соответствия нормативным требованиям используются результаты измерений пространственных данных инерциальной системой, лидаром и приемником ГНСС, а также паспортные, нормативные и проектные данные. Так, например, при опреде-

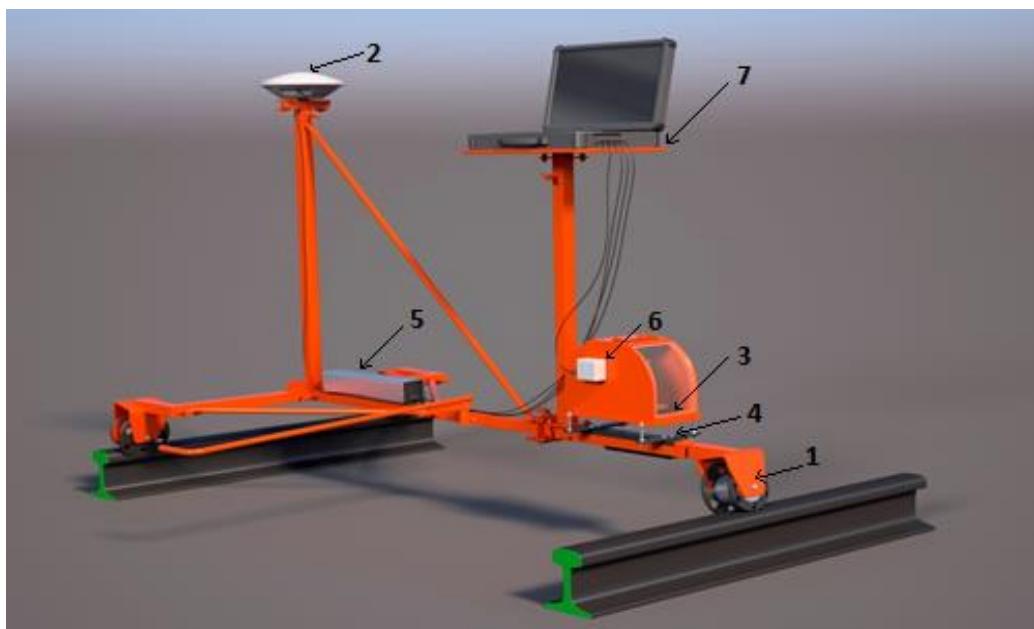


Рис. 7. Система контроля габаритов приближения строения СКГ- 2.1:
1 – ходовая тележка; 2 – спутниковый приемник; 3 – лидар; 4 – система стабилизации;
5 – инерциальная система ; 6 – радиомодем; 7 – компьютер

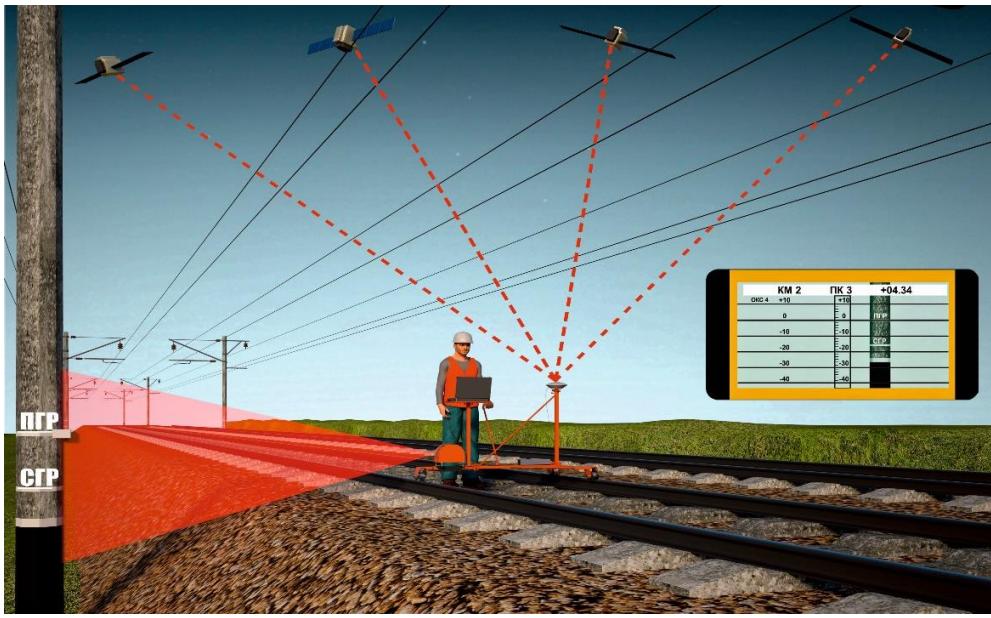


Рис. 8. Натурная съемка для контроля габаритов приближения строений и оценки соответствия нормативным требованиям в реальном времени

лении фактической высотной отметки головки рельса контролируемого пути (ремонт, диагностика) $H_{к.п(ф)}$ с использованием СКГ-2.1 в любой i -й точке на участке пути измеряется превышение, а высотная отметка определяется по формуле

$$H_{к.п(ф)} = H_{с.п} + \Delta h, \quad (6)$$

где $H_{с.п}$ – высотная отметка соседнего пути (паспортные или проектные данные), м; Δh – фактическое превышение уровня ремонтного пути над уровнем соседнего, м.

Превышение головки рельса ремонтируемого пути над головкой соседнего Δh определяется по формуле

$$\Delta h = l_{\phi} \frac{\alpha}{\rho}, \quad (7)$$

где l_{ϕ} – измеренное (фактическое) расстояние между путями, м; α – угол возвышения между смежными путями относительно горизонта, °; ρ – число угл. секунд в одном радиане ($\rho = 206 265$).

Средняя квадратичная погрешность определения превышения одного пути над соседним определяется по формуле

$$m_h = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha m_d^2 + \frac{d^2}{\cos^4 \alpha} \frac{m_a^2}{\rho^2} + m_i^2 + m_v^2}, \quad (8)$$

где α – угол наклона, рад; m_d – средняя квадратичная погрешность определения расстояния d , м; d – горизонтальное расстояние (междупутье), м; m_a – средняя квадратичная по-

грешность измерения угла наклона α , м; m_i – средняя квадратичная погрешность измерения высоты прибора (системы лазерного сканирования) относительно головки рельса ремонтного пути, м; m_v – средняя квадратичная погрешность нахождения, удержания в активной зоне головки рельса при использовании компьютерного обучения и технического зрения, м.

Для оценки соответствия габаритов приближения строений нормативным требованиям в реальном времени необходимо не только выполнить измерения и получить габариты, но и сравнить полученные данные в каждом i -м сечении с расчетным (допустимым) значением. Допуски зависят от возвышения рельса, радиуса круговой кривой, положения объекта слева или справа от внутреннего рельса и десятка других параметров. Расчеты допусков, так же как и расчеты фактических габаритов, должны выполняться в реальном времени. Для этого в программном обеспечении предусмотрен модуль расчета допуска габарита. В расчете габарита используются данные измерений СКГ-2.1, а также паспортные и нормативные данные. Расчеты габаритов и оценка их соответствия нормативным требованиям выполняются по ГОСТ 9238–2022 [5].

Рассмотрим результат расчета допустимых и фактических значений габаритов приближения строений железнодорожной платформы. Для оценки соответствия габаритов

приближения строений нормативным требованиям в реальном времени необходимы не только фактические данные, но и допуски для каждого сечения в плоскости (секторе) сканирования, так как значения допуска изменяются в соответствии с натурным положением пути и объектов инфраструктуры. Результаты (фрагмент) контроля габаритов железнодорожной платформы приведены на рис. 9.

Красным цветом показаны допустимые границы габарита, синим и зеленым – фактические значения. Кроме того, для удобства оценки соответствия геометрических параметров нормативным требованиям в главном окне оператора бортового компьютера показана виртуальная нивелирная рейка, на которой белым цветом выделен допустимый диапазон изменения положения платформы по высоте относительно головки рельса. Данная информация необходима для маркировки и закрепления краской на платформе отклонений от нормативных требований, а также для видеофиксации дефектов при выполнении натурной съемки.

Исследования и испытания СКГ-2.1 проводились на экспериментальном участке железнодорожного пути с использованием ходовой тележки, на которую устанавливалось оборудование. Основная цель исследований и испытаний – обеспечение захвата в процессе

сканирования объекта и его удержание при наличии вибрации, внешних кратковременных (0,1–0,2 с) помех, ограничений прямой оптической видимости и наличия многих других факторов. Результаты исследований на экспериментальном участке железнодорожного пути длиной 3,2 км показали высокую степень устойчивости к внешним факторам, стабильность работы и обеспечение требуемой точности. Погрешность измерения междупутья составила около 2 мм, погрешность определения превышения одного пути над соседним составила 8 мм, что соответствует теоретическим (расчетным) значениям (9 мм), полученным по формуле (8).

Данные исследования также показали, что СКГ-2.1 обеспечивает требования постановки пути в проектное положение с использованием технологии бокового нивелирования [10] при установке системы на выправочные машины, определения габаритов приближения строений в реальном времени.

Исследования возможности применения СКГ-2.1 для натурных съемок на автомобильных дорогах выполнены для оценки продольной ровности, высоты ограждений. Предварительные результаты исследований СКГ-2.1 положительные. Для полноценного применения на автомобильных дорогах, получения статистиче-

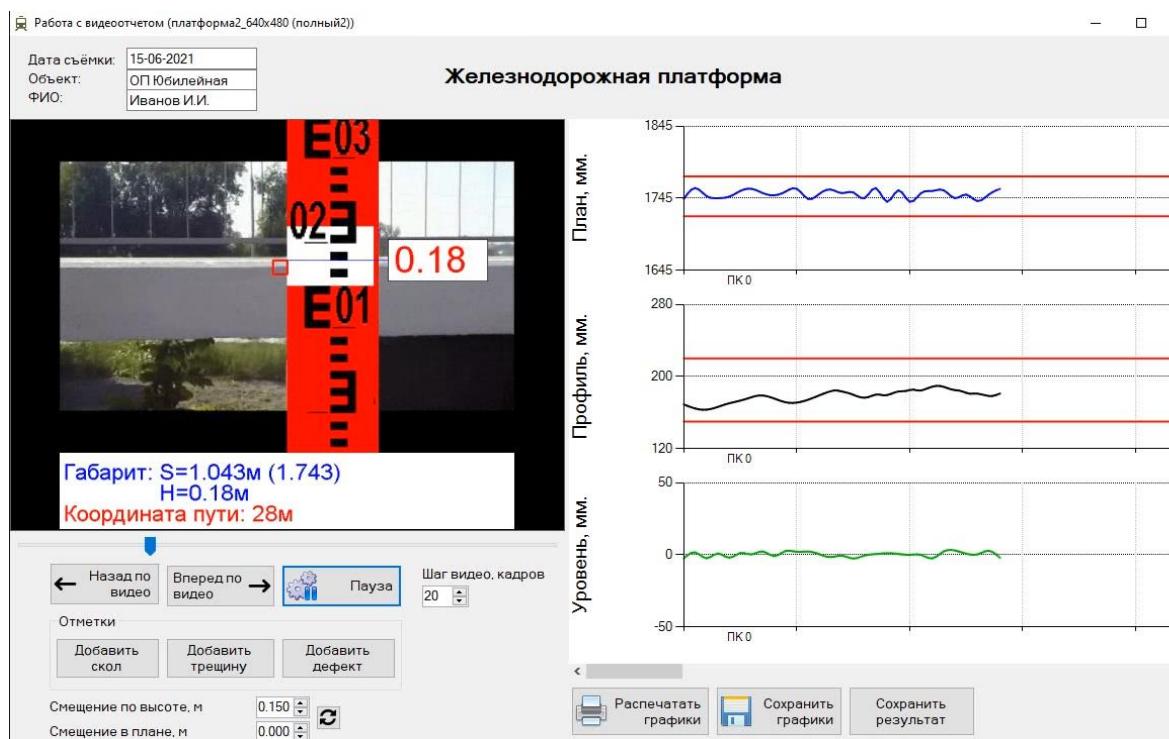


Рис. 9. Главное окно оператора СКГ-2.1

ских данных и их обработки необходимо разработать новую конструкцию, учитывающую специфику автомобильных дорог, разработать методику и программу испытаний лазерной системы. Кроме того, следует, с учетом опыта применения СКГ-2.1 на железных дорогах, провести испытания в транспортных тоннелях и метрополитенах, что является перспективным направлением, так как позволит в ограниченные сроки выполнять оценку технического состояния транспортных сооружений.

Выводы

Для определения габаритов приближения строений в реальном времени разработана система контроля габаритов приближения строений на базе лидара, технического зрения и компьютерного обучения. Работа СКГ основана на измерении координат окружающего пространства в заданном секторе и селектив-

ном выделении из облака точек координат объектов железнодорожной инфраструктуры, которые заданы в цифровом проекте и внесены в базу данных. СКГ позволяет определять расстояние до головки рельса соседнего пути (междупутье), габариты приближения строений (до железнодорожной платформы и опоры контактной сети).

Система контроля габаритов приближения строений на железных дорогах предназначена для приемки в эксплуатацию железнодорожных путей по завершении ремонтных работ, выявления и оценки негабаритных мест, выполнения исполнительных съемок и операционного контроля в процессе реконструкции (ремонта).

Результаты опытной эксплуатации СКГ показали высокую степень устойчивости к внешним факторам, стабильность работы и обеспечение требуемой точности измерений.

Список источников

1. Щербаков В. В. Исследование мобильного лазерного сканера «Сканпуть» при определении геопространственного положения железнодорожного пути // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. Т. 25, № 2. С. 98–108. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-2-98-108.
2. Андреева О. А. Применение мобильного лазерного сканирования для мониторинга объектов транспортной инфраструктуры // Наука и технологии железных дорог. 2019. № 3. С. 61–74.
3. Середович В. А., Алтынцев М. А., Егоров А. К. Определение индекса ровности дорожного покрытия по данным мобильного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2017. Т. 22, № 3. С. 33–44.
4. Сарычев Д. С. Мобильное лазерное сканирование // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2013. № 1. С. 37–41.
5. ГОСТ 9238–2022. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 31 октября 2022 г. № 155-П). Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
6. Мобильный комплекс для диагностики габаритов высоких платформ / Ю. А. Кочетков, А. Г. Мустафин, С. А. Галанский, И. С. Максимов // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 225–227.
7. Щербаков В. В. Методика применения лазерных сканеров для геодезического обеспечения проектно-изыскательских работ на железной дороге // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. Т. 64, № 3. С. 289–297. DOI 10.30533/0536-101X-2020-64-3-289-297.
8. Зачатейский Н. Д., Аржанников А. А., Альтман Е. А. Совершенствование метода «выделения фона» для нахождения подвижных объектов на железнодорожном переезде с помощью компьютерного зрения // Известия Транссиба. 2015. № 1 (21). С. 74–80.
9. Щербаков В. В. Методика создания цифровых проектов для автоматизированных систем управления строительной железнодорожной техникой // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. Т. 25, № 3. С. 127–138. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-3-127-138.
10. Технология бокового нивелирования при постановке железнодорожного пути в проектное положение / В. В. Щербаков, А. П. Карпик, И. В. Щербаков, М. Н. Барсук // Геодезия и картография. 2020. Т. 81, № 8. С. 18–23. DOI 10.22389/0016-7126-2020-962-8-18-23.

References

1. Shcherbakov V. V. Development of laser mobile scanners with the system of recognition in determination of geospatial of railway. *Vestnik of Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2020;25(2):98–108. (In Russ.). DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-2-98-108.
2. Andreeva O. A. The use of mobile laser scanning for monitoring of transport infrastructure facilities. *Science and Railway Technology*. 2019;3:61–74. (In Russ.).
3. Seredovich V. A., Altyntsev M. A., Egorov A. K. Determination of the road surface evenness index based on mobile laser scanning data. *Vestnik of Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2017;22(3):33–44. (In Russ.).
4. Sarychev D. S. Mobile laser scanning. *CAD and GIS for roads*. 2013;1:37–41. (In Russ.).
5. GOST 9238–2022 Construction and Rolling stock clearance diagrams. Access from SPS “ConsultantPlus”. (In Russ.).
6. Kochetkov Yu. A., Mustafin A. G., Galansky S. A., Maksimov I. S. Mobile complex for diagnostics of dimensions of high platforms. *Science and Education for Transport*. 2021;2:225–227. (In Russ.).
7. Shcherbakov V. V. The technique of using laser scanners for geodetic support of design and survey work on the railway. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2020;64(3):289–297. (In Russ.). DOI 10.30533/0536-101X-2020-64-3-289-297.
8. Zachateisky N. D., Arzhannikov A. A., Altman E. A. Improving methods of «background subtraction» for searching moving objects at railway crossings through computer vision. *News of Transsib*. 2015;1(21):74–80. (In Russ.).
9. Shcherbakov V. V. Method of creating digital projects for automated control systems of construction railway engineering. *Vestnik of Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2020;25(3):127–138. (In Russ.). DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-3-127-138.
10. Shcherbakov V. V., Karpik A. P., Shcherbakov I. V., Badger M. N. Lateral leveling technology at setting railway tracks in the design position. *Geodesy and Cartography*. 2020;81(8):18–23. (In Russ.). DOI 10.22389/0016-7126-2020-962-8-18-23.

Информация об авторах

- В. В. Щербаков* – заведующий кафедрой «Инженерная геодезия» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.
- И. А. Бунцев* – ведущий научный сотрудник НИЛ «Диагностика дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения.
- И. В. Щербаков* – старший научный сотрудник НИЛ «Диагностика дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.
- С. С. Акимов* – инженер-технолог НИЛ «Диагностика дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения.
- Е. Н. Тимофеев* – инженер НИЛ «Диагностика дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

- V. V. Shcherbakov* – Head of the Engineering Geodesy Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.
- I. A. Buntsev* – Leading Researcher of the Diagnostics of Road Surfaces and Subgrade Research Laboratory, Siberian Transport University.
- I. V. Shcherbakov* – Senior Researcher of the Diagnostics of Road Surfaces and Subgrade Research Laboratory, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.
- S. S. Akimov* – Process Engineer of the Diagnostics of Road Surfaces and Subgrade Research Laboratory, Siberian Transport University.
- E. N. Timofeev* – Engineer of the Diagnostics of Road Surfaces and Subgrade Research Laboratory, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 04.09.2024; одобрена после рецензирования 01.11.2024; принята к публикации 08.11.2024.

The article was submitted 04.09.2024; approved after reviewing 01.11.2024; accepted for publication 08.11.2024.

Информация для авторов

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

2. Статья предоставляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (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: vestniksgups@sibgups.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



vestniksgups@sibgups.ru



+7 383 328-04-36



630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук,
191, корп. 3, комн. 307



Главный редактор *А. Л. Манаков*
Заместитель главного редактора *А. Д. Абрамов*
Заместитель главного редактора *С. В. Карасев*
Ответственный секретарь *М. С. Галай*
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*
Редактор *Е. Е. Рыжкова*
Корректор *А. А. Игумнов*
Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*
Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

Адрес редакции

630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, корп. 3, комн. 307.
Телефон/факс: (383) 328-04-36.
E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

Адрес издателя

630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Телефон/факс: (383) 328-03-81.
E-mail: bvu@stu.ru

Подписано в печать 25.12.2024. Дата выхода в свет 27.12.2024

Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 13,7 уч.-изд. л., 14,75 усл.-печ. л. Заказ № 3970

Цена свободная

Отпечатано в издательстве СГУПС.
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
Тел. (383) 328-03-81; e-mail: bvu@stu.ru



Издательство Сибирского государственного
университета путей сообщения

ISSN 1815-9265
Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения
2024, № 5 (72). 1–117