

ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 4 (67). 2023 16+



УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

Галай Марина Сергеевна – канд. техн. наук

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

Редакторы: А. О. Елесина, Е. Е. Рыжкова

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

Макет, верстка Ю. В. Борцовой

Дизайн обложки А. С. Петренко

Сайт журнала:

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

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

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

FOUNDER

The Siberian Transport University

Editors and Editorial Board

Editor-in-Chief

A. L. Manakov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

A. D. Abramov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

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

Executive Secretary

M. S. Galay, Candidate of Engineering

Editors

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

English Text Reviewer

I. I. Stepachkova, Senior Lecturer

Text Reviewers **A. O. Elesina**, **E. E. Ryzhkova**

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

Layout Designer **Yu. V. Bortsova**

Cover Designer **A. S. Petrenko**

Main contact details

Siberian Transport University

room 307, 191, Dusi Kovalchuk St.

630049, Novosibirsk, Russia

Phone: (383) 328-04-36

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

E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

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

ISSN: 1815-9265

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

№ 4 (67) · 2023 · ОКТЯБРЬ – ДЕКАБРЬ · 16+

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

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

<i>Манаков А. Л., Репях А. Ю.</i> Повышение технологической эффективности очистки железнодорожных путей станций от снега.....	5
<i>Корягин М. Е., Медведев В. И., Швец Ю. В., Попова Н. Б.</i> Математическая модель распределения автомобилей по дорожной сети по первому принципу Вардропы на основе модели Гриншилдса.....	13
<i>Бессоненко С. А., Осипов Н. И., Медведев В. И.</i> Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов как альтернативы сооружению вторых главных путей.....	21
<i>Абрамов А. Д., Манаков А. Л., Семенов М. А.</i> Внедрение нормативов организации процесса очистки путей от снега на основе автоматизированного мониторинга с учетом длины очищенных путей.....	30
<i>Канарский В. А.</i> Обнаружение предотказного состояния стрелочного перевода по графику активной мощности.....	40
<i>Медведев В. И., Бессоненко С. А., Корягин М. Е., Сурков М. Д., Попова Н. Б.</i> Правила перевозки опасных грузов по железным дорогам: разработка дополнений и изменений.....	47

Строительство и архитектура

<i>Бондаренко А. А., Рословец А. А., Васильева О. М.</i> Особенности обследования подводной части опор мостов и русел водотоков современными диагностическими комплексами.....	59
<i>Курчанов П. О., Ярошутин Д. А., Шестовицкий Д. А.</i> Теоретическая и экспериментальная оценка динамического отклика пролетного строения при отказе гибкой связи.....	68
<i>Цибариус Ю. А., Ланис А. Л., Разуваев М. А., Бердюгин А. Н.</i> Исследование прочности и износостойкости щебеночных материалов, используемых при приготовлении асфальтобетонных смесей.....	76
<i>Стахнёв Я. О., Королев К. В.</i> Численные методы при определении горного давления в скальных и дисперсных грунтах.....	84
<i>Бондарь И. С., Махметова Н. М., Квашинин М. Я., Хасенов С. С.</i> Определение напряженного состояния и динамических коэффициентов балочных мостов.....	92
<i>Васильев А. И., Курышов А. А., Лебедев А. А.</i> Некоторые проблемы, возникающие при оценке грузоподъемности автодорожных мостов в процессе натурных исследований.....	101

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

№ 4 (67) · 2023 · October – December · 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

- A. L. Manakov, A. Yu. Repyakh.* Increasing the technological efficiency of clearing the railway tracks of stations from snow5
- M. E. Koryagin, V. I. Medvedev, Yu. V. Shvets, N. B. Popova.* Mathematical model of the distribution of cars on the road network according to the first Wardrop principle based on the Greenshields model.....13
- S. A. Bessonenko, N. I. Osipov, V. I. Medvedev.* Evaluating the effectiveness of interval train control as an alternative to the constructing second main tracks21
- A. D. Abramov, A. L. Manakov, M. A. Semenov.* Implementation of standards for organizing the process of clearing tracks from snow based on automated monitoring, taking into account the length of cleared tracks30
- V. A. Kanarskiy.* Detection of the pre-failure state of the switch by the active power diagram.....40
- V. I. Medvedev, S. A. Bessonenko, M. E. Koryagin, M. D. Surkov, N. B. Popova.* Rules for the transportation of dangerous goods by rail: development of additions and amendments..... 47

Building and Architecture

- A. A. Bondarenko, A. A. Roslovets, O. M. Vasilyeva.* Inspection peculiarities of the bridge supports underwater part and watercourse beds by modern diagnostic complexes.....59
- P. O. Kurchanov, D. A. Yaroshutin, D. A. Shestovitskiy.* Theoretical and experimental evaluation of the superstructure dynamic response in case of hanger failure.....68
- Yu. A. Tsibarius, A. L. Lanis, M. A. Razuvaev, A. N. Berdyugin.* Research of the strength and wear resistance of crushed stone materials used in the preparation of asphalt mixtures76
- Ya. O. Stakhnyov, K. V. Korolev.* Numerical methods for determining rock pressure in rocky and dispersed soils84
- I. S. Bondar, N. M. Makhmetova, M. Ya. Kvashnin, S. S. Khasenov.* Determination of stress state and dynamic coefficients of girder bridges.92
- A. I. Vasiliev, A. A. Kuryopov, A. A. Lebedev.* Some problems that arise when assessing the load capacity of road bridges in the process of field studies.....101

ТРАНСПОРТ

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 5–12.
The Siberian Transport University Bulletin. 2023. No. 4 (67). P. 5–12.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 65.011.46
doi 10.52170/1815-9265_2023_67_5

Повышение технологической эффективности очистки железнодорожных путей станций от снега

Алексей Леонидович Манаков¹, Алексей Юрьевич Репях²✉

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

² Новосибирское подразделение Западно-Сибирского учебного центра профессиональных квалификаций, Новосибирск, Россия

¹ manakov005@mail.ru

² repyakh.alex06@yandex.ru✉

Аннотация. В статье проанализированы применяемые методы очистки станционных путей от снега и выявлены организационно-технологические проблемы каждого. Определены основные достоинства и недостатки путевой техники и технологий очистки станционных путей от снега. Установлено, что весь парк машин для текущего содержания пути в зимний период выполняет минимальные требования к качеству очистки пути от снега – 50 мм ниже уровня головки рельсов. А основными ограничениями при планировании работы снегоуборочной и снегоочистительной техники являются: полезная длина пути, занятость соседних путей, наличие полевой стороны, пассажирских платформ, путевых устройств и стрелочных переводов.

Основная задача исследования – совершенствование комбинированной технологии очистки железнодорожных путей станций от снега и определение оптимальных параметров работы уборочно-очистительной техники.

Установлено, что толщина снега при сплошной уборке снегоуборочной машиной СМ-2 с крыльями должна быть не менее 0,12 м. Для сокращения времени занятия станционных путей снегоуборочной техникой предложено совершенствовать комбинированную технологию очистки путем использования струга СС-1М в виде скрепера и снегоуборочной машины СМ-2М. Построен график зависимости времени очистки от длины пути при циклической и усовершенствованной комбинированной технологии с различным количеством осадков. Определена рекомендуемая толщина снега для предложенной технологии – 0,15 м. При оптимальных параметрах работы техники комбинированная технология превосходит циклическую по длине очищенных путей на 2 650 м (за один рейс четырехвагонной СМ-2) и по времени работы на участке более чем на 30 мин.

Ключевые слова: технологические методы, эффективность, снегоуборочные поезда, снегоочистительная техника, станционные пути

Для цитирования: Манаков А. Л., Репях А. Ю. Повышение технологической эффективности очистки железнодорожных путей станций от снега // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 5–12. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_5.

TRANSPORT

Original article

Increasing the technological efficiency of clearing the railway tracks of stations from snow

Alexey L. Manakov¹, Alexey Yu. Repyakh²✉

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

² Novosibirsk division of the Training Center for Professional Qualifications of the West Siberian Railway, Novosibirsk, Russia

¹ manakov005@mail.ru

² repyakh.alex06@yandex.ru✉

Abstract. The article analyzes the applied methods of clearing the station tracks from snow and identifies the organizational and technological problems of each. It was possible to determine the main advantages and

disadvantages of track equipment and technologies when clearing station tracks of snow. It has been established that the entire fleet of vehicles for the current maintenance of the track in the winter period meets the minimum requirements for the quality of clearing the track from snow – 50 mm below the level of the rail head. And the main restrictions in planning snow removal and snow removal equipment for work are: the useful length of the track, the employment of neighboring tracks, the presence of a field side, passenger platforms, track devices and turnouts.

The main objective of the study is to improve the combined technology for clearing the railway tracks of stations from snow and to determine the optimal parameters for the operation of cleaning and cleaning equipment.

It has been established that the thickness of snow during continuous cleaning by a SM-2 snow brush train with wings should be at least 0,12 m. A graph of the dependence of the cleaning time on the length of the path is constructed for cyclic and improved combined technology with different amounts of precipitation. The recommended snow thickness for the proposed technology was determined – 0,15 m. With optimal equipment operation parameters, the combined technology exceeds the cyclic one in the length of the cleared tracks by 2650 m (for one trip of the four-car SM-2) and in the time of work on the site by more than 30 minutes.

Keywords: technological methods, efficiency, snow brush train, snow removal equipment, station tracks

For citation: Manakov A. L., Repyakh A. Yu. Increasing the technological efficiency of clearing the railway tracks of stations from snow. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):5–12. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_5.

Введение

Восточный полигон, основной задачей которого является модернизация БАМа и Транссиба, предполагает увеличение пропускной способности железнодорожной сети [1]. Но резко континентальный климат, с колебаниями температур от –61 до +43 °С и нормой осадков 400–860 мм, создает дополнительные трудности для этого развития, особенно в зимнее время года [2]. Помехи в перевозочный процесс вносят не только погодные условия, но и снегоуборочная и снегоочистительная техника, что приводит к нарушению графика движения поездов. По этой причине разрабатывают оперативные планы по снегоборьбе, устанавливают технологические окна для работы путевых машин.

Отдельного внимания заслуживают станционные пути, так как процесс очистки требует последующей уборки снега. В некоторых случаях снеговую массу непрерывно отбрасывают под откос механическим или пневматическим способом (непрерывная технология). Чаще избегают накопления снега, его собирают и транспортируют машинами снегоуборочного типа, которые выполняют работу по циклической технологии (см. подробные технические характеристики [3]). Возможно и комплексное использование машин снегоуборочного и снегоочистительного типа (комбинированная технология очистки). Так, на Западно-Сибирской железной дороге при очистке сортировочных станций от снега комбинированная технология позволила снизить потери перерабатывающей способности сортировочной горки за счет сокращения времени работы зимней техники [4]. Для достижения максимальной эффективности требова-

лось грамотно распределять потоки поездов и соблюдать условие свободности соседнего пути при каждом проходе снегоочистителя. Следовательно, повышение технологической эффективности очистки путей от снега на железнодорожных станциях является актуальным направлением исследования.

Таким образом, сформулирована главная задача исследования – совершенствование комбинированной технологии очистки станционных путей от снега при отсутствии возможности смещать материал на соседние участки и определение оптимальных параметров работы уборочно-очистительной техники.

Материалы и методы исследования

С целью выявления организационно-технологических проблем составлены схемы очистки станционных путей от снега и проведен их анализ. Согласно Инструкции по снегоборьбе, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» № 1733/р от 07.07.2022, можно выделить четыре основных метода очистки железнодорожных путей станций от снега:

- 1) последовательная перевалка снега через пути с последующим смещением в откос на полевую сторону;
- 2) последовательная перевалка снега на крайний путь, в междупутье или на выделенный путь с последующей уборкой снегоуборочным поездом;
- 3) уборка снега с пути снегоуборочной машиной (рис. 1);
- 4) загрузка снега в снеговой поезд [5].

В первом случае используется непрерывная технология с привлечением пневмоочистительных машин ПОМ, плужных снегоочистителей СДПМ или стругов СС-1М, ССГС,

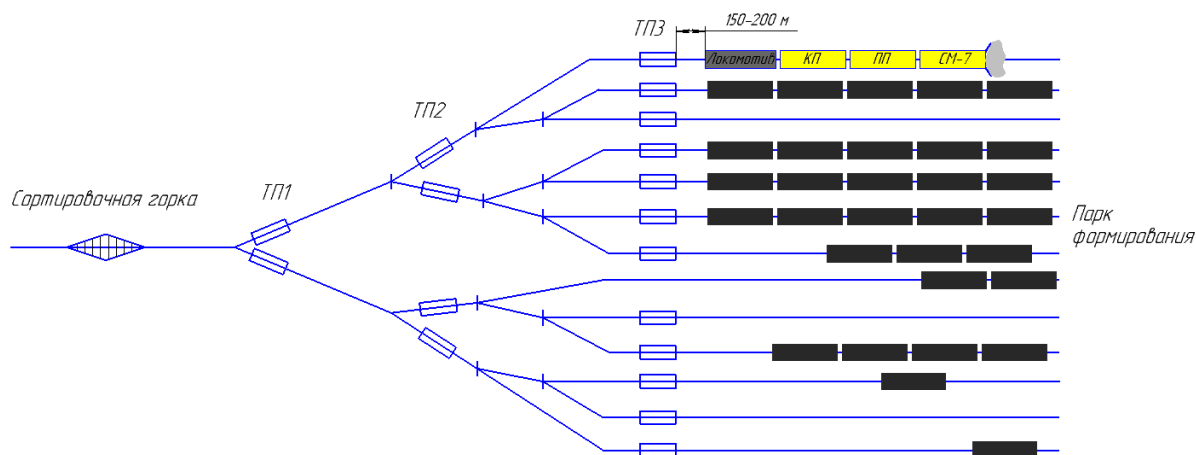


Рис. 1. Схема очистки сортировочного парка станции:
ТП1, ТП2, ТП3 – первая, вторая и третья тормозные позиции; КП, ПП, СМ-7 – концевой, промежуточный полувагоны и головная машина снегоуборочного поезда СМ-7

СС-3. Также вместо плужных машин данный метод предусматривает использование стругов и ПОМ. Высокая рабочая скорость и непрерывная технология обеспечивают технике возможность проследовать с перегона на станцию как по главным, так и по другим путям парков. Существенные недостатки первого метода заключаются в следующем:

- невозможно очистить стрелочные переводы, что требует дополнительного использования ручного труда (работников дистанции пути);
- не все станции обладают полевой стороной;
- одновременно заняты два пути при очистке одного пути от снега;
- путь временного складирования снега должен быть свободен и закрыт для движения других поездов;
- работа пневмоочистителей, стругов, плужных снегоочистителей у низких платформ не допускается;
- работа ПОМ запрещена в случае нахождения ближе 40 м от жилых строений, людей и автотранспорта.

Второй метод очистки предполагает комбинацию непрерывной и циклической технологий, так как дополнительно привлекаются снегоуборочные машины серий СМ (СМ-2М, СМ-7, СМ-3) или ПСС. Изначально струг или СДПМ смещают вал снега в междупутье или на выделенный путь в зависимости от скорости движения. Накопление материала между

железнодорожными путями обеспечивает беспрепятственный пропуск поездов по всем рельсовым путям, что является большим преимуществом по сравнению со складированием снега на соседний путь.

К недостаткам второго метода можно отнести:

- требуется сравнительно большее время на очистку путей за счет использования снегоуборочной машины;
- путь складирования снега закрыт для движения других поездов (кроме снегоуборочных);
- при перевалке снега во второе междупутье требуется дополнительный проезд техники по уже очищенному пути, так как боковые крылья струга не заглубляются ниже головки рельсов;
- работа ПОМ при расположении платформ берегового типа друг напротив друга не допускается;
- работа струга с боковыми крыльями не всегда возможна из-за наличия препятствий в междупутье;
- снегоуборочные поезда не способны собирать накопленный материал в междупутье с большим количеством препятствий;
- при перевалке снега стругом требуется свобода и закрытие двух путей.

Третий метод предпочтителен при очистке железнодорожных путей, расположенных вдоль пассажирских платформ и с большим количеством препятствий (переходных насти-

лов, путевых ящиков, маневровых светофоров и прочих устройств железнодорожной автоматики). Основное достоинство снегоуборочной техники состоит в одновременном совмещении операций очистки и уборки в накопительные полувагоны, что не требует занятия соседнего пути. Например, в городской зоне расположения станционных путей или в горочном парке отбрасывать материал в откос не представляется возможным, поэтому вывоз снежной массы является необходимостью. На схеме (см. рис. 1) изображена работа снегоуборочного поезда в сортировочном парке станции, где соседние пути заняты вагонами, т. е. перевалка невозможна. После очистки горловины со стороны горки специальный подвижной состав отправился на крайний свободный путь, а занятые требуют перестановки вагонов. Стоит отметить, что скорость снегоуборочной машины в рабочем режиме ограничена не только производительностью питателя, но и скоростью руководителя работ, который обязан находиться по маршруту следования машины на расстоянии не менее 10 м от рабочих механизмов, в то время как струг, СДПМ, ПОМ не требуют такого сопровождения. После очистки горочной горловины приступают к работе со стороны парка формирования. Недостатки схемы, приведенной на рис. 1:

- низкая производительность очистки, которая напрямую зависит от толщины и физико-механических свойств снега;
- сравнительно большая длина пути, занятого снегоуборочной техникой;
- строгая последовательность технологических операций;
- удаленность места загрузки от места выгрузки;

– отсутствие возможности смещать материал на соседний путь.

Снеговые поезда предназначены для вывоза снега за пределы станции и состоят из 10–15 платформ с вагоном для обогрева рабочих.

Загрузка осуществляется либо с использованием ручного труда, либо с привлечением автотракторной техники на пневмоколесном ходу. Недостатки четвертого метода:

- требуется свободный путь для стоянки снегового поезда;
- необходимо длительное время очистки за счет значительной доли ручного труда;
- поезд не всегда вписывается в полезную длину пути станции;
- погрузка и выгрузка снега производятся только во время стоянки поезда.

Для повышения эффективности очистки станционных путей от снега при отсутствии возможности смещать материал на соседний путь предложено использовать струг СС-1М в качестве скрепера для формирования «заваловок» под снегоуборочные поезда. Расчетная схема совместной работы струга СС-1М и снегоуборочного поезда СМ-2 приведена на рис. 2.

При движении крыльями вперед струг с опущенными подрезными ножами смещает массу снега, образуя призму волочения для последующей уборки СМ. При этом высота сформированной «заваловки» должна быть не более 0,8 м в соответствии с техническими характеристиками снегоуборочного поезда СМ-2. Приблизительный объем вмещения снегоочистительного устройства струга (без крыльев) с учетом требований к высоте призмы составляет 1,3 м³. В связи с превышением максимальной рабочей скорости струга по сравнению с СМ в три раза допустим, что время

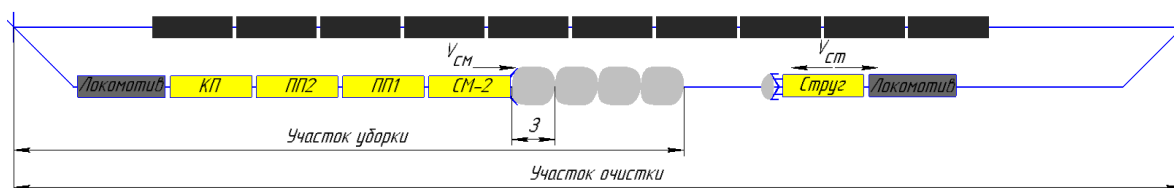


Рис. 2. Расчетная схема совместной работы струга и СМ-2 на станционном пути:

V_{CM} – направление движения снегоуборочного поезда; V_{CT} – направление движения струга;
 3 – сформированная снежная «заваловка»; КП, ПП1, ПП2, СМ-2 – концевой, первый и второй промежуточные полувагоны, головная машина снегоуборочного поезда СМ-2

очистки пути зависит только от времени работы снегоуборочной машины.

Для дальнейших расчетов воспользуемся рекомендациями заводов-изготовителей рассматриваемых машин к технологии выполнения работ:

– у СМ-2 заглубление питателя и крыльев (без щеток) должно происходить на 150 и 70 мм от уровня головки рельсов соответственно при максимальной рабочей скорости движения 5 км/ч [6];

– у СС-1М ножи опускаются на 50 мм от уровня головки рельсов и очистка происходит при максимальной скорости движения 15 км/ч [7].

Целесообразность перехода на комбинированную технологию очистки станционных путей с помощью машин СС-1М и СМ-2 обоснована критерием эффективности – временем очистки пути, которое напрямую зависит от производительности рабочих органов.

Поскольку струг уменьшает длину уборки пути для СМ, введем коэффициент сокращения длины пути k_c :

$$k_c = \frac{L_y}{L_o}, \quad (1)$$

где L_y, L_o – длина пути, подлежащего уборке и очистке соответственно, м.

Время уборки пути снегоуборочной машиной может быть рассчитано по формуле

$$t_0 = \frac{60Q_c}{P_T}, \quad (2)$$

где Q_c – объем снега на пути, м³.

Техническая производительность уборочно-очистительной техники с учетом толщины снега и скорости машины, м³/ч, определяется по формуле [8]:

$$P_T = 10^3 B H V_M, \quad (3)$$

где B, H – ширина и высота разрабатываемой траншеи соответственно, м; V_M – рабочая скорость машины, км/ч.

Эта производительность должна быть согласована с теоретической производительностью рабочих органов машин, т. е. не должна превышать 1 200 м³/ч у поезда СМ и 64 100 м³/ч у струга СС-1М.

Результаты исследования

Оптимальная толщина разрабатываемого слоя для СМ, при которой обеспечивается максимальная производительность и скорость уборки, по формуле (3) составит:

– без крыльев

$$H_o^{CM} = \frac{P_T}{10^3 B V_M} = \frac{1\,200}{10^3 \cdot 2,45 \cdot 5} = 0,098 \text{ м} = 9,8 \text{ см};$$

– с крыльями

$$H_o^{CM} = \frac{P_T}{10^3 B V_M} = \frac{980}{10^3 \cdot 2,45 \cdot 5} + \frac{220}{10^3 \cdot 5,1 \cdot 5} = 0,089 \text{ м} = 8,9 \text{ см}.$$

Полученные значения в переводе на толщину свежеснегавшего снега для рельсов марки Р65:

– без крыльев

$$h_{об}^{CM} = 0,128 \text{ м} = 12,8 \text{ см} \approx 13 \text{ см};$$

– с крыльями

$$h_{ок}^{CM} = 0,119 \text{ м} = 11,9 \text{ см} \approx 12 \text{ см}.$$

На рис. 3 приведен график зависимости технической производительности и скорости движения СМ от толщины выпавшего снега.

На рис. 4 построен график зависимости времени очистки от развернутой длины пути при циклической (сплошная уборка СМ) и комбинированной технологии (с дополнительным привлечением струга) с различным количеством осадков.

Поскольку общее время цикла СМ-2 зависит от множества факторов, а комбинированная технология к конкретному типу станции не привязана, оценка времени работы машины произведена лишь для операции загрузки (с учетом коэффициента загрузки снегоуборочного комплекса, равного $k_3 = 0,7$) [9, 10]. Точки на графике обозначают момент заполнения бункеров, когда поезду необходимо отправиться на выгрузку.

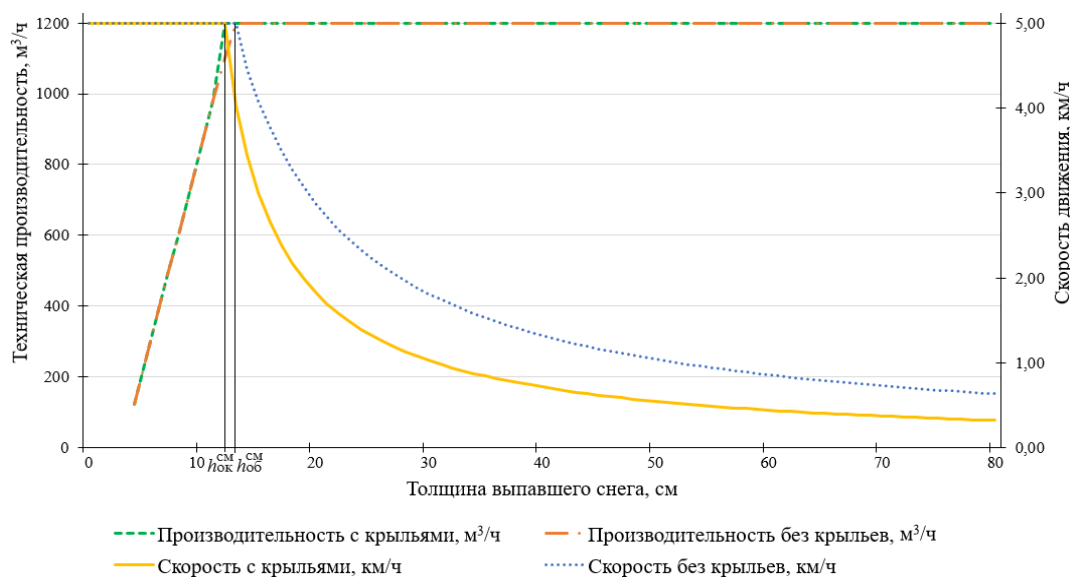


Рис. 3. График зависимости технической производительности и скорости движения СМ от толщины выпавшего снега

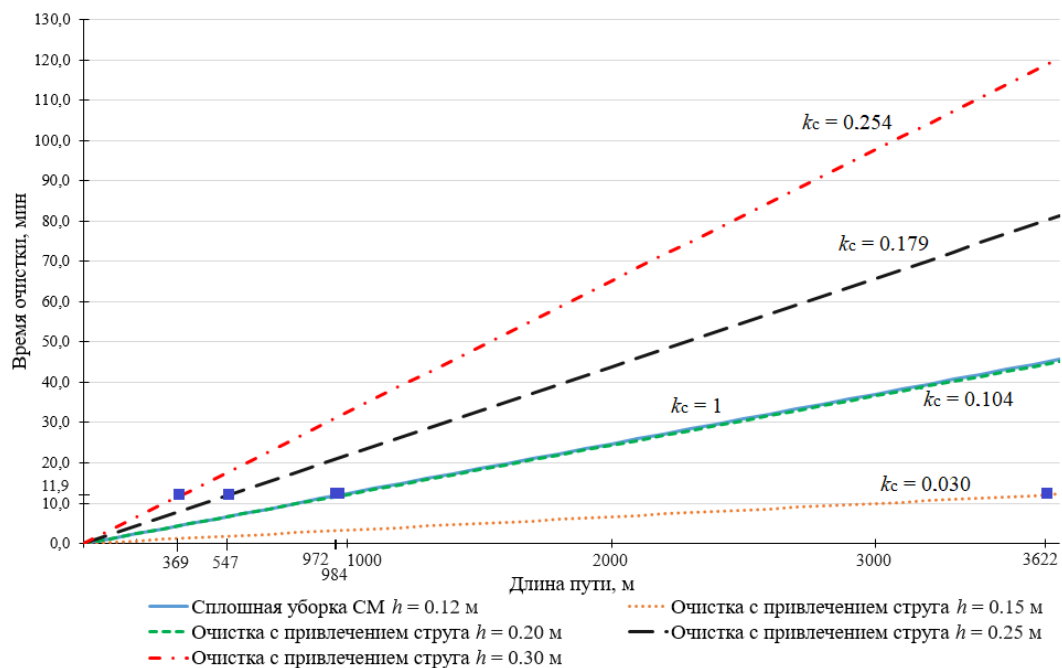


Рис. 4. График зависимости времени очистки от развернутой длины пути при циклической и комбинированной технологиях с различным количеством осадков

Выводы

По результатам проведенного исследования сформулированы следующие выводы:

1. При отсутствии возможности смещать материал на соседний путь и в междупутье комбинированную технологию возможно реализовать с помощью комплекта машин из струга СС-1М и снегоуборочного поезда СМ-2. Преимущество такого струга заключается в возможности транспортировать снег вдоль пути следования машины, который

также является участком складирования снега для последующей уборки снегоуборочным поездом, т. е. такой комплект занимает один путь. Вместо стругов возможно использовать несамоходные универсальные снегоуборочные машины УСМн, серийный выпуск которых начат с конца декабря 2022 г. [11].

2. Получена зависимость времени очистки от развернутой длины пути при циклической и предложенной комбинированной технологиях с различным количеством осадков. Наиболее

предпочтительной для комбинированной технологии очистки является толщина снега 0,15 м. За один рейс четырехвагонная СМ-2 и струг позволяют увеличить длину очистки в 3,7 раза в сравнении со сплошной уборкой СМ толщины снега 0,12 м, сэкономив только на операции загрузки более 30 мин. Повышение эффективности достигается за счет сокращения длины уборки для СМ-2 с 3 622 до 108 м ($k_c = 0,030$), что составляет 33,5 раза.

3. Так как на графике, приведенном на рис. 4, прямые с $k_c = 1$ и $k_c = 0,104$ практически совпадают, а толщина снега при этом отличается на 0,08 м, то справедливо предположить, что данный запас по количеству осадков может учитывать снегопад. То есть комбинированную технологию возможно использовать в условиях обильных осадков при уже имеющейся толщине снега на пути 0,12 м.

4. Оптимальной при сплошной уборке пути СМ является толщина свежеснегавпавшего снега около 0,12 м с использованием крыльев и 0,13 м без использования крыльев. При меньшем количестве осадков питатель будет недогружен по производительности, а при большем следует снижать рабочую скорость, которая ограничена не столько техническими характеристиками, сколько скоростью движения человека – руководителя работ, который обязан сопровождать машину, передвигаясь вдоль участка очистки.

Таким образом, комбинированная технология очистки станционных путей от снега при оптимальном количестве осадков и с грамотно подобранным комплектом машин способна повысить эффективность работы техники и станции в целом за счет сокращения времени на уборку материала.

Список источников

1. Баженов Ю., Денежкин А. Восточный полигон РЖД как пример региональной интеграции на Дальнем Востоке // Постсоветский материк : ежеквартальный общественно-политический научный журнал. 2019. № 1 (21). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vostochnyy-poligon-rzhd-kak-primer-regionalnoy-integratsii-na-dalnem-vostoke/viewer> (дата обращения: 10.05.2023).
2. Восточный полигон. Общая характеристика // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19716> (дата обращения: 10.05.2023).
3. Репях А. Ю. Анализ эффективности работы снегоуборочных поездов с помощью картирования // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (62). С. 15–22.
4. Шальковский В. Е. Организация снегоборьбы на сортировочных станциях Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры // Science Time. 2017. № 6 (42). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29671525_22730080.pdf (дата обращения: 22.09.2023).
5. Инструкция по подготовке к работе в зимний период и организации снегоборьбы на железных дорогах, в других филиалах и структурных подразделениях ОАО «РЖД», а также его дочерних обществах : утверждена распоряжением от 01.07.2022 № 1733/р. Доступ через справочно-правовую систему «КонсультантПлюс» (дата обращения: 10.05.2023).
6. Поезд снегоуборочный СМ-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 0154.00.000 ТО / МПС СССР, Главное управление пути, Проектно-технологическо-конструкторское бюро. Москва : Транспорт, 1985. 144 с.
7. Струг-снегоочиститель СС-1М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 1073А.00.00.000 ТО / МПС СССР, Главное управление пути, Проектно-технологическо-конструкторское бюро. Москва : Транспорт, 1987. 83 с.
8. Путевые машины : учебник / А. Ю. Абдурашитов [и др.]. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. 960 с.
9. Семенов М. А. Совершенствование организации процесса очистки путей от снега машинами типа СМ и ПСС на основе автоматизированного мониторинга : специальность 05.02.22 «Организация производства (транспорт)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Семенов Михаил Андреевич ; Сибирский государственный университет путей сообщения. Новосибирск, 2022. 188 с.
10. ЦП-751. Инструкция по снегоборьбе на железных дорогах Российской Федерации : утверждена заместителем министра путей сообщения Российской Федерации 25 апреля 2000 г. Москва, 2000. 58 с.

11. Белов С. А. СТМ и ТМЗ сертифицировали снегоуборочные машины ПСС-2П и УСМн // ROLLINGSTOCK Agency : информационное агентство : [официальный сайт]. URL: <https://rollingstock-world.ru/putevaya-tehnika/stm-i-tmz-sertificirovali-snegouborochnye-mashiny-pss-2p-i-usmn/>. Дата публикации: 12.01.2023.

References

1. Bazhenov Yu., Denezhkin A. Eastern range of Russian Railways as an example of regional integration in the Far East. *Post-Soviet Continent – a quarterly socio-political scientific journal*. 2019;(21). (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vostochnyy-poligon-rzhd-kak-primer-regionalnoy-integratsii-na-dalnem-vostoke/viewer>.
2. Eastern polygon. General characteristics. *Russian Railways portal: [site]*. (In Russ.). URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19716>.
3. Repyakh A. Yu. Analysis of the efficiency of snow brush train operation with mapping. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(62):15–22. (In Russ.).
4. Shalkovsky V. E. Organization of snow removal at marshalling stations of the West Siberian Infrastructure Directorate. *Science Time*. 2017;(42). (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29671525_22730080.pdf.
5. Instructions for preparing for work in the winter period and organizing snow fighting on railways, in other branches and structural divisions of Russian Railways, as well as its subsidiaries: Order No. 1733/r dated 01.07.2022. Access through the reference and legal system ConsultantPlus. (In Russ.).
6. Snow-removing train SM-2. Technical description and operating instructions 0154.00.000 TO. USSR Ministry of Railways. Main Track Department, Project and Technological Design Bureau. Moscow : Transport; 1985. 144 p. (In Russ.).
7. Plow-snow plow SS-1M. Technical description and operating instructions 1073A.00.00.000 TO. USSR Ministry of Railways. Main Track Department, Project and Technological Design Bureau. Moscow: Transport; 1987. 83 p. (In Russ.).
8. Abdurashitov A. Yu. [et al.]. Track machines: textbook. Moscow: Educational and methodological center for education in railway transport; 2019. 960 p. (In Russ.).
9. Semenov M. A. Improving the organization of the process of cleaning tracks from snow by machines of the SM and PSS type based on automated monitoring. Speciality 05.02.22 Production Engineering (transport). Dissertation for the degree of Candidate of Engineering 05.02.22. Semenov Mikhail Andreevich; Siberian Transport University. Novosibirsk; 2022. 188 p. (In Russ.).
10. CPU-751. Instructions for snow fighting on the railways of the Russian Federation: approved by the Deputy Minister of Railways of the Russian Federation dated April 25, 2000. Moscow; 2000. 58 p. (In Russ.).
11. Belov S. A. STM and TMZ certified snowplows PSS-2P and USMn. *Information agency ROLLINGSTOCK Agency: [official site]*. (In Russ.). URL: <https://rollingstockworld.ru/putevaya-tehnika/stm-i-tmz-sertificirovali-snegouborochnye-mashiny-pss-2p-i-usmn/>. Date of publication: 12 January 2023.

Информация об авторах

А. Л. Манаков – ректор Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.

А. Ю. Репях – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения, преподаватель новосибирского подразделения Западно-Сибирского учебного центра профессиональных квалификаций.

Information about the authors

A. L. Manakov – Rector of the Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.

A. Yu. Repyakh – Postgraduate at the Technology of Transport Engineering and Machine Operation Department, Siberian Transport University, teacher of the Novosibirsk division of the Training Center for Professional Qualifications of the West Siberian Railway.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 29.05.2023; принята к публикации 21.09.2023.

The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 29.05.2023; accepted for publication 21.09.2023.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.11:519.8
doi 10.52170/1815-9265_2023_67_13

Математическая модель распределения автомобилей по дорожной сети по первому принципу Вардроп на основе модели Гриншилдса

Марк Евгеньевич Корягин^{1✉}, Владимир Ильич Медведев², Юлия Владимировна Швец³, Наталья Борисовна Попова⁴

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

³ Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

¹ markkoryagin@yandex.ru✉

² medvedevvi2017@yandex.ru

³ julietta2905@mail.ru

⁴ pnb1512@yandex.ru

Аннотация. Вопрос распределения автомобильных потоков по транспортной сети не теряет актуальности последние десятилетия. Рост уровня автомобилизации приводит к образованию заторов, при этом различные участки улично-дорожной сети заполнены в разной степени. В статье приведена четырехэтапная модель формирования транспортных потоков. Особое внимание уделено этапу выбора маршрута передвижения пассажирами легкового автомобильного транспорта. В статье проведен обзор математических моделей транспортного потока, включающих три типа: прогнозные, имитационные и оптимизационные. Рассматриваемая в статье модель относится к типу прогнозных. Показаны основные классические макроскопические модели, отражающие влияние интенсивности потока транспорта на время его передвижения: Гриншилдса, Гринберга, BPR. За основу взята самая известная классическая модель Гриншилдса, которая показывает, что с ростом плотности автомобильного потока снижается его скорость. Рассмотрены принципы Вардроп, описывающие распределение транспортного потока по улично-дорожной сети. Выбран первый принцип Вардроп – так называемое равновесное распределение потоков, при котором каждый пассажир из имеющихся альтернатив выбирает наилучшую. В модели Гриншилдса выполнено преобразование: зависимость скорости от интенсивности транспортного потока заменена на зависимость времени передвижения от интенсивности транспортного потока. Получена формула, показывающая, при какой интенсивности транспортного потока автотранспорт будет использовать более длинную дорогу. Для двух дорог получено квадратное уравнение, позволяющее найти равновесное распределение транспортных потоков. Рассмотрен численный пример, показывающий изменение поведения пассажиров при росте интенсивности потока транспорта. Определены перспективы использования и обобщения данных моделей.

Ключевые слова: первый принцип Вардроп, модель Гриншилдса, математическое моделирование, выбор маршрута передвижения

Для цитирования: Математическая модель распределения автомобилей по дорожной сети по первому принципу Вардроп на основе модели Гриншилдса / М. Е. Корягин, В. И. Медведев, Ю. В. Швец, Н. Б. Попова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 13–20. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_13.

TRANSPORT

Original article

Mathematical model of the distribution of cars on the road network according to the first Wardrop principle based on the Greenshields model

Mark E. Koryagin^{1✉}, Vladimir I. Medvedev², Yulia V. Shvets³, Natalya B. Popova⁵

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

³ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

¹ markkoryagin@yandex.ru✉

² medvedevvi2017@yandex.ru

³ julietta2905@mail.ru

⁴ pnb1512@yandex.ru

Abstract. The issue of distribution of car flows along the transport network has not lost its relevance in recent decades. Increasing levels of motorization lead to congestion, the different sections of the road network are being filled to varying degrees. The article presents a four-stage model for the formation of traffic flows. Particular attention is paid to the stage of travel route choice. The article provides a review of mathematical models of traffic flow, including 3 types: predictive, simulation and optimization. The model discussed in the article is of the predictive type. The main classical macroscopic models showing the influence of traffic flow intensity on the flow time are shown: Greenshields, Greenberg, BPR. The most famous classic Greenshields model is taken as a basis; it shows that as the density of traffic flow increases, its speed decreases. The principles of Wardrop, which describe the distribution of traffic flow along the road network, are considered. The first Wardrop principle was chosen – the so-called equilibrium distribution of flows, in which each passenger chooses the best one from the available alternatives. Transformations have been made in the Greenshields model: the dependence of speed on the intensity of traffic flow has been replaced by the dependence of travel time on the intensity of traffic flow. A formula has been obtained showing at what intensity of traffic flow vehicles will use a longer road. For two roads, a quadratic equation is obtained that allows one to find the equilibrium distribution of traffic flows. A numerical example is considered showing changes in the behavior of passengers with an increase in the intensity of traffic flow. The prospects for using and generalizing these models are determined.

Keywords: first principle Wardrop's, Greenshields model, mathematical modeling, travel route choice

For citation: Koryagin M. E., Medvedev V. I., Shvets Yu. V., Popova N. B. Mathematical model of the distribution of cars on the road network according to the first Wardrop principle based on the Greenshields model. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):13–20. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_13.

Введение

Моделирование транспортных потоков является важнейшим инструментом для улучшения жизни в крупных городах. Существует большое количество вариантов изменения транспортной сети города, поэтому задача ее оптимизации является нетривиальной. Кроме всего прочего, транспортная система зависит от спроса на перевозки, и наоборот: спрос на перевозки зависит от характеристик транспортной системы.

В частности, хорошо известна четырех-этапная модель формирования транспортных потоков [1]:

1. Генерация (оценка) спроса на передвижения (trip generation).
2. Выбор способа передвижения, или расщепление поездок по видам транспорта (travel mode choice, modal split).
3. Формирование матрицы корреспонденций для определения объема перевозок между каждой парой пунктов (trip distribution).
4. Выбор маршрута передвижения (route choice, trip assignment).

Очевидно, что все четыре этапа связаны между собой. В частности, изменение маршрутов передвижения влияет на работу общественного транспорта и загрузку элементов улично-дорожной сети, что может привести к тому, что пассажиры выберут другой пункт назначения, другой способ передвижения или вообще откажутся от поездки. Отметим, что каждый этап описывается своими математическими моделями, но для решения практических задач необходимо увязать эти модели в единое целое, что делают многие исследователи, в частности в работах [2, 3].

Данная статья посвящена последнему этапу выбора маршрута передвижения при использовании легкового автомобильного транспорта.

В первую очередь отметим, что в крупном городе существует большое количество вариантов передвижения между пунктами. Самый простой вариант – так называемая манхэттенская метрика, в которой существует множество маршрутов передвижения с одинаковым расстоянием [4].

Но для пассажиров расстояние не главный критерий при выборе маршрута, важнее время передвижения, которое для каждого участка улично-дорожной сети является изменяющейся характеристикой. В развитие темы вводят термин обобщенной цены передвижения. Здесь учитывается расстояние, время передвижения, риски, равномерность движения, финансовые затраты на передвижение (в том числе плата за проезд по данному перегону, если она существует).

При этом очевидно, что для разных категорий пассажиров эти цены не одинаковы, поэтому более сложные модели распределения транспортных потоков расщепляют по категориям пассажиров [3]. Кроме прочего, возможны ошибки при выборе маршрута передвижения, что отмечено в критике моделей распределения транспортных потоков по сети [5], предполагающих рациональное поведение пассажиров.

Но все-таки основной характеристикой для большинства пассажиров является время передвижения, которое зависит от загрузки участков улично-дорожной сети. То есть время передвижения зависит от интенсивности или плотности транспортного потока.

Материалы и методы исследования

Существует множество моделей транспортных потоков. В частности, В. И. Швецов выделяет три типа моделей: прогнозные, имитационные и оптимизационные [1]. Первый тип моделей определяет общие потоки на сети, второй учитывает детали транспортной сети и имитирует движение автомобилей, третий решает широкий класс задач в зависимости от целей исследования.

Другая классификация выделяет макро- и микромоделей транспортных потоков [6, 7]. Причем они похожи на первые два типа предыдущей классификации. Основным подходом при описании макромоделей является поток жидкости. Для описания микромоделей используются разные подходы, в частности модели клеточных автоматов.

Основным выводом, который можно сделать из любых моделей транспортных потоков, является то, что с ростом интенсивности транспортного потока время передвижения увеличивается.

Самые простые модели транспортных потоков связывают скорость передвижения v (или время передвижения t) с плотностью ρ или интенсивностью λ транспортного потока. Также учитывается скорость свободного движения v_{\max} (или время t_{\min}) при отсутствии автомобилей, а также максимальная плотность транспортного потока ρ_{\max} .

Самая известная модель транспортного потока – модель Гриншилдса [8, 9] появилась около 90 лет назад:

$$v(\rho) = v_{\max} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}} \right). \quad (1)$$

В этой модели связь скорости и плотности линейна. При плотности, близкой к максимальной (бампер к бамперу), скорость падает до нуля. Таким образом, если интенсивность потока транспорта, проезжающего по маршруту, низкая, то могут возникнуть две ситуации (дуализм): либо движение свободно (скорость высокая), либо транспорт движется в пробке (скорость низкая).

Подобные проблемы свойственны и другим моделям:

– обобщенной модели Гриншилдса [8]

$$v(\rho) = v_{\max} \left(1 - \left[\frac{\rho}{\rho_{\max}} \right]^{(n+1)/2} \right); \quad (2)$$

– модели Гринберга [8, 10]

$$v(\rho) = C \ln \frac{\rho_{\max}}{\rho}, \quad (3)$$

где C – константа.

Модель BPR [11] связывает время и интенсивность транспортного потока. Она используется для описания различных транспортных процессов: передвижения по перегону, передвижения по перекрестку, парковки. В ней при заданной интенсивности потока одно время передвижения (в отличие от дуализма предыдущих моделей), что удобно при решении оптимизационных задач [12]:

$$t(\lambda) = t_{\min} \left(1 + \alpha \left(\frac{\lambda}{C} \right)^{\beta} \right). \quad (4)$$

На практике движение транспортного потока сложнее и не описывается гладкими кривыми. Существуют резкие переходы от одного режима к другому [13]: свободный поток, синхронизированный поток, затор. Каждая фаза описывается своей кривой на основной диаграмме транспортного потока.

Так как время передвижения транспорта зависит от интенсивности транспортного потока, то и поведение пассажиров меняется в зависимости от загрузки дорожной сети. Вопрос о том, как ведут себя пассажиры, имеет два ответа, сформулированные в принципах Вардропа [14].

Первый принцип Вардропа гласит, что пассажиры выбирают маршрут наименьшей стоимости (обычно используют время) из всех доступных вариантов. То есть пассажиры выступают как игроки, у которых есть множество стратегий (маршрутов), и время передвижения зависит от действий других игроков (пассажиров). Таким образом, данная модель приводит к равновесию Нэша – Вардропа в транспортной сети. Следствием данного равновесия является то, что все маршруты, которые используются для передвижения, имеют одинаковое время передвижения, а те, которые не используются, имеют большее время передвижения. Легко показать, что в противном случае такое распределение не будет обладать равновесием Нэша.

Второй принцип Вардропа называется системным оптимумом. В этом случае пассажиры при выборе маршрута передвижения исходят не из личной выгоды, а из общих потерь всех пассажиров. В настоящее время данный

подход сложно реализовать, поэтому большая часть публикации посвящена первому принципу Вардропа [3, 12, 15, 16].

Вопросы поиска равновесного распределения потоков решались с 70-х гг. прошлого века. Доказано, что равновесие в транспортной сети существует всегда, однако в некоторых случаях оно не единственное, но равновесное время передвижения единственное [15]. Были созданы алгоритмы, позволяющие решать подобную задачу даже без использования матрицы корреспонденций. Например, алгоритм Франка – Вульфа применяется до сих пор [17], а также предлагаются более совершенные алгоритмы [15]. В [16] задача распределения потоков в сети сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений.

На основе равновесного распределения потоков построены различные оптимизационные модели: в [18] рассмотрена модель взаимодействия администрации города и провайдеров навигационных услуг, в [19] – модель выделения транспортной сети для экологически более безопасного транспорта.

Целью данного исследования является построение математической модели распределения потока по двум дорогам по первому принципу Вардропа при условии, что характеристики транспортного потока описываются по модели Гриншилдса. Отметим, что такое сочетание моделей в литературе не встречалось. Результаты представляют теоретический интерес, просты в применении и могут быть использованы для обучения студентов.

Результаты исследования

В данной работе представлена простая модель равновесного распределения потоков (первый принцип Вардропа) по двум дорогам. При этом в качестве модели скорости передвижения использована классическая модель Гриншилдса (1):

$$v(\rho) = v_{\max} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}} \right).$$

В приведенной формуле скорость передвижения выражена через плотность транспортного потока, а нам необходимо определить время передвижения в зависимости от интенсивности транспортного потока. Для этого введем длину участка транспортной сети L .

Плотность транспортного потока зависит от интенсивности потока, времени передвижения и длины дороги:

$$\rho = \frac{\lambda t}{L}. \quad (5)$$

Очевидная формула скорости передвижения приводит к замене скорости передвижения на время передвижения:

$$v = \frac{L}{t}. \quad (6)$$

Плотность транспортного потока зависит от максимального количества автомобилей на дороге, что обратно пропорционально средней длине автомобиля:

$$\rho_{\max} = \frac{1}{l_{\min}}. \quad (7)$$

Используя формулы (5)–(7), перепишем модель Гриншилдса в следующем виде:

$$\frac{L}{t} = \frac{L}{t_{\min}} \left(1 - \frac{\lambda t}{L \rho_{\max}} \right). \quad (8)$$

Выполним преобразования и получим квадратное уравнение для поиска времени передвижения:

$$\frac{\lambda}{L \rho_{\max}} t^2 - t + t_{\min} = 0. \quad (9)$$

Два корня характеризуют дуализм модели. Нас интересует движение транспорта до образования затора, поэтому берем наименьший корень уравнения:

$$t(\lambda) = \frac{L \rho_{\max}}{2\lambda} \left(1 \pm \sqrt{1 - 4 \frac{\lambda t_{\min}}{L \rho_{\max}}} \right). \quad (10)$$

Пусть требуется решить задачу определения интенсивности транспортного потока, при которой начнется использование другой дороги со временем свободного движения t_1 , $t(\lambda) = t_1$.

Тогда преобразуем уравнение (10):

$$\frac{2\lambda}{L \rho_{\max}} t_1 - 1 = \pm \sqrt{1 - 4 \frac{\lambda t_{\min}}{L \rho_{\max}}}. \quad (11)$$

Возведем его в квадрат. Свободные члены сократятся, и получим интенсивность транспортного потока:

$$\lambda = L \rho_{\max} \frac{t_1 - t_{\min}}{t_1^2}. \quad (12)$$

Следующая задача, которую необходимо решить, – это распределение транспортного потока по двум дорогам.

Пусть поток λ необходимо распределить между дорогами 1 и 2:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2.$$

При этом, если используются две дороги, то время передвижения по ним будет одинаковым:

$$t = \frac{L_1 \rho_{\max 1}}{2\lambda_1} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{\lambda_1 t_{\min 1}}{L_1 \rho_{\max 1}}} \right) = \frac{L_2 \rho_{\max 2}}{2\lambda_2} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{\lambda_2 t_{\min 2}}{L_2 \rho_{\max 2}}} \right). \quad (13)$$

Для удобства введем константы:

$$A_i = \frac{L_i \rho_{\max i}}{2}, B_i = \frac{4t_{\min i}}{L_i \rho_{\max i}}, A_i B_i = 2t_{\min i}.$$

Тогда

$$\frac{A_1}{\lambda_1} (1 - \sqrt{1 - B_1 \lambda_1}) = \frac{A_2}{(\lambda - \lambda_1)} (1 - \sqrt{1 - (\lambda - \lambda_1) B_2}). \quad (14)$$

Уравнение (14) необходимо 2 раза возвести в квадрат, чтобы избавиться от иррациональности. Таким образом, получено квадратное уравнение:

$$\begin{aligned} (2A_1 A_2 - B_1 A_1^2 (\lambda - \lambda_1) - B_2 A_2^2 \lambda_1)^2 = \\ = 4(A_1 A_2)^2 (1 - (\lambda - \lambda_1) B_2) (1 - B_1 \lambda_1) + \\ + B_1^2 A_1^4 (\lambda - \lambda_1)^2 + B_2^2 A_2^4 \lambda_1^2 - \\ - 2B_1 B_2 A_1^2 A_2^2 (\lambda - \lambda_1) \lambda_1 + \\ + 4(B_2 A_1^2 A_2^2 - B_1 A_1^3 A_2) (\lambda - \lambda_1) + \\ + 4(B_1 A_1^2 A_2^2 - B_2 A_2^3 A_1) \lambda_1 = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Корень уравнения выбирается из условия неотрицательности интенсивности движения транспорта по каждой из дорог.

Численный пример

Рассмотрим две дороги (двух- и четырехполосные). На первой максимальная плотность потока $\rho_{\max 1} = 200$ автомобилей на километр, на второй $\rho_{\max 2} = 400$. Длина первой дороги $L_1 = 3$ км, а второй $L_2 = 5$ км. Скорость свободного движения по первой дороге $v_{\max 1} = 30$ км/ч, а на второй $v_{\max 2} = 40$ км/ч, т. е. минимальное время передвижения $t_{\min 1} = 0,1$ ч, а $t_{\min 2} = 0,125$ ч.

По формуле (12) определим поток транспорта, при котором начнется использование второй дороги: $\lambda = 960$. То есть, когда поток автомобилей превысит 960 автомобилей в час, часть транспортного потока начнет использовать вторую дорогу.

Решая квадратные уравнения для разных интенсивностей транспортного потока (15), получим распределение автомобилей по двум дорогам (рис. 1).

По формуле (13) получим время передвижения транспорта для разных интенсивностей транспортного потока (рис. 2).

Отметим, что перелом линии происходит при 960 автомобилях в час, т. е., когда автомобили начинают использовать вторую дорогу, скорость роста времени передвижения снижается.

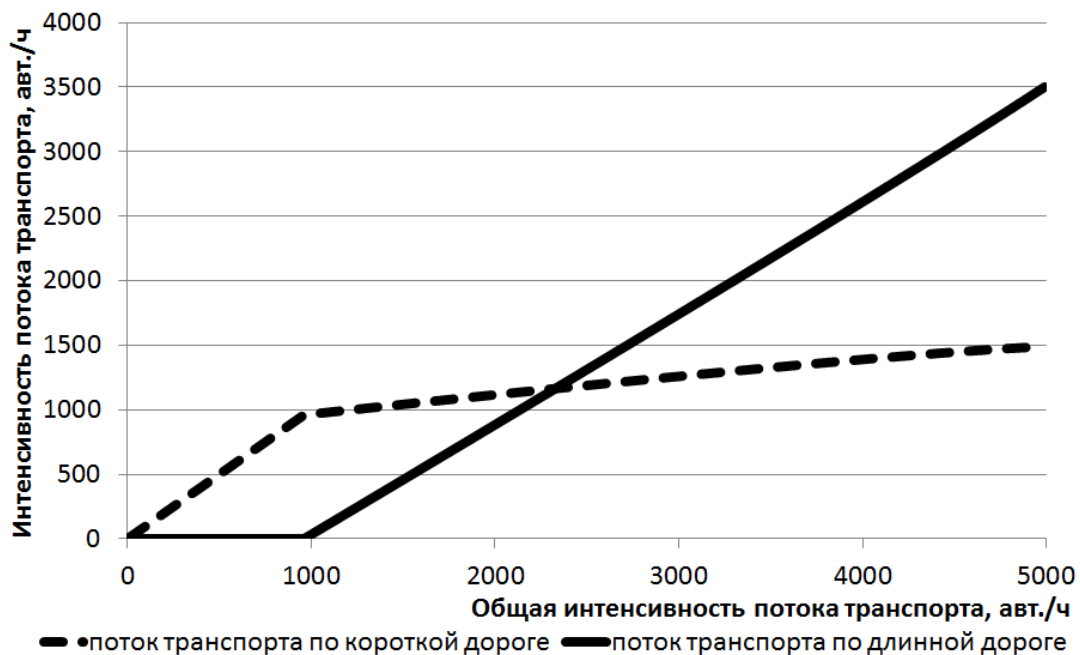


Рис. 1. Распределение транспортных потоков по двум дорогам

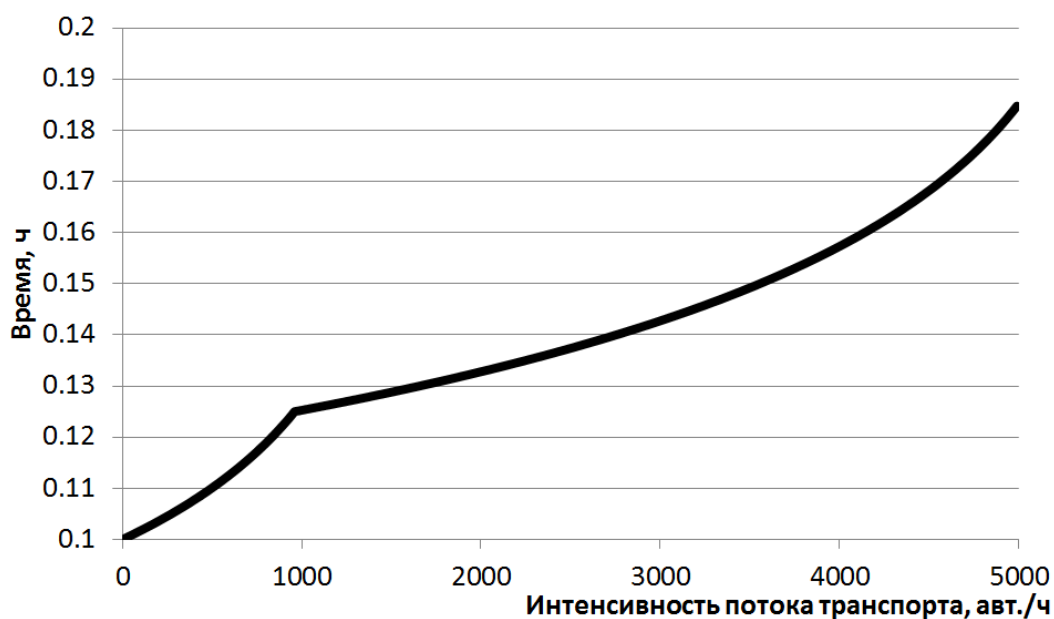


Рис. 2. Время передвижения транспорта при разной интенсивности транспортного потока

Выводы

В данной статье проведен анализ математических моделей транспортных потоков. Рассмотрена классическая модель Гриншилдса, на основе которой построена модель распределения транспортного потока между двумя дорогами. Для этого в модели Гриншилдса выполнено преобразование: зависимость скорости от интенсивности транспортного потока заменена на зависимость времени передвижения от интенсивности транспортного потока. Построена модель, определяющая, при какой интенсивности будет использована более длинная дорога. Также получено квадратное уравнение, позволяющее определить, как распределяется транспортный поток по двум дорогам.

Полученные формулы имеют большое учебное значение: любой студент вручную может найти решение, для того чтобы понять, что такое равновесие в транспортной сети.

Ограничением при использовании данных формул является условие движения автомобилей до образования заторов (при решении квадратного уравнения выбирается именно такой корень).

Применение модели для большего количества дорог приведет к необходимости численного решения системы нелинейных уравнений, что несложно реализовать в различных программных средах, однако при этом теряется учебная простота модели.

Еще одним вариантом развития исследования является сравнение первого и второго принципов Вардропа (для определения того, какую выгоду могут дать информационные системы, распределяющие транспортные потоки), а также использование других моделей транспортных потоков, например формулы BPR.

Список источников

1. Швецов В. И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. № 11. С. 3–46.
2. О трехстадийной версии модели стационарной динамики транспортных потоков / А. В. Гасников, Ю. В. Дорн, Ю. Е. Нестеров, С. В. Шпирко // Математическое моделирование. 2014. Т. 26, № 6. С. 34–70.
3. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к московской агломерации / А. С. Алиев, А. И. Стрельников, В. И. Швецов, Ю. З. Шершевский // Автоматика и телемеханика. 2005. № 11. С. 113–125.

4. Корягин М. Е., Березина А. С. Моделирование маршрутной сети прямоугольного города с Манхэттенской метрикой // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 2. С. 21–25.
5. Курганов В. М. Ограничения моделей оптимизации поведения участников дорожного движения // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2016. № 1. С. 213–221.
6. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / [А. В. Гасников и др.] ; под редакцией А. В. Гасникова. 2-е издание, исправленное и дополненное. Москва : Издательство МЦНМО, 2014. 426 с.
7. Семенов В. В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса. Москва : Институт прикладной математики РАН, 2004. 44 с.
8. Li M. Z. F. A generic characterization of equilibrium speed-flow curves // Transportation Science. 2008. Vol. 42, No. 2. P. 220–235.
9. Greenshields B. D. A study of traffic capacity // Highway Research Board Proceedings. 1935. Vol. 14, No. 1. P. 448–477.
10. Greenberg H. An analysis of traffic flow // Operations Research. 1959. Vol. 7, No. 1. P. 79–85.
11. Traffic Assignment Manual // Urban Planning Division / U.S. Department of Commerce: Washington, DC, 1964.
12. Крылатов А. Ю. Оптимальные стратегии управления транспортными потоками на сети из параллельных каналов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2014. № 2. С. 120–129.
13. Поиск стохастических равновесий в транспортных моделях равновесного распределения потоков / А. В. Гасников, Е. В. Гасникова, П. Е. Двуреченский [и др.] // Труды Московского физико-технического института. 2015. Т. 7, № 4 (28). С. 114–128.
14. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // Proceedings of the Institute of Civil Engineers. 1952. Pt. 1, No. 3. P. 325–362.
15. Швецов В. И. Алгоритмы распределения транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2009. № 10. С. 148–157.
16. Крылатов А. Ю., Широколова А. П. Равновесное распределение потоков по маршрутам линейной транспортной сети как решение системы линейных алгебраических уравнений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2018. № 2. С. 103–115.
17. Универсальный метод поиска равновесий и стохастических равновесий в транспортных сетях / Д. Р. Баймурзина, А. В. Гасников, Е. В. Гасникова [и др.] // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2019. Т. 59, № 1. С. 21–36.
18. Захаров В. В., Крылатов А. Ю. Системное равновесие транспортных потоков в мегаполисе и стратегии навигаторов: теоретико-игровой подход // Математическая теория игр и ее приложения. 2012. Т. 4, № 4. С. 23–44.
19. Захаров В. В., Крылатов А. Ю. Моделирование конкурентной маршрутизации экологически безопасных транспортных потоков на городской транспортной сети // Управление большими системами : сборник трудов. 2015. № 55. С. 185–223.

References

1. Shvetsov V. I. Mathematical modeling of traffic flows. *Automation and remote control*. 2003;11:3–46. (In Russ.).
2. Gasnikov A. V., Dorn Yu. V., Nesterov Yu. E., Shpirko S. V. On the three-stage version of stable dynamic model. *Mathematical Modelling*. 2014;26(6):34–70. (In Russ.).
3. Aliev A. S., Strelnikov A. I., Shvetsov V. I., Shershevskiy Yu. Z. Modeling of the city transport flows as applied to the Moscow agglomeration. *Automation and remote control*. 2005;11:113–125. (In Russ.).
4. Koryagin M. E., Berezina A. S. Simulation of the route network of a rectangular city with the Manhattan metric. *Scientific problems of transport of Siberia and the Far East*. 2018;(2):21–25. (In Russ.).
5. Kurganov V. M. Model limits of road traffic optimization. *Bulletin of Tver State University. Series: Economy and Management*. 2016;(1):213–221. (In Russ.).
6. Gasnikov A. V. [et al.]. Introduction to mathematical modeling of traffic flows. Edited by Gasnikov A. V. Second edition, revised and expanded. Moscow: Publishing house Moscow Centre for Continuous Mathematical Education, 2014. 426 p. (In Russ.).
7. Semyonov V. V. Mathematical modeling of transport streams dynamics of megacities. Moscow: Institute of Applied Mathematics, the Russian Academy of Science; 2004. 44 p. (In Russ.).

8. Li M. Z. F. A generic characterization of equilibrium speed-flow curves. *Transportation Science*. 2008;42(2):220–235.
9. Greenshields B. D. A study of traffic capacity. *Highway Research Board Proceedings*. 1935;14(1):448–477.
10. Greenberg H. An analysis of traffic flow. *Operations Research*. 1959;7(1):79–85.
11. Traffic Assignment Manual. *Urban Planning Division*. U.S. Department of Commerce. Washington, DC, USA; 1964.
12. Krilatov A. Yu. Optimal strategies for traffic flow management on the transportation network of parallel links. *Bulletin of Saint-Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2014;(2):120–129. (In Russ.).
13. Gasnikov A. V., Gasnikova E. V., Dvurechensky P. E., Ershov E. I., Lagunovskaya A. A. Search for the stochastic equilibria in the transport models of equilibrium flow distribution. *Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*. 2015;7(28):114–128. (In Russ.).
14. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*. 1952;1(3):325–362.
15. Shvetsov V. I. Algorithms for distributing traffic flows. *Automation and remote control*. 2009;(10):148–157. (In Russ.).
16. Krylatov A. Yu., Shirokolobova A. P. Equilibrium route flow assignment in linear network as a system of linear equations. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2018;(2):103–115. (In Russ.).
17. Baimurzina D. R., Gasnikov A. V., Gasnikova E. V. [et al.]. Universal method of searching for equilibria and stochastic equilibria in transportation networks. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2019;59(1):21–36. (In Russ.).
18. Zakharov V. V., Krylatov A. Yu. Traffic Flow System Equilibrium in Megapolis and the Navigator Strategies: Game Theory Approach. *Mathematical Game Theory and its Applications*. 2012;4(4):23–44. (In Russ.).
19. Zakharov V. V., Krylatov A. Yu. Competitive green vehicles assignment in transportation network. *Management of large systems. Proceedings*. 2015;(55):185–223. (In Russ.).

Информация об авторах

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

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

Ю. В. Швец – доцент кафедры «Высшая математика» Сибирского государственного университета путей сообщения, доцент кафедры «Высшая математика и информатика» Сибирского государственного университета водного транспорта, кандидат педагогических наук.

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

Information about the authors

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

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

Yu. V. Shvets – Associate Professor of the Higher Mathematics Department, Siberian Transport University, Associate Professor of the Higher Mathematics and Informatics Department, Siberian State University of Water Transport, Candidate of Pedagogical Sciences.

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

Статья поступила в редакцию 21.09.2023; одобрена после рецензирования 17.10.2023; принята к публикации 18.10.2023.

The article was submitted 21.09.2023; approved after reviewing 17.10.2023; accepted for publication 18.10.2023.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.222.1
doi 10.52170/1815-9265_2023_67_21

Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов как альтернативы сооружению вторых главных путей

Сергей Анатольевич Бессоненко¹, Николай Игоревич Осипов²✉,
Владимир Ильич Медведев³

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

¹ bessonenkosa@mail.ru

² N-I-Osipov@yandex.ru✉

³ MedvedevVI2017@yandex.ru

Аннотация. На современном этапе развития экономики страны все большую актуальность приобретает повышение качества пропуска поездопотоков по железнодорожным направлениям за счет развития интервального регулирования не только на особогрузонапряженных двухпутных линиях, но и на однопутных, как проектируемых, так и уже существующих, на которых прогнозируется повышение объемов перевозок. В статье оценена эффективность использования автоблокировок с «фиксированными» и «подвижными» блок-участками на одной из однопутных линий Восточного полигона при различных размерах движения. Для корректной имитации работы линии задействовано имитационное моделирование с использованием системной динамики (для тяговых расчетов), процессного (с целью имитации логики действий диспетчерского аппарата) и агентного (для симуляции движения каждого из поездов) видов моделирования. Разработано девять сценариев работы железнодорожного участка при освоении разных размеров движения. Критериями оценки качества работы участка принимались техническая и участковая скорости. По мере увеличения размеров движения на рассмотренной линии более передовая система позволяет эффективнее бороться с негативным взаимовлиянием поездов различных категорий внутри уплотненного потока и обеспечить пропуск 38 пар поездов с участковой скоростью 43 км/ч, тем самым освоив перспективные размеры перевозок с минимальными затратами на развитие инфраструктуры. Дальнейшие исследования предполагают внедрение в разработанную модель дополнительных модулей с целью оценки технико-экономической эффективности различных вариантов интервального регулирования, а также для моделирования взаимодействия инфраструктуры железнодорожных участков и технических станций.

Ключевые слова: интервальное регулирование движения поездов, «виртуальная сцепка», «фиксированные» блок-участки, «подвижные» блок-участки, имитационное моделирование

Для цитирования: Бессоненко С. А., Осипов Н. И., Медведев В. И. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов как альтернативы сооружению вторых главных путей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 21–29. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_21.

TRANSPORT

Original article

Evaluating the effectiveness of interval train control as an alternative to the constructing second main tracks

Sergey A. Bessonenko¹, Nikolay I. Osipov²✉, Vladimir I. Medvedev³

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

¹ bessonenkosa@mail.ru

² N-I-Osipov@yandex.ru✉

³ MedvedevVI2017@yandex.ru

Abstract. At the present stage of national economy development it's becoming more and more important to improve the quality of train traffic passing by railway lines due to the development of interval regulation not only on heavy-load double-track lines, but also on single-track lines, both projected and existing, where the increase in traffic volumes is forecasted. In the article the efficiency of using auto blocking with «fixed» and «moving» blocks on one of the single-track lines of the Eastern polygon at different traffic sizes is estimated. In order to correctly simulate the operation of the line, simulation modelling with the use of system dynamics (for traction calculations), process (in order to simulate the logic of actions of the dispatching apparatus) and agent-based (to simulate the

movement of each train) types of modelling is involved. Nine scenarios of railway line operations under different traffic sizes were developed. Technical and sectional speeds were used as criteria for assessing the quality of line operation. As the size of traffic on the line under consideration increases, the more advanced system makes it possible to deal more effectively with the negative mutual influence of trains of different categories within the compacted flow and to ensure the passage of 38 pairs of trains with a section speed of 43 km/h and thus to master the prospective size of traffic with minimum expenditure on infrastructure development. Further research involves the introduction of additional modules into the developed model to assess the technical and economic efficiency of various interval regulation options, as well as for modelling the interaction between the infrastructure of railway lines and technical stations.

Keywords: interval train control, “virtual coupling”, “fixed” blocks, “moving” blocks, simulation modelling

For citation: Bessonenko S. A., Osipov N. I., Medvedev V. I. Evaluating the effectiveness of interval train control as an alternative to the constructing second main tracks. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):21–29. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_21.

Введение

Резкий рост грузопотоков в восточном направлении обуславливает работу ключевых транспортных артерий при отсутствии резервов пропускных и провозных способностей, в связи с чем требуется мобилизация внутренних резервов и активное внедрение инноваций. Одним из способов повышения пропускной способности направлений является сокращение межпоездных интервалов, достижение которого при традиционных средствах крайне затруднительно. Данное обстоятельство привело к внедрению систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП).

В связи с высокой стоимостью внедрения передовых СИРДП их тиражирование является наиболее актуальным мероприятием по увеличению пропускной способности на особогрузонапряженных линиях (Транссибирской магистрали, двухпутных участках Байкало-Амурской магистрали), так как от ее дефицита компания ОАО «РЖД» на данный момент несет значительные потери. На современном этапе уже определены сопряженные с внедрением СИРДП проблемы с разбивкой по хозяйствам [1, с. 221], установлена зависимость провозной способности от расстояния между поездами в потоке при насыщении двухпутного участка [2, с. 351], выработан перечень мероприятий для формирования оптимальных схем путевого развития технических и промежуточных станций с целью эффективного внедрения интервального регулирования [3]. Усилиями НИИАС с помощью установки интервальных и групповых сигналов в горловинах преодолен локальный «волновой эффект», связанный с превышением минимального межпоездного интервала при приеме (отправлении) поездов на (с) технические станции [4, с. 104].

Другим, на данный момент менее проработанным (хотя и отраженным в Концепции [5]) в

отечественной теории и практике аспектом внедрения СИРДП является оценка их эффективности на однопутных линиях в качестве способа устранения (или значительного отдаления) потребности возведения вторых главных путей. Считается, что на двухпутном участке влияние систем автоматики на пропускную способность выражено наиболее ярко [2, с. 343], тогда как на однопутных линиях велико влияние типа графика движения (непакетный, частично-пакетный, пакетный) и конфигурации участка (количество и длина приемо-отправочных путей для скрещения пакетов поездов).

Однако в последние годы наблюдается постепенный рост числа проводимых отечественными учеными исследований по определению целесообразности развития интервального регулирования на однопутных линиях. Данный вопрос рассматривался специалистами Сибирского государственного университета путей сообщения в работах [6, 7], главными результатами которых является определение условий, при которых внедрение традиционной автоблокировки способно повысить качество перевозок на однопутных линиях, а также оценка эффективности ее внедрения в зависимости от протяженности перегонов таких линий.

В работе [8] проведены апробированные на Северном широтном ходу исследования по сравнению показателей перевозочного процесса при использовании полуавтоблокировки (ПАБ) и традиционной автоблокировки с применением системы ЭЛЬБРУС-РПС, главным выводом которых является невозможность овладения плановыми размерами перевозок без внедрения автоблокировки.

Помимо теоретических наработок имеют место и практические результаты по успешному внедрению СИРДП на однопутных линиях, в частности на линии БАМа Новый Ургал – Ком-

сомольск-на-Амуре протяженностью 495 км. На данной линии ПАБ заменена на автоблокировку с «подвижными» блок-участками (из всех внедряемых систем реализующую наибольшую пропускную способность, но вместе с тем и самую дорогостоящую).

На данный момент аспекты оценки эффективности интервального регулирования на однопутных линиях наиболее проработаны за рубежом, например в США, поскольку основная часть американских железнодорожных линий являются однопутными. Так, учеными из Иллинойса проведено моделирование однопутного участка и доказана эффективность «подвижных» блок-участков как меры улучшения качества перевозочного процесса [9, с. 155], как инструмента повышения эффективности обращения более коротких грузовых поездов [10]; в то же время установлена прямая зависимость повышения качества перевозок при развитии СИРДП от процентного содержания двухпутных перегонов [11, с. 260].

Целью данного исследования является оценка влияния СИРДП на стабильность пропуска поездопотока по однопутной линии с помощью анализа изменения технической и

участковой скоростей по мере увеличения размеров движения. Для достижения поставленной цели необходимо решить перечень задач:

- определить значимые параметры для оценки эффективности СИРДП на одном из однопутных участков Восточного полигона;
- выполнить моделирование его работы при различных способах организации и размерах движения;
- проанализировать полученные результаты для каждого прогона модели;
- выявить особенности развития СИРДП на однопутной линии с определением направления дальнейших исследований.

Материалы и методы

В рамках исследования выбрана одна из типичных однопутных линий Восточного полигона протяженностью 268 км (рис. 1).

Для анализируемой однопутной линии рассмотрены три способа организации движения поездов – с применением ПАБ, автоблокировок с «фиксированными» (ЧКАБ) и «подвижными» (АБТЦ-МШ) блок-участками (рис. 2). Для анализа устойчивости систем к увеличению размеров движения разработаны девять сценариев, отраженных в таблице.

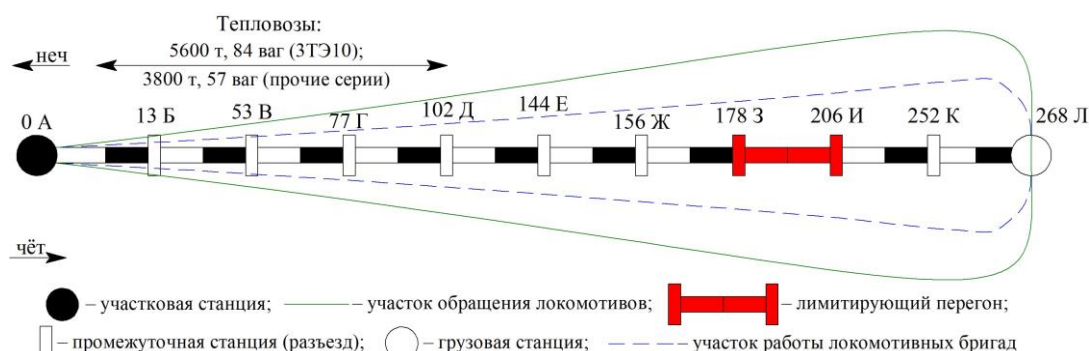


Рис. 1. Схема рассматриваемой однопутной линии

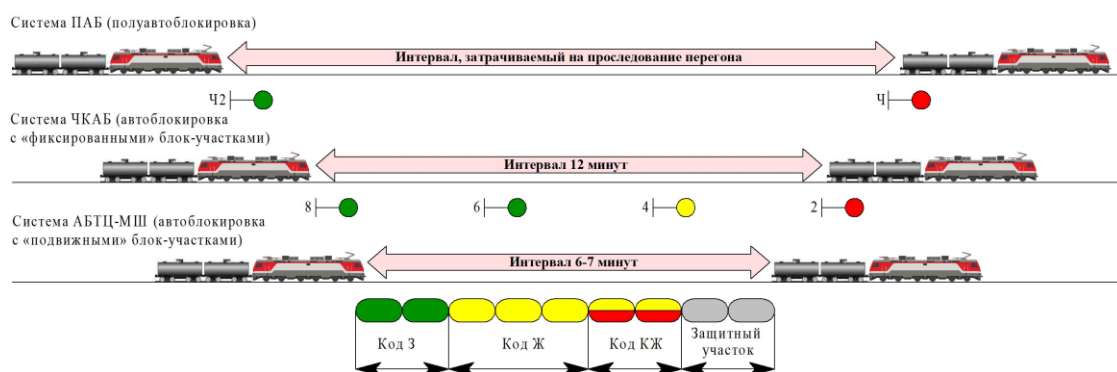


Рис. 2. Сравнение интервалов рассматриваемых систем

Описание сценариев увеличения размеров движения

Номер сценария	Количество пар поездов		Общие размеры движения, пар поездов
	пассажирских	грузовых	
1	3	10	13
2	3	13	16
3	4	16	20
4	4	18	22
5	5	21	26
6	5	23	28
7	5	26	31
8	6	29	35
9	6	32	38

Примечание. В силу очевидной нецелесообразности применения ПАБ при больших размерах движения моделирование с ее применением проводится только для сценариев 1, 2, 3.

В данном исследовании использовано имитационное моделирование (ИМ), которое в сравнении с аналитическим и графическим методами способно, во-первых, обеспечить наглядность пропуска поездов по участку, а во-вторых, за счет детализации процесса следования каждого отдельного поезда и учета взаимовлияния поездов при их пропуске по участку обеспечить более точную оценку эффективности СИРДП, следовательно, и пропускной способности в целом.

Имитационное моделирование выполнено в среде Anylogic, с помощью которой возможна детальная имитация работы железнодорожного направления при различных вариантах СИРДП [12, с. 18], но для принятия обоснованных решений по их целесообразности необходимо внедрение дополнительных модулей, что требует знания разработчиком программирования на языке Java. В авторской модели задействованы все парадигмы ИМ: процессное моделирование, агентное моделирование, системная динамика.

Выбор станции обгона в рамках процессного моделирования (рис. 3) производится посредством программного кода Java внутри блока SelectOutput, ориентированного, с одной стороны, на исключение задержек поезда более высокого приоритета из-за негативного влияния обгоняемого поезда, с другой стороны, на обеспечение минимального простоя поезда под обгоном.

Агентный подход ИМ использован для выбора режимов ведения поезда с помощью диаграмм состояний агентов FreightTrain или PassengerTrain (рис. 4). Посредством перехода, имитирующего работу непрерывной локомотивной сигнализации (АЛСН) или многозначной локомотивной сигнализации (АЛСЕН), каждым поездом осуществляется доступ к коллекции «Блок-участки» (размер которой составляет 129 ед. для ЧКАБ и 747 ед. для АБТЦ-МШ); в зависимости от состояния каждого блок-участка на пути следования (занят/свободен) для поезда устанавливается максимальная скорость движения.



Рис. 3. Процессное моделирование пропуска поездов по участку

На современном этапе имеет место тенденция к повышению точности расчета пропускной способности железнодорожных линий за счет учета разгонов и замедлений поездов [13, с. 28]. Разработанная имитационная модель отвечает современным требованиям, в ней посредством системной динамики реализованы тяговые рас-

четы (рис. 5), методом Эйлера решается основное уравнение движения поезда:

$$\frac{dv}{dt} = \xi \frac{F - B - W}{P + m},$$

где $\frac{dv}{dt}$ – производная скорости следования поезда по времени; ξ – ускорение поезда при

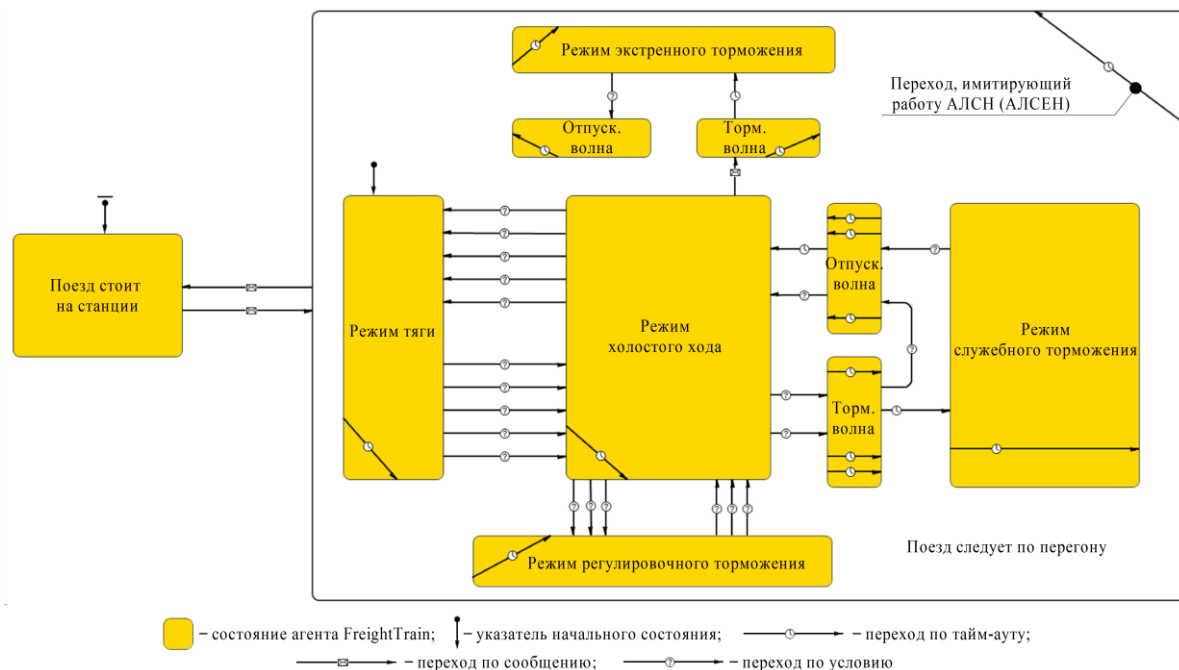


Рис. 4. Агентное моделирование на примере агента FreightTrain

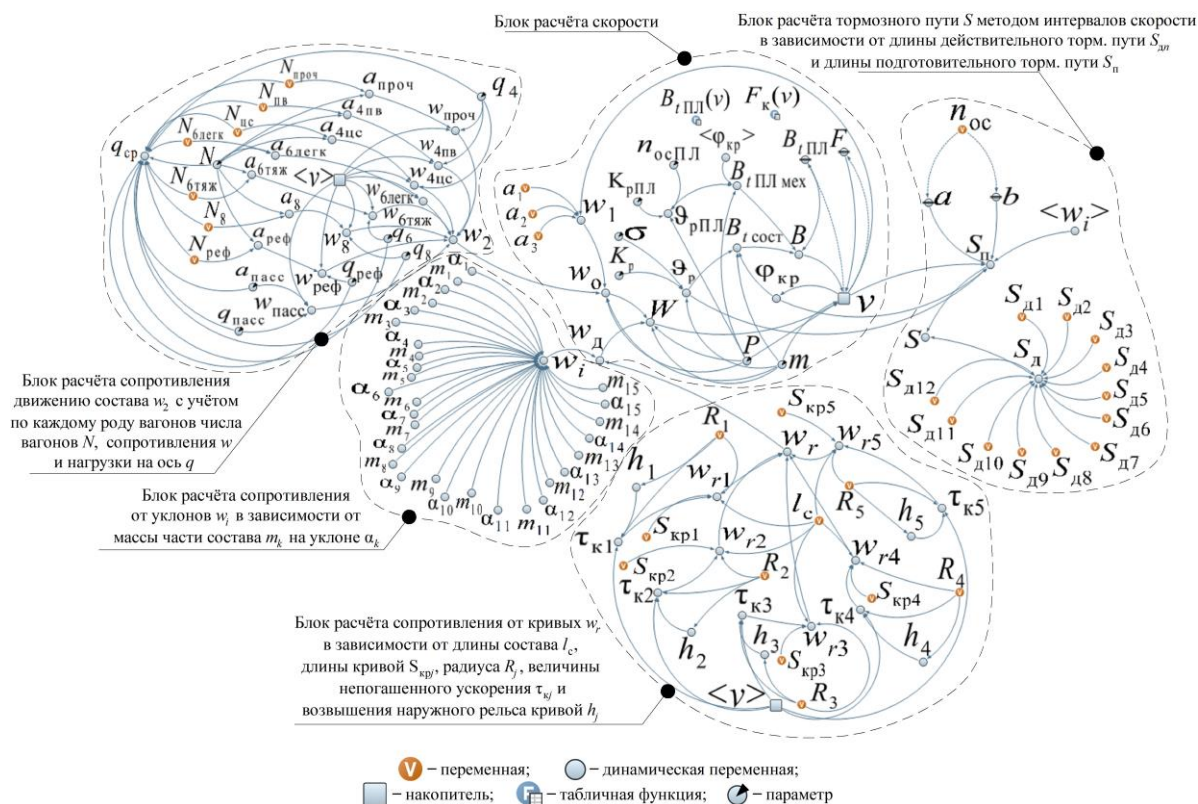


Рис. 5. Разбивка уравнения движения поезда на элементы системной динамики

действию удельной ускоряющей силы 1 Н/кН (принимается равным $0,033 \text{ км/ч}$ за 1 с); F – сила тяги локомотива, Н ; B – тормозная сила локомотива, Н ; W – сопротивление движению поезда, Н ; P – масса локомотива, т ; m – масса состава, т .

При этом благодаря системной динамике становится возможным не только достижение более реалистичной физики движения поезда, но и определение длин блок-участков с помощью блока расчета тормозного пути.

В качестве инструментов по оценке качества перевозочного процесса для каждого из сценариев задействованы скорости: участковая (как один из главных показателей, посредством оценки которого представляются возможными выявление и ликвидация узких мест при пропуске поездопотоков по участкам [14, с. 80]) и техническая (для оценки взаимовлияния поездов внутри потока).

Результаты и обсуждение

Участковая скорость грузовых поездов по результатам моделирования (рис. 6) при увеличении размеров движения в условиях эксплуатации каждой из рассмотренных систем снижается по причине увеличения простоя пакетов поездов под скрещением, однако при более совершенной СИРДП становится возможным сокращение негативного влияния от сгущения поездопотока на скорость его движения по участку.

В свою очередь, изменение технической скорости грузовых поездов (рис. 7) при аналогичной тенденции к снижению по мере нарастания размеров движения становится явным только для ЧКАБ при значительных размерах движения в связи с учащением случаев следования поездов на ограничивающий максимальную скорость желтый сигнал.

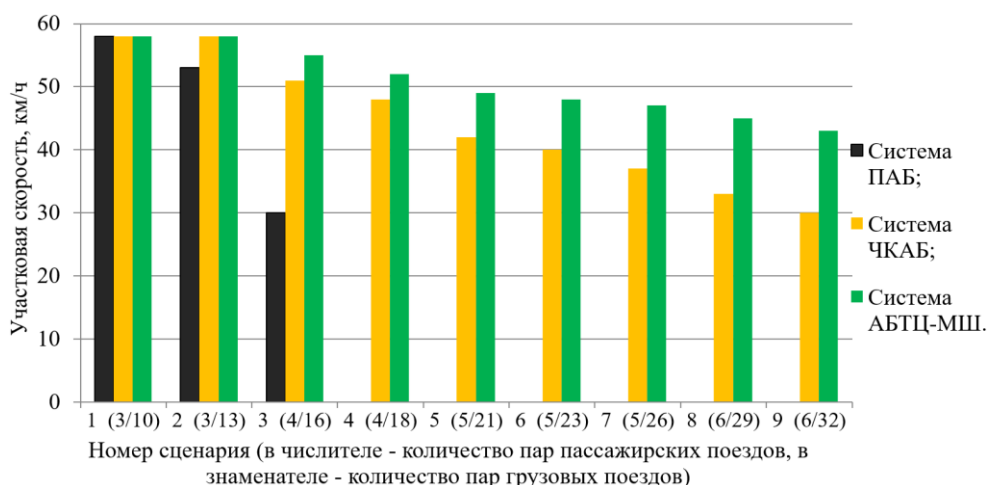


Рис. 6. Участковая скорость грузовых поездов по результатам моделирования движения при различных вариантах размеров движения и СИРДП

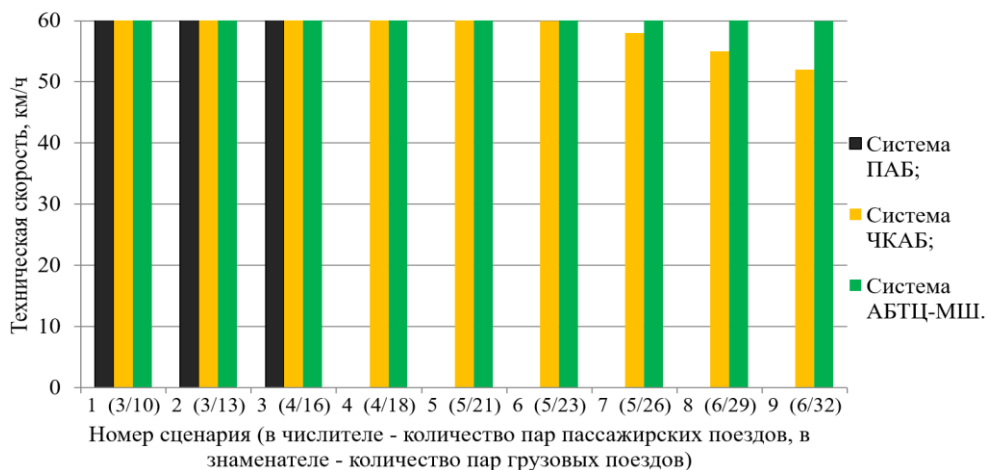


Рис. 7. Техническая скорость грузовых поездов по результатам моделирования движения при различных вариантах размеров движения и СИРДП

Другим положительным аспектом влияния АБТЦ-МШ является возможность сокращения простоя грузового поезда под обгоном пассажирским, поскольку пассажирский поезд получает возможность более близкого нахождения к грузовому поезду без снижения скорости, что является значимым фактором при смешанных перевозках (тогда как, например, для специализированных линий с параллельным графиком движения оптимальной может быть более простая СИРДП [15, с. 18] в сочетании с проектированием «регулирующих» станций, снижающих задержки под скрещиваниями поездов [16, с. 19]).

Отдельно следует отметить потенциальное повышение продолжительности технологических окон при пакетном графике движения, т. е. возможность увеличения времени для ремонта инфраструктуры. Пакетный график за счет сокращения интервала между поездами в пакете при АБТЦ-МШ наиболее эффективен, что на однопутных линиях является крайне важным аспектом.

Целесообразность развития СИРДП на отечественных однопутных линиях может быть подкреплена и экономическим фактором, так как стоимость 1 км железнодорожного пути составляет примерно 250 млн р., а электрификация 1 км пути требует около 125 млн р., тогда как затраты на внедрение 1 км автоблокировки АБТЦ составляют лишь 12 млн р.

В то же время одним из значительных препятствий по развитию СИРДП на однопутных линиях является количество (и длина) приемо-отправочных путей на промежуточных станциях (разъездах). В данном исследовании максимальная величина пакета составляла три поезда, поскольку на каждом из раздельных пунктов рассматриваемого участка имеется четыре приемо-отправочных пути.

Кроме того, необходимо учитывать, что совокупная пропускная способность направления зависит не только от конфигурации входных и выходных горловин технических станций, путевого развития станций и парков, применяемой СИРДП, но и от мощности устройств тягового энергоснабжения, что в данном исследовании проанализировано не было в силу отсутствия на рассматриваемой линии электрификации. Уплотнение поездопотока с помощью СИРДП может потребовать заметных инвестиций в улучшение данной инфраструктуры.

Полученные результаты соответствуют теории транспортных потоков, согласно которой при увеличении плотности поток транспортных единиц от агрегатного состояния синхронизации переходит в состояние широких перемещающихся пробок, а затем к старт-стоп движению. Более передовая СИРДП позволяет минимизировать ущерб от сближения поездопотоков, снизить расходы на тяговые ресурсы, сократить оборот подвижного состава и, в конечном счете, повысить качество обслуживания клиентов железнодорожного транспорта.

Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время является актуальным устранение дефицита пропускной способности направлений за счет внедрения СИРДП не только на особогрузонапряженных двухпутных линиях, но и на однопутных, на которых прогнозируется повышение размеров движения, например, по причине изменения географии перевозок.

2. Проведение ИМ на современном этапе является одним из необходимых условий для принятия решений по развитию СИРДП за счет корректной имитации взаимовлияния сгущаемого поездопотока при пропуске по участку и, как следствие, по причине более точной оценки пропускной способности.

3. По мере увеличения размеров движения на рассмотренной однопутной линии более передовая СИРДП позволяет эффективнее бороться с негативными эффектами от сгущения поездопотоков и обеспечить пропуск 38 пар поездов (из них 6 пар пассажирских и 32 пары грузовых) с участковой скоростью 43 км/ч, тем самым освоив перспективные размеры перевозок с минимальными затратами на развитие инфраструктуры.

4. Дальнейшие исследования должны быть ориентированы на моделирование взаимодействия перегонов и технических станций, а также на оценку эффективности виртуальной сцепки и СИРДП на основе виброакустического зондирования железнодорожного полотна «Анаконда» с определением баланса между размером инвестиций в системы и участковой скоростью, реализуемой при каждой из них.

Список источников

1. Осипов Н. И. К вопросу о проблемах внедрения интервального регулирования движения поездов на сети железных дорог ОАО «РЖД» // Наука и молодежь XXI века : материалы регионального форума. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2023. Т. 1. С. 220–225.
2. Бушуев С. В. Пути повышения провозной способности участков железных дорог // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8, № 4. С. 343–353. DOI 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353.
3. Фуфачева М. В., Лыткина Е. М. Оптимальные схемы путевого развития станций при реконструкции для эффективного внедрения системы интервального движения поездов // Наука и техника транспорта. 2022. № 3. С. 75–80.
4. Осипов Н. И. Имитационное моделирование движения поезда по перегону с применением тяговых расчетов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (57). С. 99–107. DOI 10.20291/2079-0392-2023-1-99-107.
5. Концепция внедрения на сети железных дорог комплексной технологии интервального регулирования движения поездов : [утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 28.09.2020 г. № 2123/р]. Москва : ОАО «РЖД», 2020. 234 с.
6. Дмитренко А. В., Пурэв Б. Порядок пропуска поездов по однопутным участкам при оборудовании ограничивающих перегонов автоблокировкой // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3 (51). С. 140–146.
7. Дмитренко А. В., Карасев С. В., Пурэв Б. Эффективность оборудования автоблокировкой перегонов в зависимости от их протяженности // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1/2. С. 146–149.
8. Корниенко Н. В., Мехедов М. И. Выбор системы интервального регулирования движения поездов в условиях возрастающих потребностей освоения прогнозируемых объемов перевозок // Вестник ВНИИЖТ. 2022. Т. 81, № 1. С. 63–70. DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70.
9. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Evans L. E. Improving Railway Operational Efficiency with Moving Blocks, Train Fleeting, and Alternative Single-Track Configurations // Transportation Research : Journal of the Transportation Research Board. 2020. Vol. 2674, Iss. 2. P. 146–157. DOI 10.1177/0361198120905842.
10. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Parkes M. M. Balancing the Service Benefits and Mainline Delay Disbenefits of Operating Shorter Freight Trains // Transportation Research : Journal of the Transportation Research Board. 2021. Vol. 2675, Iss. 10. P. 303–316. DOI 10.1177/03611981211011484.
11. Relative Capacity and Performance of Fixed- and Moving-Block Control Systems on North American Freight Railway Lines and Shared Passenger Corridors / C. T. Dick, D. Mussanov, L. E. Evans [et al.] // Transportation Research : Journal of the Transportation Research Board. 2019. Vol. 2673, Iss. 5. P. 250–261. DOI 10.1177/0361198119841852.
12. Осипов Н. И. Применение имитационного моделирования для оценки влияния величины интервала прибытия поездов на работу станций стыкования родов тягового тока // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 4 (7). С. 16–22. DOI 10.52170/2712-9195_2022_4_16.
13. Марченко М. А. Математическая модель и способ расчета пропускной способности // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, № 1. С. 28–37. DOI 10.20295/1815-588X-2023-1-28-37.
14. Мехедов М. И., Корниенко Н. В., Ададунов А. С. Зависимость участковой скорости от обеспеченности транзитных поездов локомотивами на железнодорожном участке Кошта – Бабаево // Вестник ВНИИЖТ. 2023. Т. 82, № 1. С. 80–88. DOI 10.21780/2223-9731-2023-82-1-80-88.
15. Черняк А. Р., Карасев С. В. Особенности путевого развития специализированных железнодорожных линий для обеспечения бесшовных технологий перевозки тяжеловесных грузов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 15–27.
16. Черняк А. Р., Карасев С. В. Определение количества и размещения раздельных пунктов на специализированных железнодорожных линиях по перевозке массовых грузов // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2023. № 2 (9). С. 17–24. DOI 10.52170/2712-9195_2023_2_17.

References

1. Osipov N. I. To the question about the problems of introducing interval regulation of train traffic on the railroad network of Russian Railways. *Science and Youth of the XXI century. Proceedings of the regional forum*. Novosibirsk: Publishing house of Siberian Transport University; 2023. Issue 1. P. 220–225. (In Russ.).
2. Bushuyev S. V. Ways to increase the carrying capacity of railway sections. *Automation on Transport*. 2022;8(4):343–353. (In Russ.). DOI 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353.
3. Fufacheva M. V., Lytkina E. M. Optimal schemes of track development of stations during reconstruction for effective implementation of the system of interval train traffic. *Science and Technology in Transport*. 2022;(3):75–80. (In Russ.).

4. Osipov N. I. Simulation of train movement along the running line using traction calculations. *Bulletin of the Ural State University of Railway Transport*. 2023;(57):99–107. (In Russ.). DOI 10.20291/2079-0392-2023-1-99-107.
5. Concept implementation on the railroad network of integrated technology interval control of train traffic: approved by order of Russian Railways No. 2123/r dated September 28, 2020. Moscow: Russian Railways; 2020. 234 p. (In Russ.).
6. Dmitrenko A. V., Purev B. Train handling through a single-track railway section when a limiting running line is equipped with the automatic block system. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2016;(51):140–146. (In Russ.).
7. Dmitrenko A. V., Karasev S. V., Purev B. Efficiency of the equipment of railway lines with automatic blocking depending on the length of stages. *Scientific Problems of Transport of Siberia and the Far East*. 2014;(1/2):146–149. (In Russ.).
8. Kornienko N. V., Mekhedov M. I. Choice of the interval traffic control system in terms of increasing demands for the coverage of forecast traffic volumes. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):63–70. (In Russ.). DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70.
9. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Evans L. E. Improving Railway Operational Efficiency with Moving Blocks, Train Fleeting, and Alternative Single-Track Configurations. *Transportation Research: Journal of the Transportation Research Board*. 2020;2674(2):146–157. DOI 10.1177/0361198120905842.
10. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Parkes M. M. Balancing the Service Benefits and Mainline Delay Disbenefits of Operating Shorter Freight Trains. *Transportation Research: Journal of the Transportation Research Board*. 2021;2675(10):303–316. DOI 10.1177/03611981211011484.
11. Dick C. T., Mussanov D., Evans L. E. [et al.]. Relative Capacity and Performance of Fixed- and Moving-Block Control Systems on North American Freight Railway Lines and Shared Passenger Corridors. *Transportation Research: Journal of the Transportation Research Board*. 2019;2673(5):250–261. DOI 10.1177/0361198119841852.
12. Osipov N. I. Simulation modeling application for assessing the influence of trains arrival interval value on the traction current docking stations operation. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2022;(7):16–22. (In Russ.). DOI 10.52170/2712-9195_2022_4_16.
13. Marchenko M. A. Mathematical model and approach to calculate throughput. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2023;20(1):28–37. (In Russ.). DOI 10.20295/1815-588X-2023-1-28-37.
14. Mekhedov M. I., Kornienko N. V., Adadurov A. S. Dependence of the service speed on the provision of transit trains with locomotives on the Koshta – Babaevo railway section. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(1):80–88. (In Russ.). DOI 10.21780/2223-9731-2023-82-1-80-88.
15. Chernyak A. R., Karasev S. V. Features of specialized railway lines track development to ensure seamless technologies for the heavy cargo transportation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):15–27. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_15.
16. Chernyak A. R., Karasev S. V. Determination number and location of operation points on specialized railway lines for transportation mass freight. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2023;(9):17–24. (In Russ.). DOI 10.52170/2712-9195_2023_2_17.

Информация об авторах

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

Н. И. Осипов – аспирант, преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

Information about the authors

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

N. I. Osipov – Postgraduate, Lecturer of Operation Management Department, Siberian Transport University.

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

Статья поступила в редакцию 04.10.2023; одобрена после рецензирования 17.10.2023; принята к публикации 20.10.2023.

The article was submitted 04.10.2023; approved after reviewing 17.10.2023; accepted for publication 20.10.2023.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 658.51
doi 10.52170/1815-9265_2023_67_30

Внедрение нормативов организации процесса очистки путей от снега на основе автоматизированного мониторинга с учетом длины очищенных путей

Андрей Дмитриевич Абрамов¹, Алексей Леонидович Манаков²,
Михаил Андреевич Семенов³✉

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

¹ abramov@stu.ru

² manakov005@mail.ru

³ MikeSemenov13111996@yandex.ru ✉

Аннотация. Оперативная очистка путей от снега является гарантией бесперебойной и безопасной работы железнодорожного транспорта и соблюдения сроков доставки грузов в зимнее время. В соответствии со стратегиями развития и Долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» на период до 2030 г. предусмотрено формирование новой нормативной и технической документации, которая должна обеспечить повышение безопасности железнодорожного транспорта, надежности сложных технических систем и эффективности операционной деятельности. Но в утвержденном и введенном в действие распоряжении № 1733/р с приложением новой редакции Инструкции по подготовке к работе в зимний период и организации снегоборьбы на железных дорогах, в других филиалах и структурных подразделениях ОАО «РЖД», а также его дочерних обществах не предусматривается оптимизация расходов, в частности на процесс уборки снега с путей и повышение производительности труда; совершенствование технологии и внедрение инноваций, в том числе за счет совершенствования нормативов в рамках внедрения новых технических средств и оборудования, ресурсосберегающих технологий, что и обусловило выбор темы данного исследования.

Цель исследования – выявление причин неэффективной организации работы снегоуборочных машин, влекущей длительное занятие ими станционных путей и, как следствие, снижение производительности труда, а также значительное превышение списочного состава техники и бригад над технически необходимым. Внедрение новых нормативов организации процесса очистки путей от снега на основе автоматизированного мониторинга и длины очищенных путей позволит решить данные проблемы.

Предметом исследования выступает обоснование эффективной организации работы снегоуборочных машин типа СМ и ПСС средствами автоматизированного мониторинга и математической модели с учетом природно-климатических условий Западно-Сибирской железной дороги.

Объем убранного снега и время работы снегоуборочной машины в рабочем режиме являются изменяющимися величинами, на которые оказывают влияние множество других факторов, слабо поддающихся планированию, поэтому целесообразно не использовать эти данные для сравнительной характеристики и статистического анализа. В качестве сравнительного показателя, на который внешние факторы оказывают не столь существенное влияние, мы предлагаем использовать длину очищенных от снега путей.

Разработано математическое обоснование зависимости между длиной очищенных от снега путей и объемом убранного снега, временем рабочего цикла, количеством выпавшего снега, температурой окружающего воздуха посредством множественной регрессии.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке предложения по реформированию системы принятия плановых решений и контроля эффективности работ по уборке снега посредством автоматизированного мониторинга системой АС КРСПС. Практическая значимость исследования состоит в обосновании перехода нормативов работы снегоуборочных машин типа СМ и ПСС от выгрузок к длине убранных от снега путей и оценке реальной эффективности эксплуатации снегоуборочных машин посредством автоматизированного мониторинга.

Ключевые слова: снегоуборочные машины, автоматизированный мониторинг, математическая модель, оптимизация, новый норматив

Для цитирования: Абрамов А. Д., Манаков А. Л., Семенов М. А. Внедрение нормативов организации процесса очистки путей от снега на основе автоматизированного мониторинга с учетом длины очищенных путей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 30–39. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_30.

Implementation of standards for organizing the process of clearing tracks from snow based on automated monitoring, taking into account the length of cleared tracks

Andrey D. Abramov¹, Alexey L. Manakov², Mikhail A. Semenov³✉

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

¹ abramov@stu.ru

² manakov005@mail.ru

³ MikeSemenov13111996@yandex.ru✉

Abstract. Prompt clearing of snow from tracks is a guarantee of uninterrupted and safe operation of railway transport and meeting deadlines for cargo delivery in winter. In accordance with the Development Strategies and the long-term development program of Russian Railways for the period until 2030, the formation of new regulatory and technical documentation is provided, which should ensure an increase in: the safety of railway transport, the reliability of complex technical systems and the efficiency of operating activities. But in the approved and put into effect order No. 1733/r with the attachment of a new edition of the Instructions for preparing for work in winter and organizing snow control on railways, in other branches and structural divisions of Russian Railways, as well as its subsidiaries, the opposite is not provided optimization of costs, specifically for the process of removing snow from tracks, and increasing labour productivity; there is no provision for improving technology and introducing innovations, including through improving standards as part of the introduction of new technical means and equipment, the introduction of resource-saving technologies – this determined the choice of the topic of this study.

Purpose of the study: to identify the reasons for the ineffective organization of the snow removal machines work, which entails their long-term occupation of station tracks and, as a consequence, a decrease in labour productivity, as well as a significant excess of the list of equipment and crews over what is technically necessary. The introduction of new standards for organizing the process of clearing tracks from snow based on automated monitoring and the length of cleared tracks will solve these problems.

The subject of the research is the substantiation of effective organization of snow removal machines of the SM and PSS types using automated monitoring and a mathematical model, taking into account the natural and climatic conditions of the West Siberian Railway.

The volume of snow removed and the operating time of the snowplow in operating mode are variable values that are influenced by many other factors that are difficult to plan, so it is advisable not to use these data for comparative characteristics and statistical analysis. As a comparative indicator, which is not significantly influenced by external factors, we propose to use the length of tracks cleared of snow.

We will develop a mathematical justification for the relationship between the length of tracks cleared of snow and the volume of snow removed, work cycle time, amount of snow fallen, and ambient temperature using multiple regression.

The theoretical significance of the work lies in the development of a proposal on reforming the system for making planning decisions and monitoring the effectiveness of snow removal work through automated monitoring by the AS KRSPS system. The practical significance of the study is to substantiate the transition of operating standards for snow removal machines of the SM and PSS types from unloading to the length of tracks cleared of snow and to assess the real operating efficiency of snow removal machines through automated monitoring.

Keywords: snow removal machines, automated monitoring, mathematical model, optimization, new standard

For citation: Abramov A. D., Manakov A. L., Semenov M. A. Implementation of standards for organizing the process of clearing tracks from snow based on automated monitoring, taking into account the length of cleared tracks. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):30–39. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_30.

Введение

Оперативная очистка путей от снега является гарантией бесперебойной и безопасной работы железнодорожного транспорта и соблюдения сроков перевозок в зимнее время. В соответствии с Транспортной стратегией, Стратегией развития железнодорожного транспорта, Стратегией развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2030 года и Долгосрочной программой развития ОАО «РЖД»

предусмотрено формирование новой нормативной и технической документации, которая должна обеспечить повышение безопасности железнодорожного транспорта, надежности сложных технических систем и эффективности операционной деятельности.

Результатами внедрения новой базы должны стать: оптимизация расходов на содержание объектов железнодорожного транспорта; повышение производительности труда;

изменения в действующих нормах и нормативах с учетом использования технических средств и технологий в перевозочном процессе и при проведении ремонтно-путевых работ; совершенствование технологий и внедрение инноваций, в том числе за счет совершенствования нормативов в рамках использования новых технических средств и оборудования, совершенствования технологии перевозок, применения ресурсосберегающих технологий, повышения эффективности малоинтенсивных линий и оптимизации сети железных дорог.

Для достижения указанных целей предусмотрено внесение изменений в нормативные акты Министерства транспорта Российской Федерации и ОАО «Российские железные дороги» [1].

Кроме этого, в Стратегии научно-технологического и инновационного развития холдинга «РЖД» обозначены приоритетные задачи, среди них кратное повышение производительности труда и энергоэффективности, а также переход к ресурсосберегающей энергетике; создание систем обработки больших объемов данных и электронного ведения технической документации; переход к цифровым, аппаратно-программным производственным технологиям [2].

Внедрение автоматизированного мониторинга в организацию производства и рабочий процесс, в том числе в процесс очистки путей от снега, должно выявить источники и основания для экономии средств и ресурсов, а также для оптимизации этих процессов.

Материалы и методы исследования

Западно-Сибирская железная дорога (ЗСЖД) является одним из 16 филиалов ОАО «Российские железные дороги», разделенных по территориальному признаку с запада на восток, и включает в себя участок Транссибирской магистрали [3].

Развернутая длина главных путей ЗСЖД составляет более 9 000 км, а эксплуатационная – 5 676 км. На долю магистрали приходится 20 % всей погрузки российских железных дорог.

Западно-Сибирская железная дорога имеет самую высокую грузонапряженность в сети – более 35 млн т-км, что вдвое выше среднесетевой. Отдельные участки имеют грузо-

напряженность 100 и более млн т-км [4], поэтому важно увеличить пропускные способности дороги в связи со сложившейся политико-экономической ситуацией и перенаправлением товарных потоков с запада на восток.

Важное значение для улучшения показателей хозяйственной деятельности дороги может иметь и пересмотр нормативов на осуществление работ по очистке путей от снега. На перевозки по Западно-Сибирской железной дороге в зимнее время большое влияние оказывают природно-климатические условия: рельеф местности, природные зоны, время установления снежного покрова, продолжительность зимнего периода, температура окружающей среды, интенсивность осадков и т. п.

ЗСЖД пролегает по территории Омской, Новосибирской, Кемеровской, Томской областей, Алтайского края Российской Федерации, частично по территории Павлодарской области Республики Казахстан, относящимся к третьей умеренной климатической зоне (рисунок).

В классификации по высоте снежного покрова на территории России Западно-Сибирская железная дорога относится к третьей группе районов. Эта группа включает в себя умеренно снежные районы с высотой снежного покрова 50...70 см, характеризуется залеганием устойчивого снежного покрова от 140...160 дней на западе и юге до 240...260 дней на севере и востоке.

Рассмотрим природно-климатические условия дороги.

Западный участок (Омск – Новосибирск) самый напряженный по интенсивности, также один из самых скоростных участков дороги, так как проложен по южной степной части Омской области. Зима чаще всего суровая, морозы до $-35...-40^{\circ}\text{C}$ с незначительным неравномерным снежным покровом в 25...30 см, плохо укрывающим почву и подвергающимся сдуванию ветрами.

Рельеф Новосибирской области в основном равнинный. Территория области располагается в трех природных зонах: степной, лесостепной и лесной. Транссибирская магистраль проходит на западе по степи и лесостепи, а на востоке области – по лесной зоне.

Климат Новосибирской области характеризуется зимой, продолжающейся с первых



Фрагмент карты природных зон Западно-Сибирской железной дороги [5]

чисел ноября и до конца марта, с сухой и морозной погодой. Устойчивый снежный покров высотой до 10 см образуется уже в начале ноября. В марте максимальная высота снежного покрова в центральных лесных районах области составляет до 70 см, а в степной южной зоне – не выше 30 см.

Территория Алтайского края находится как на Западно-Сибирской равнине, так и территории Саян. Горная часть охватывает равнину с восточной и южной сторон, а западная и центральная части имеют преимущественно равнинный характер.

Снежный покров устанавливается в основном во второй декаде ноября, разрушается в первой декаде апреля. Высота снежного покрова в среднем 40...60 см, а в западных районах – до 20...30 см.

Кемеровская область расположена на стыке Западно-Сибирской равнины и гор Южной Сибири. Для запада области характерна лесостепная зона, а к востоку она переходит в зону подтайги. Осадков выпадает в среднем 300...500 мм в год, в горной части – до 900 мм.

Проанализировав характеристику природно-климатических условий ЗСЖД, мы видим, что в состав дороги входят регионы с разной обстановкой, складывающейся при очистке путей от снега. Соответственно, и подход, и организация работ, и используемая техника по уборке снега с путей должны быть разными.

Результаты исследования

Ранее [6, 7] указывалось на то, что распоряжение ОАО «РЖД» от 22.10.2013 № 2243р, а теперь и распоряжение ОАО «РЖД» от 01.07.2022

№ 1733/р регламентируют количество рейсов на выгрузку и объем убранного снега за один рейс, в то время как показатель объема убранного снега слабо поддается планированию, а нормативы выработки, основанные на количестве рейсов выгрузок, приводят к отсутствию у работников мотивации к уборке максимального количества путей за смену и увеличению периодов между техническими обслуживаниями ввиду приписок объема убранного снега. Поэтому необходимо применение другого показателя. В качестве такого показателя предложено использовать длину очищенных от снега путей, так как связь между длиной очищенных путей и временем работы машины является доказанной. Объем убранного снега должен стать косвенной величиной, характеризующей обоснованность/необоснованность применения техники.

По результатам проведенного исследования [7, 8] рекомендовалось перейти от объемов убранного снега к длине убранных от снега путей. Теоретическая эффективность данного перехода была доказана на примере Новосибирской механизированной дистанции инфраструктуры (ПЧМ Новосибирск), которая обслуживает Новосибирский регион, для чего была разработана математическая модель:

$$L_{\text{год}} = 276\,110 + 9,81V_c + 452,66t_{\text{р.р}} - 9\,001\,365,32h, \quad (1)$$

где $L_{\text{год}}$ – длина очищаемых путей (расчетная), м; V_c – объем убранного снега, м³; $t_{\text{р.р}}$ – время работы машины, ч; h – среднее количество осадков, м.

Проверим эффективность использования снегоуборочных машин на всей Западно-Си-

бирской железной дороге, основываясь на данных АС КРСПС [9] по снегоуборочным машинам приписки ПЧМ Омск, ПЧМ Новосибирск, ПЧМ Топки, ПЧМ Алтай за период 2019–2023 гг. с использованием ранее разработанной математической модели для ПЧМ Новосибирск (1) (табл. 1).

Проанализировав данные табл. 1, можно сделать вывод, что математическая модель, разработанная на основании данных ПЧМ Новосибирск за 2019–2021 гг., подтверждает свою эффективность и при анализе уборки снега зимой 2021/22 г. с относительной погрешностью

не более 10 %. Но экстраполяция данной математической модели на предприятия Западно-Сибирской железной дороги дает бóльшую погрешность, чем по отдельному предприятию, например: в среднем относительная погрешность для ПЧМ Омск составляет 155,6 % на одну машину, а для ПЧМ Алтай – 25,6 %. Разница более чем в 18 и 3 раза для предприятий одного и того же филиала дороги объясняется природно-климатическими особенностями и уровнем выпадения осадков.

Для возможности применения норматива очистки путей от снега снегоуборочными ма-

Таблица 1

Анализ эффективности использования снегоуборочных машин на Западно-Сибирской железной дороге на основании модели (1)

СМ	Зимний период, год	Длина очищаемых путей L , м	Объем убранного снега V_c , м ³	Время работы машины $t_{р.р.}$, ч	Среднее количество осадков h , м	Длина очищаемых путей (расчетная) $L_{год}$, м	Относительная погрешность, %
<i>ПЧМ Топки</i>							
1174	2019/20	557 420	19 926,0	296,5	0,015	470 777	16
	2020/21	1 614 029	144 853,0	906,3	0,037	1 774 313	10
	2021/22	831 394	14 507,3	410,4	0,007	541 189	35
	2022/23	828 697	14 784,4	448,4	0,007	561 108	32
1410	2019/20	510 009	7 637,3	367,3	0,006	463 286	9
	2020/21	341 420	12 813,2	196,1	0,015	355 554	4
	2021/22	543 205	20 701,0	223,2	0,016	436 199	20
	2022/23	481 567	15 919,7	194,0	0,013	403 081	16
1880	2019/20	403 560	56 604,7	368,5	0,057	485 129	20
	2020/21	491 915	40 971,1	298,5	0,034	507 109	3
	2021/22	410 395	25 051,9	248,2	0,025	409 185	0,3
	2022/23	429 398	15 538,7	190,0	0,014	388 531	9,6
Средняя относительная погрешность предприятия на одну машину							14,6
<i>ПЧМ Новосибирск</i>							
1026	2019/20	420 218	14 383,0	296,4	0,014	425 357	1,2
	2020/21	577 408	31 044,9	303,5	0,022	520 013	10
	2021/22	392 209	22 149,4	211,3	0,023	382 011	3
	2022/23	320 958	20 639,7	193,0	0,026	331 913	3
1608	2019/20	520 151	48 282,1	384,0	0,038	581 527	12
	2020/21	327 441	43 860,0	228,5	0,055	314 734	4
	2021/22	359 644	42 076,0	242,5	0,048	366 580	2
	2022/23	317 986	50 796,5	330,6	0,065	338 984	7
1801	2019/20	461 514	18 010,2	348,0	0,016	466 294	1
	2020/21	521 967	35 811,6	399,3	0,028	556 131	7
	2021/22	396 624	15 437,4	330,5	0,016	433 133	9
	2022/23	399 920	18 052,5	340,3	0,018	445 220	11
1810	2019/20	123 378	13 014,3	97,1	0,043	60 675	51
	2020/21	513 837	54 228,0	323,0	0,043	567 237	10
	2021/22	430 503	33 492,0	210,1	0,032	411 727	4
	2022/23	192 836	14 559,9	138,3	0,031	202 503	5
1862	2019/20	628 770	22 574,5	376,1	0,015	532 791	15
	2020/21	334 870	24 500,8	193,1	0,030	333 831	0,3
	2021/22	463 104	38 871,1	340,6	0,034	505 565	9
	2022/23	403 949	24 836,5	231,1	0,025	399 332	1
Средняя относительная погрешность предприятия на одну машину							8,3

Окончание табл. 1

СМ	Зимний период, год	Длина очищаемых путей L , м	Объем убранного снега V_c , м ³	Время работы машины $t_{р.р.}$, ч	Среднее количество осадков h , м	Длина очищаемых путей (расчетная) $L_{год}$, м	Относительная погрешность, %
<i>ПЧМ Омск</i>							
1368	2019/20	273 817	10 277,3	129,0	0,015	300 303	1
	2020/21	127 639	788,5	46,4	0,003	277 845	118
	2021/22	286 092	2 023,5	99,2	0,003	313 860	10
	2022/23	188 609	4 440,6	62,5	0,010	257 950	37
1481	2019/20	148 736	2 649,4	61,5	0,007	266 930	80
	2020/21	88 114	1 173,1	175,3	0,005	321 963	265
	2021/22	63 285	898,1	76,5	0,006	265 541	319
	2022/23	702 644	4 653,2	450,3	0,003	498 587	29
1561	2019/20	104 117	1 750,0	95,0	0,007	273 271	162
	2020/21	47 067	863,3	21,5	0,007	231 302	392
	2021/22	19 559	207,0	12,0	0,004	247 567	1 165
	2022/23	26 660	301,9	14,5	0,005	240 628	803
1585	2019/20	362 125	3186,1	126,2	0,004	328 486	10
	2020/21	215 351	2 943,7	94,4	0,006	293 711	37
	2021/22	162 569	1 484,0	55,2	0,004	279 649	72
	2022/23	202 870	1 767,2	73,5	0,008	254 706	26
1652	2019/20	298 723	8 278,9	107,2	0,011	306 836	3
	2020/21	296 308	12 835,8	114,2	0,018	291 698	2
	2021/22	317 580	7 617,3	105,0	0,010	308 351	3
	2022/23	369 307	12 672,3	126,1	0,014	331 487	11
1843	2019/20	200 209	2 718,7	116,0	0,006	301 281	50
	2020/21	144 040	1 677,9	75,1	0,005	281 558	95
	2021/22	385 129	12 424,1	234,6	0,013	387 167	0,5
	2022/23	140 060	1 936,3	75,2	0,014	203 126	45
Средняя относительная погрешность предприятия на одну машину							155,6
<i>ПЧМ Алтай</i>							
1053	2019/20	402 431	36 652,3	378,0	0,037	473 724	18
	2020/21	308 352	13 889,8	681,4	0,018	558 787	81
	2021/22	1 342 347	19 810,4	764,0	0,006	762 274	43
	2022/23	934 333	13 611,0	558,1	0,006	608 255	35
1095	2019/20	446 798	19 184,7	191,5	0,018	388 971	13
	2020/21	186 923	5 557,7	71,1	0,012	254 799	37
	2021/22	217 184	5 461,4	80,2	0,010	275 976	27
	2022/23	262 299	6 681,6	86,3	0,010	290 707	11
1143	2019/20	451 449	5 792,6	287,2	0,005	417 933	7
	2020/21	421 602	11 627,6	200,5	0,011	381 920	10
	2021/22	296 724	5 205,0	139,2	0,007	327 172	10
	2022/23	276 235	6 005,7	140,4	0,009	317 567	15
Средняя относительная погрешность предприятия на одну машину							25,6

шинами, основанного на длине убранных путей, для всех предприятий ЗСЖД откорректируем разработанную ранее математическую модель с учетом данных всех предприятий дороги за анализируемый период. Математическая модель примет вид

$$L_{год} = 165\,382,7 + 6,01V_c + 1\,052,1t_{р.р.} - 7\,427\,707,94h. \quad (2)$$

Отредактированная математическая модель снизила относительную погрешность фактических данных по отношению к расчетным, но она не достигла необходимого значения – 15 % (табл. 2). Три предприятия: ПЧМ Топки, ПЧМ Новосибирск и ПЧМ Алтай – дают в среднем погрешность порядка 15 %, а ПЧМ Омск – в 6 раз больше. При сравнении природно-климатических условий предприятий и наработки ма-

шин становится понятно, почему математическая модель дает большую погрешность для ПЧМ Омск. Предприятие обслуживает дорогу, проложенную на равнинном участке степи, что способствует сдуванию снега с путей при незначительном неравномерном снежном покрове. В то же время предприятие имеет количество машин, сопоставимое с другими предприятиями ЗСЖД. Два этих факта свидетельствуют о том, что снегоуборочные машины типа СМ на данном предприятии используются не обоснованно, поэтому целесообразно исключить предприятие ПЧМ Омск из дальнейшего учета.

Согласно новой модели, основанной на показателях работы предприятий, задействующих снегоуборочные машины типа СМ и ПСС, со схожими природно-климатическими условиями погрешность в среднем составляет 15 %.

Из вышеприведенного анализа становится понятно, что нормативы работы снегоуборочных машин типа СМ и ПСС должны учитывать природно-климатические условия, в которых работает данная техника, тогда это позволит действительно оценивать эффективность их работы.

Таблица 2

Анализ эффективности использования снегоуборочных машин на Западно-Сибирской железной дороге на основании модели (2)

СМ	Зимний период, год	Длина очищаемых путей L , м	Объем убранного снега V_c , м ³	Время работы машины $t_{р.р.}$, ч	Среднее количество осадков h , м	Длина очищаемых путей (расчетная) $L_{год}$, м	Относительная погрешность, %
<i>ПЧМ Томки</i>							
1174	2019/20	557 420	19 926,0	296,5	0,015	485 641	13
	2020/21	1 614 029	144 853,0	906,3	0,037	1 714 437	6
	2021/22	831 394	14 507,3	410,4	0,007	632 338	24
	2022/23	828 697	14 784,4	448,4	0,007	673 983	19
1410	2019/20	510 009	7 637,3	367,3	0,006	553 141	9
	2020/21	341 420	12 813,2	196,1	0,015	337 273	1,2
	2021/22	543 205	20 701,0	223,2	0,016	405 752	25
	2022/23	481 567	15 919,7	194,0	0,013	368 585	24
1880	2019/20	403 560	56 604,7	368,5	0,057	469 816	16
	2020/21	491 915	40 971,1	298,5	0,034	473 071	4
	2021/22	410 395	25 051,9	248,2	0,025	391 348	5
	2022/23	429 398	15 538,7	190,0	0,014	354 659	17
Средняя относительная погрешность предприятия на одну машину							13,6
<i>ПЧМ Новосибирск</i>							
1026	2019/20	420 218	14 383,0	296,4	0,014	459 658	9
	2020/21	577 408	31 044,9	303,5	0,022	507 821	12
	2021/22	392 209	22 149,4	211,3	0,023	349 941	11
	2022/23	320 958	20 639,7	193,0	0,026	299 333	7
1608	2019/20	520 151	48 282,1	384,0	0,038	577 243	11
	2020/21	327 441	43 860,0	228,5	0,055	260 800	20
	2021/22	359 644	42 076,0	242,5	0,048	316 804	12
	2022/23	317 986	50 796,5	330,6	0,065	335 621	6
1801	2019/20	461 514	18 010,2	348,0	0,016	520 885	13
	2020/21	521 967	35 811,6	399,3	0,028	592 687	14
	2021/22	396 624	15 437,4	330,5	0,016	487 015	23
	2022/23	399 920	18 052,5	340,3	0,018	498 183	25
1810	2019/20	123 378	13 014,3	97,1	0,043	26 348	79
	2020/21	513 837	54 228,0	323,0	0,043	511 653	0,4
	2021/22	430 503	33 492,0	210,1	0,032	349 982	19
	2022/23	192 836	14 559,9	138,3	0,031	168 113	13
1862	2019/20	628 770	22 574,5	376,1	0,015	585 302	7
	2020/21	334 870	24 500,8	193,1	0,030	292 927	13
	2021/22	463 104	38 871,1	340,6	0,034	504 746	9
	2022/23	403 949	24 836,5	231,1	0,025	372 062	8
Средняя относительная погрешность предприятия на одну машину							15,6

СМ	Зимний период, год	Длина очищаемых путей L , м	Объем убранного снега V_c , м ³	Время работы машины $t_{р.р.}$, ч	Среднее количество осадков h , м	Длина очищаемых путей (расчетная) $L_{год}$, м	Относительная погрешность, %
<i>ПЧМ Омск</i>							
1368	2019/20	273 817	10 277,3	129,0	0,015	251 440	8
	2020/21	127 639	788,5	46,4	0,003	196 655	54
	2021/22	286 092	2 023,5	99,2	0,003	259 626	9
	2022/23	188 609	4 440,6	62,5	0,010	183 544	3
1481	2019/20	148 736	2 649,4	61,5	0,007	194 012	30
	2020/21	88 114	1 173,1	175,3	0,005	319 726	263
	2021/22	63 285	898,1	76,5	0,006	206 698	227
	2022/23	702 644	4 653,2	450,3	0,003	644 818	8
1561	2019/20	104 117	1 750,0	95,0	0,007	223 853	115
	2020/21	47 067	863,3	21,5	0,007	141 196	200
	2021/22	19 559	207,0	12,0	0,004	149 541	665
	2022/23	26 660	301,9	14,5	0,005	145 314	445
1585	2019/20	362 125	3186,1	126,2	0,004	287 591	21
	2020/21	215 351	2 943,7	94,4	0,006	237 822	10
	2021/22	162 569	1 484,0	55,2	0,004	202 664	25
	2022/23	202 870	1 767,2	73,5	0,008	193 909	4
1652	2019/20	298 723	8 278,9	107,2	0,011	246 207	18
	2020/21	296 308	12 835,8	114,2	0,018	228 959	23
	2021/22	317 580	7 617,3	105,0	0,010	247 345	22
	2022/23	369 307	12 672,3	126,1	0,014	270 207	27
1843	2019/20	200 209	2 718,7	116,0	0,006	259 195	29
	2020/21	144 040	1 677,9	75,1	0,005	217 339	51
	2021/22	385 129	12 424,1	234,6	0,013	390 296	1,3
	2022/23	140 060	1 936,3	75,2	0,014	152 147	9
Средняя относительная погрешность предприятия на одну машину							94,5
<i>ПЧМ Алтай</i>							
1053	2019/20	402 431	36 652,3	378,0	0,037	508 479	26
	2020/21	308 352	13 889,8	681,4	0,018	832 042	70
	2021/22	1 342 347	19 810,4	764,0	0,006	1 043 652	22
	2022/23	934 333	13 611,0	558,1	0,006	789 775	15
1095	2019/20	446 798	19 184,7	191,5	0,018	348 434	22
	2020/21	186 923	5 557,7	71,1	0,012	184 448	1,3
	2021/22	217 184	5 461,4	80,2	0,010	208 299	4
	2022/23	262 299	6 681,6	86,3	0,010	222 049	15
1143	2019/20	451 449	5 792,6	287,2	0,005	465 212	3
	2020/21	421 602	11 627,6	200,5	0,011	364 489	14
	2021/22	296 724	5 205,0	139,2	0,007	291 116	2
	2022/23	276 235	6 005,7	140,4	0,009	282 334	2
Средняя относительная погрешность предприятия на одну машину							16,4

1 июля 2022 г. утверждено и введено в действие распоряжение № 1733/р с приложением новой редакции Инструкции по подготовке к работе в зимний период и организации снегоборьбы на железных дорогах, в других филиалах и структурных подразделениях ОАО «РЖД», а также его дочерних обществах [10]. При анализе новой Инструкции выявлен ряд существенных сокращений и изменений по сравнению с ранее действующими инструкциями [11, 12]:

1. Убрана классификация видов метеорологических явлений с их характеристикой и описанием степени влияния на работу железных дорог и меры снегоборьбы.

В принятой Инструкции руководители подразделений ОАО «РЖД» и дочерних обществ сами должны определять категорию опасности явления и обеспечивать выполнение мероприятий при наступлении или прогнозировании опасных гидрометеорологических явлений в со-

ответствии с Регламентом процесса действий работников ОАО «РЖД» при прогнозировании опасных гидрометеорологических явлений, утвержденным распоряжением ОАО «РЖД» от 9 августа 2022 г. № 2046/р.

2. Отсутствует методика расчета потребности в снегоуборочных поездах на железной дороге. Предлагаемая ранее формула была несовершенна, но позволяла примерно рассчитать потребное количество необходимой снегоуборочной техники на сезон в зависимости от станции.

3. Исключен алгоритм определения времени, необходимого для уборки снега в целом на станции и по паркам, и количества рейсов имеющихся снегоуборочных поездов. Ранее время и количество рейсов рассчитывалось с учетом объема выпавшего снега и его качества.

4. В новой Инструкции по снегоборьбе оставили нормированную выгрузку снега снегоуборочной машиной, без учета особенностей регионов по метеоусловиям.

Новая Инструкция по подготовке к работе в зимний период и организации снегоборьбы на железных дорогах перестала иметь разделы, на которые ранее руководители могли ссылаться в своей работе и принимать квалифицированные и обоснованные решения по очистке путей от снега, в настоящее время груз принятых решений ложится только на руководителей на местах, что может негативно отразиться на работе станций в зимний период.

Выводы

Пропускная способность Западно-Сибирской железной дороги не бесконечна; учитывая, что за последние годы произошло перенаправление потоков грузов с запада на восток, необходимо увеличивать пропускную способность дороги, но это ведет к большим финансовым и временным затратам. Также не стоит забывать, что пять месяцев в году ЗСЖД работает в условиях выпадения снега, поэтому своевременная и быстрая очистка путей от снега может повысить пропускную способность станций. В настоящее время планирование работ по очистке путей от снега, в соответствии с новой Инструкцией, стало регламентироваться только внутренними документами каждой станции или дирекций, что не позволяет выработать общий подход к уборке снега на всей дороге. Использование математической модели (2), основанной на параметрах, пригодных для расчета долго- и краткосрочного планирования (количества выпавших осадков, времени работы снегоуборочной машины), позволяет определить количество убранного от снега путей как при планировании, так и при определении эффективности работы машин. Внедрение математической модели в ОАО «РЖД» позволит руководителям на местах эффективней организовать работу станций в зимний период, что повысит их пропускную способность и предотвратит срыв графика движения поездов.

Список источников

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 № 466-р. Москва, 2019. 135 с.
2. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2023 года : (Белая книга) : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р. Москва, 2018. 113 с.
3. Служба контейнерных перевозок : [сайт]. URL: https://slugba-perevozok.ru/pages/container_spravochniki_ZSZD.html (дата обращения: 15.10.2023).
4. Западно-Сибирская железная дорога : [сайт]. URL: <https://zszd.rzd.ru/ru/2747> (дата обращения: 15.10.2023).
5. Природные зоны России на карте // 1Maps.ru : [сайт]. URL: <https://1maps.ru/prirodnye-zony-rossii-na-karte/> (дата обращения: 15.10.2023).
6. Абрамов А. Д., Семенов М. А. Повышение эффективности работы снегоуборочной машины типа СМ на основе автоматизированного мониторинга // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3 (58). С. 40–49.
7. Абрамов А. Д., Семенов М. А. Совершенствование рабочего процесса уборки снега от внедрения мероприятий по оптимизации структуры затрат // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (54). С. 117–127.

8. Семенов М. А. Организация эксплуатации и рабочих процессов снегоуборочных машин типа СМ и ПСС на основе автоматизированного мониторинга // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 44–56.

9. Программа АС КРСРС / АО «ВНИИЖТ». URL: <https://sps.gis.ru.net/> (дата обращения: 15.10.2023).

10. Инструкция по подготовке к работе в зимний период и организации снегоборьбы на железных дорогах, в других филиалах и структурных подразделениях ОАО «РЖД», а также его дочерних и зависимых обществах : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 01.07.2022 № 1733р : (редакция от 16.12.2022). Москва, 2022. 126 с.

11. Инструкция по подготовке к работе в зимний период и организации снегоборьбы на железных дорогах, в других филиалах и структурных подразделениях ОАО «РЖД», а также его дочерних и зависимых обществах : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 22.10.2013 № 2243р. Москва, 2012. 164 с.

12. ЦП-751. Инструкция по снегоборьбе на железных дорогах Российской Федерации : утверждена заместителем министра путей сообщения Российской Федерации 25 апреля 2000 г. Москва, 2000. 58 с.

References

1. Long-term development program of the open joint-stock company Russian Railways until 2025: approved by order of the Russian Federation Government on March 19, 2019 No. 466-r. Moscow; 2019. 135 p. (In Russ.).

2. Strategy for scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period until 2025 and for the future until 2023 (White Book): approved by order of Russian Railways on April 17, 2018 No. 769/r. Moscow; 2018. 113 p. (In Russ.).

3. Container transportation service: [site]. URL: https://slugba-perevozok.ru/pages/container_spravochniki_ZSZD.html. (In Russ.).

4. West Siberian Railway: [site]. (In Russ.). URL: <https://zsrd.rzd.ru/ru/2747>.

5. Natural areas of Russia on the map. *Maps.ru*: [site]. (In Russ.). URL: <https://1maps.ru/prirodnye-zony-rossii-na-karte/>.

6. Abramov A. D., Semenov M. A. Increasing the efficiency of a snowplow type SM based on automated monitoring. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(58):40–49. (In Russ.).

7. Abramov A. D., Semenov M. A. Improving the snow removal workflow from the introduction of measures to optimize the cost structure. *Bulletin of the Ural State Transport University*. 2022;(54):117–127. (In Russ.).

8. Semenov M. A. Organization of operation and work processes of snow removal machines of the SM and PSS types based on automated monitoring. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):44–56. (In Russ.).

9. AS KRSPS program. Railway Research Institute. (In Russ.). URL: <https://sps.gis.ru.net/>.

10. Instructions for preparing for work in winter and organizing snow removal on railways, in other branches and structural divisions of Russian Railways, as well as its subsidiaries and dependent companies: approved by order of Russian Railways dated July 1, 2022 No. 1733r (as amended on December 16, 2022). Moscow; 2022. 126 p. (In Russ.).

11. Instructions for preparing for work in winter and organizing snow removal on railways, in other branches and structural divisions of Russian Railways, as well as its subsidiaries and dependent companies: approved by order of Russian Railways dated October 22, 2013 No. 2243r. Moscow; 2012. 164 p. (In Russ.).

12. TsP-751. Instructions for snow fighting on the railways of the Russian Federation: approved by Deputy Ministry of Railways of the Russian Federation dated April 25, 2000. Moscow; 2000. 58 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А. Д. Абрамов – профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.

А. Л. Манаков – ректор Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.

М. А. Семенов – старший преподаватель кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Information about the authors

A. D. Abramov – Professor at the Technology of Transport Engineering and Machine Operation Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.

A. L. Manakov – Rector of the Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.

M. A. Semenov – Senior Lecturer at the Lifting and Transport, Track, Construction and Road Machines Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 24.10.2023; одобрена после рецензирования 30.10.2023; принята к публикации 01.11.2023.

The article was submitted 24.10.2023; approved after reviewing 30.10.2023; accepted for publication 01.11.2023.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 004.896+629.062
doi 10.52170/1815-9265_2023_67_40

Обнаружение предотказного состояния стрелочного перевода по графику активной мощности

Вадим Андреевич Канарский

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, jizzierose@yahoo.com

Аннотация. Существующие системы технической диагностики и мониторинга не могут абсолютно точно определить состояние стрелочного электропривода. Прежде всего это связано с большим количеством видов отказов (в схеме управления, во внутренних элементах привода, внешних), а также с нехваткой контролируемых параметров, способных в полной мере описать неисправный узел. Однако существуют косвенные методы оценки на основе технологий искусственного интеллекта. В данной работе были исследованы характеристики мощности, полученные от автоматов диагностики силовых параметров. В результате предобработки и моделирования обоснован выбор подходящих алгоритмов машинного обучения без учителя.

Ключевые слова: стрелочный электропривод, неисправность, временные характеристики, мощность, машинное обучение, детектирование аномалий

Для цитирования: Канарский В. А. Обнаружение предотказного состояния стрелочного перевода по графику активной мощности // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 40–46. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_40.

TRANSPORT

Original article

Detection of the pre-failure state of the switch by the active power diagram

Vadim A. Kanarskiy

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, jizzierose@yahoo.com

Abstract. The existing technical diagnostics and monitoring systems cannot fully predetermine the state of the switch motor. First and foremost, this is associated with a large number of failure modes (in control scheme, internal components of the drive, external factors), as well as a lack of monitored parameters capable of fully describing a faulty unit. However, there are indirect assessment methods based on artificial intelligence technologies. This study examined the power characteristics obtained from diagnostic devices of power parameters. The preprocessing and modeling results justify the selection of suitable unsupervised machine learning algorithms.

Keywords: switch motor, failure, temporal characteristics, power, machine learning, anomaly detection

For citation: Kanarskiy V. A. Detection of the pre-failure state of the switch by the active power diagram. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):40–46. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_40.

Введение

Стрелочный электропривод (СП) является одним из самых ответственных узлов железнодорожной автоматики. Только на него, согласно анализу эксплуатационной работы ЦШ за 2019 г., приходится примерно 8 % всех отказов технических средств службы Ш [1, с. 25]. При этом актуальной является проблема мониторинга и диагностики СП. Методы, основанные на анализе

вибрации узлов электропривода или напряженности его магнитного поля, не подходят для использования в существующих системах технической диагностики и мониторинга, так как требуют оборудования каждой стрелки дополнительными датчиками, что влечет за собой существенные экономические затраты [2, с. 13]. Поэтому имеет смысл совершенствовать диагностику косвенным способом по электрическим и

временным параметрам: напряжению, току перевода стрелки в СП с электродвигателями постоянного тока, усилию перевода (полезной мощности) в СП с электродвигателями переменного тока, сопротивлению изоляции рабочей цепи стрелки и времени перевода.

На данный момент наибольшее количество станций охвачено системой мониторинга АПК-ДК (68 %) [1, с. 52]. Используемый в составе данной системы автомат диагностики параметров стрелочного электропривода АДСП позволяет зафиксировать напряжения и токи трех фаз, мощность и тяговое усилие [3, с. 110]. Прибор устанавливается на посту ЭЦ в релейном помещении на свободные места стивов и подключается к рабочим цепям питания стрелок. Информация от АДСП отражается на персональном компьютере электромеханика СЦБ в виде осциллограмм. В данной работе предполагается интеллектуальными методами диагностики оказать информационную поддержку оператору при появлении аномальных кривых.

Для достижения поставленной цели были использованы реальные характеристики, полученные с одной из станций, находящихся под контролем АПК-ДК. Графики (рис. 1) построены на основе наборов дискретных отсчетов мощности, фиксируемых аналогово-цифровым преобразователем внутри АДСП. Каждый отдельный перевод формирует числовую последовательность отсчетов, которая в контексте исследования также именуется вектором или временным рядом.

Методы исследования

Полученные данные мониторинга не являлись размеченными, т. е. классифицированными по категориям неисправностей. Информация об

отказах является внутренней для структурных подразделений ОАО «РЖД», поэтому для поставленной задачи нет целевой переменной. Однако существуют алгоритмы, способные множество образцов данных распределять как минимум на два класса: нормальные данные и аномальные. Последние могут свидетельствовать о появлении предотказного состояния.

Задача детектирования аномалий решается алгоритмами машинного обучения (от англ. *machine learning, ML*) без учителя [4, с. 68]. Для них не требуется наличия целевой переменной, что упрощает моделирование. В результате прогнозирования по такой модели мы лишь получим вероятность принадлежности кривой к нормальному (исправное состояние) или аномальному (предотказное) классу.

Создание матрицы признаков временных рядов

Для использования алгоритмов ML необходимо сначала определить, какие признаки будут использоваться для обнаружения аномалий. В общем случае они могут собой представлять:

- 1) непосредственные значения временного ряда;
- 2) статистические показатели временного ряда (минимальное, максимальное значения, среднее, медиана);
- 3) производные временного ряда (скорость изменения, ускорение, площадь под кривой (интеграл)).

Подход 1

Особенность работы стрелочных приводов состоит в том, что они начинают работу при воздействии оператора на пульт-табло — при задании маршрута либо при раздельном

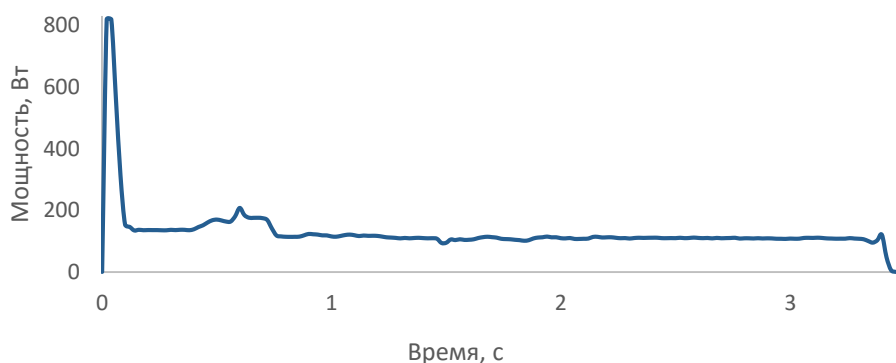


Рис. 1. График мощности нормального перевода

управлении. Поэтому данные рис. 1 представляют собой конечную последовательность значений и не являются потоковыми, как, например, у датчиков давления насосной станции [4]. Количество точек (отсчетов) по оси времени варьируется от 190 до 204 в общем случае, тогда как производительность большинства алгоритмов допускает использование нескольких сотен признаков. Поэтому можно рассматривать каждую точку в качестве признака и использовать временные ряды в моделях напрямую. Однако классические алгоритмы машинного обучения не работают с данными переменной длины, поэтому все векторы мощности были приведены к единой длине с помощью интерполяции средствами пакета Numpy (метод *interp*) [5, 6].

Эталонной была выбрана длина оси времени в 4 с (среднее время перевода нормальнодействующего привода) с шагом, соответствующим периоду дискретизации АДСП 0,02 с. Таким образом длина векторов стала неизменной и равной $4 / 0,02 = 200$, т. е. каждому графику установлено 200 точек. Однако для того, чтобы не терять ценную информацию, 201-м признаком было добавлено реальное время i -го перевода (рис. 2).

Подходы 2, 3

Преобразовать последовательность в принципиально другой формат можно с помощью техник Feature Engineering (отбора признаков). Мощными функциями по извлечению данных из временных рядов обладает библиотека TSFresh (Time Series Feature Extraction based on Scalable Hypothesis tests) [7]. Главными особенностями TSFresh являются:

- автоматическое извлечение признаков;
- разнообразие характеристик (статистические показатели, спектральные и аппроксимационные характеристики, а также производные);
- работа с различными типами данных.

В качестве признаков были выбраны: максимальное (*maximum*), среднее (*mean*), медиана (*median*), стандартное отклонение (*standard_deviation*), количество точек больше среднего (*count_above_mean*), количество точек меньше среднего (*count_below_mean*), крайнее положение максимального значения (*last_location_of_maximum*), коэффициенты асимметрии (*skewness*) и эксцесса (*kurtosis*) и др.

Анализ рис. 3 приводит к следующим выводам:

1) показатель *maximum* почти у всех переводов стрелок равняется 819,1 Вт, что делает

№	1	2	3	4	5	6	...	196	197	198	199	200	201
0	819.1	819.1	819.1	676.6	458.0	262.8	...	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.90
1	819.1	819.1	819.1	819.1	610.9	353.9	...	229.6	211.5	199.6	196.2	212.5	4.00
2	819.1	819.1	819.1	819.1	819.1	819.1	...	225.8	221.3	211.5	203.2	197.5	4.24
3	819.1	819.1	819.1	819.1	589.5	333.2	...	327.9	315.2	0.0	0.0	0.0	3.94
4	819.1	819.1	819.1	819.1	819.1	819.1	...	470.8	344.5	339.3	327.6	339.1	4.82
...
521	819.1	819.1	819.1	819.1	819.1	438.0	...	225.0	219.6	219.7	0.0	0.0	3.96
522	705.1	567.8	819.1	819.1	819.1	498.4	...	270.4	251.1	232.9	226.8	227.2	4.00
523	819.1	819.1	701.3	332.3	150.3	118.9	...	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.90
524	819.1	819.1	819.1	818.7	661.9	488.9	...	193.7	194.1	191.8	207.4	0.0	3.98
525	819.1	819.1	819.1	781.4	602.4	418.4	...	184.2	180.7	193.8	0.0	0.0	3.96

Рис. 2. Приведенные к регулярной длине векторы мощности: столбец «№» – порядковый номер перевода стрелки и сформированного в процессе перевода вектора значений мощности соответственно; пунктирной рамкой выделено добирание «коротких» векторов нулями в процессе интерполяции до заданной длины; сплошной рамкой выделен столбец-признак, в который было включено время перевода

№	maximum	mean	median	standard_deviation	length	mean_change	sum_values	kurtosis	skewness	sample_entropy
0	819.1	198.779899	184.70	95.286299	199.0	-4.136869	39557.2	27.534618	4.655059	0.223366
1	819.1	169.393846	144.30	93.371459	195.0	0.000000	33031.8	31.855205	4.997457	0.219404
2	819.1	187.438462	176.80	91.490618	182.0	-4.519890	34113.8	36.824926	5.730002	0.198626
3	819.1	158.461224	142.95	81.213443	196.0	0.000000	31058.4	46.725619	6.235353	0.133495
4	819.1	291.254455	288.30	94.516003	202.0	-4.075124	58833.4	20.270861	3.928891	0.116864
...
521	819.1	170.622449	153.60	146.643174	245.0	-3.356967	41802.5	8.024589	2.433136	0.191550
522	819.1	422.029796	427.70	144.553168	245.0	-3.356967	103397.3	2.189929	0.096651	0.205292
523	819.1	178.500000	144.50	115.712603	125.0	-6.605645	22312.5	22.260868	4.526639	0.147033
524	819.1	283.646187	309.90	91.206438	459.0	-1.788428	130193.6	4.780464	0.739169	0.136539
525	819.1	227.450000	214.25	95.195448	198.0	0.000000	45035.1	18.103694	3.212396	0.085624

Рис. 3. Таблица статистических признаков 525 имеющихся временных рядов

его абсолютно неинформативным для принятия решения;

2) параметр *length*, отражающий длину вектора, при умножении на период дискретизации 0,02, по сути, станет тем же 201-м признаком (см. рис. 2), показывающим реальное время перевода;

3) матрица, приведенная на рис. 3, выглядит более оптимальной из-за используемых 15 статистических показателей, что в 13 раз меньше, чем в предыдущем подходе. Однако есть и весомый недостаток, заключающийся в быстрой скорости TSFresh. Обработка 525 образцов данных перевода заняла около 40 мин*.

Детектирование аномалий PyOD. Результаты

Для решения задач машинного обучения часто прибегают к использованию нескольких алгоритмов без тщательной настройки их гиперпараметров [8, с. 78]. Апробирование нескольких моделей даст понимание того, какие из них лучше всего подходят к имеющимся данным.

PyOD (от англ. *Python Outlier Detection*) – это библиотека на языке Python, предназначенная для обнаружения выбросов (аномалий) в данных. PyOD содержит реализации различных методов обнаружения выбросов, таких как линейные и нелинейные методы, методы на основе расстояний, плотности, кластеризации и др. [9].

Для определения ненормальных характеристик стрелочного электропривода будут рассматриваться три метода:

– «изолирующий лес» (от англ. *Isolation Forest*, основан на деревьях решений);

– метод опорных векторов (от англ. *Support Vector Machine*, его модификация *One-Class SVM*; работает путем построения гиперплоскости, разделяющей данные на две части);

– обнаружение выбросов на основе копул COPOD (от англ. *Copula-based Outlier Detection*, моделирует зависимости между признаками данных с помощью теории копул и затем использует эти зависимости для определения аномальных наблюдений).

Ранее сформированные матрицы признаков содержат в основном нормальные данные, однако в них намеренно было оставлено примерно 10 % аномальных экземпляров для того, чтобы алгоритмы смогли научиться их различать. Поэтому для методов COPOD и Isolation Forest гиперпараметр *contamination* (процент выбросов) выставлен 0,1.

На рис. 4 представлен результат моделирования. Для объяснения введен условный показатель «нормальности», основанный на решающей функции. Если показатель меньше нуля, модель принимает решение о том, что характеристика аномальна, и наоборот.

Для качественной оценки прогнозирования вводятся метрики бинарной классификации. *Accuracy* показывает нам долю выявленных аномалий из отдельного массива с аномальными образцами перевода стрелки *anom_data*. Идеальным будет, если этот параметр стремится к еди-

* Исследования проводились на ПК с 16 Гб оперативной памяти, процессором Ryzen 5 2600, быстродействующим накопителем SSD.

Внимание! Характеристика аномальная

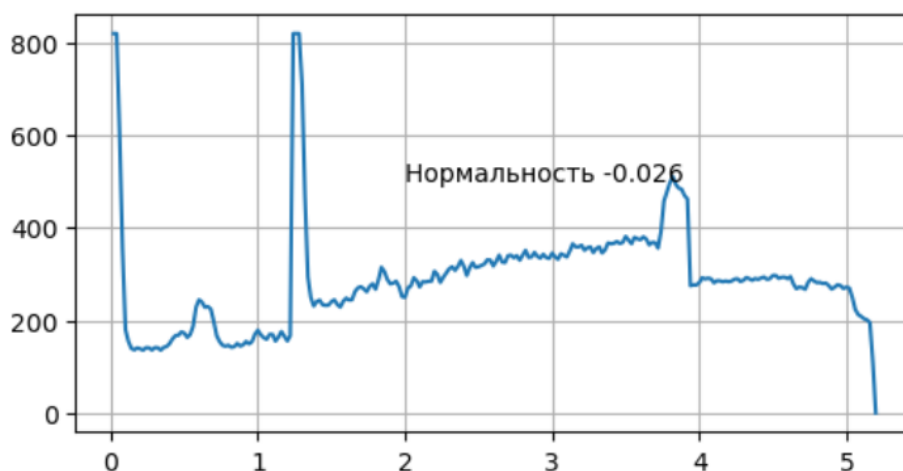


Рис. 4. Принятие решений алгоритмами без учителя

нице. Однако использование только этого показателя не дает полного понимания в работе с нормальными данными. Поэтому вводятся еще три дополнительные метрики, учитывающие оба набора данных (и *norm_data*, и *anom_data*). Точность (*precision*) показывает долю истинно аномальных образцов из всех выявленных, полнота (*recall*) характеризует способность обнаруживать их в принципе (даже если они не являются истинными) [10, с. 42]. F-мера (*F1_score*) является среднегармоническим этих метрик, т. е. учитывает одновременно и точность, и полноту. Чем ближе эти показатели к единице, тем лучше работают модели. Результаты тестирования зафиксированы в таблице.

Анализируя таблицу, можно сделать следующие выводы. COPOD имеет высокую точность обнаружения (0,87), но среди малого количества

детектированных аномалий, судя по полноте (0,3). Большая доля обнаруженных выбросов (0,42) была на матрице признаков TSFresh, но все же меньше половины, что говорит о низкой эффективности данного метода. Более интересная картина складывается у One-ClassSVM: показатели выше на матрице непосредственных значений, метод охватывает 94 % выбросов (*recall* = 0,94), упуская лишь 6 %. Среди выявленных только 76 % являются истинными, что приводит к ложным оповещениям. При гиперпараметрах (*kernel* = 'rbf', *nu* = 0,2) детектируется максимальная доля выбросов из *anom_data* (0,98). Противоположный результат на матрице признаков TSFresh, F-мера уменьшается в почти в 2 раза, *accuracy* падает до 0,25. Лучший результат на этой матрице показал IForest – 100%-я классификация

Сравнительная характеристика результатов прогнозирования на разных матрицах

Алгоритм ML	Метрика	Матрица признаков	
		Значение временного ряда + время перевода	Статистические показатели и производные от TSFresh
COPOD (contamination = 0,1)	Precision	0,87	0,81
	Recall	0,3	0,45
	F1_score	0,44	0,58
	Accuracy	0,16	0,42
Isolation Forest (contamination = 0,1)	Precision	0,86	0,86
	Recall	0,61	0,89
	F1_score	0,71	0,87
	Accuracy	0,6	1,00
One-Class SVM (<i>nu</i> = 0,2, <i>kernel</i> = 'rbf')	Precision	0,76	0,6
	Recall	0,94	0,37
	F1_score	0,84	0,46
	Accuracy	0,98	0,25

anom_data как полностью аномального. Согласно высокому $F1_score$ (0,87) в большинстве случаев алгоритм дает меньше ложноположительных (точность 0,86) и ложноотрицательных (полнота 0,89) результатов. Возможно, такой результат достигается тем, что деревьям решений проще делать разбиение по более разреженным данным (см. рис. 3), чем по монотонным кривым (см. рис. 1).

Заключение

В результате обработки данных рис. 1–4 можно сделать вывод, что в определении возможного неисправного состояния по данным

о мощности двигателя СП большую эффективность показали методы One-Class SVM на непосредственных точках зависимости $P(t)$ и Isolation Forest на статистических показателях. Однако в процессе исследования были выявлены следующие недостатки. Для первого алгоритма каждая точка кривой является независимым признаком, поэтому, если фаза зависимости будет сдвинута (например, сдвинут максимум на 0,5 с), алгоритм может детектировать аномалию. У второго метода нет такой проблемы, но относительно велико время на извлечение признаков, зато максимальны метрики качества классификации.

Список источников

1. Анализ эксплуатационной деятельности хозяйства автоматики и телемеханики по итогам 2019 года / Управление автоматики и телемеханики Центральной дирекции инфраструктуры. Москва : ОАО «РЖД», 2019. 101 с.
2. Котов В. К., Павловский А. А., Павловский Е. А. Диагностика стрелочных электроприводов по параметрам тока // Автоматика, связь, информатика. 2015. № 7. С. 12–17.
3. Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П. Автомат диагностики силовых параметров стрелочного электропривода // Проблемы безопасности и надежности микропроцессорных комплексов : сборник трудов научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27–28 мая 2015 г. Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. С. 110–117.
4. Канарский В. А. Прогнозирование отказов насосной станции с помощью машинного обучения без учителя // Вестник РосНОУ: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2022. № 4. С. 63–74. DOI 10.18137/RNU.V9187.22.04.P.1.
5. Канарский В. А. Совершенствование диагностики стрелочных приводов с использованием искусственного интеллекта // Интеллектуальные транспортные системы : материалы II Международной научно-практической конференции (г. Москва, 25 мая 2023 г.). Москва : РУТ (МИИТ), 2023. С. 578–583.
6. Array programming with NumPy / C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt [et al.] // Nature. 2020. Vol. 585, No. 7825. P. 357–362. DOI 10.1038/s41586-020-2649-2.
7. Time Series Feature Extraction on basis of Scalable Hypothesis tests (tsfresh – A Python package) / M. Christ, N. Braun, J. Neuffer, A. W. Kempa-Liehr // Neurocomputing. 2018. Vol. 307, No. 7. P. 72–77. DOI 10.1016/j.neucom.2018.03.067.
8. Géron A. Hands-On Machine Learning with ScikitLearn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems. Sebastopol, CA : O'Reilly Media, 2019. 600 p.
9. Zhao Y., Nasrullah Z., Li Z. PyOD: A Python Toolbox for Scalable Outlier Detection // Journal of Machine Learning Research (JMLR). 2019. Vol. 20, No. 96. P. 1–7.
10. Канарский В. А. Исследование эффективности машинного обучения в мониторинге сигнальной точки // Надежность. 2023. № 1. С. 38–44. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-1-38-44>.

References

1. Analysis of the operational activities of the automation and telemechanics infrastructure at the end of 2019. Automation and Telemechanics Department of the Central Infrastructure Directorate. Moscow: Russian Railways; 2019. 101 c. (In Russ.).
2. Kotov V. K., Pavlovskiy A. A., Pavlovskiy E. A. Diagnostics of the electric point drives by the current parameters. *Automation, communication, informatics*. 2015;(7):12–17. (In Russ.).
3. Ivanov A. A., Legonkov A. K., Molodtsov V. P. Automate diagnostics of the power parameters of the arrow electric drive. *Problems of safety and reliability of microprocessor complexes. Proceedings of scientific and practical conference*, St. Petersburg, May 27–28, 2015. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Railway Transport of Emperor Alexander I; 2015. P. 110–117. (In Russ.).

4. Kanarskiy V. A. Prediction of pumping station failures using machine learning without a teacher // *Bulletin of RosNow: Complex Systems: Models, Analysis and Control*. 2022;(4):63–74. (In Russ.). DOI 10.18137/RNU.V9I87.22.04.P.1.
5. Kanarskiy V. A. Improvement of the arrow drives diagnostics using artificial intelligence. *Intelligent transport systems. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference (Moscow, May 25, 2023)*. Moscow: Russian University of Transport; 2023. С. 578–583. (In Russ.).
6. Harris C. R., Millman, K. J., van der Walt S. J. [et al.]. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020;585(7825):357–362. DOI 10.1038/s41586-020-2649-2.
7. Christ M., Braun N., Neuffer J., Kempa-Liehr A. W. Time Series Feature Extraction on basis of Scalable Hypothesis tests (tsfresh – A Python package). *Neurocomputing*. 2018;307(7):72–77. DOI 10.1016/j.neucom.2018.03.067.
8. Géron A. Hands-On Machine Learning with ScikitLearn, Keras, and TensorFlow: *Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems*. Sebastopol, CA: O'Reilly Media; 2019. 600 p.
9. Zhao Y., Nasrullah Z., Li Z. PyOD: A Python Toolbox for Scalable Outlier Detection. *Journal of Machine Learning Research (JMLR)*. 2019;20(96):1–7.
10. Kanarskiy V. A. Investigation of machine learning efficiency in signal point monitoring. *Reliability*. 2023;(1):38–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-1-38-44>.

Информация об авторе

В. А. Канарский – аспирант кафедры «Вычислительная техника и компьютерная графика», преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Дальневосточного государственного университета путей сообщения.

Information about the author

V. A. Kanarskiy – Postgraduate of the Computer Engineering and Computer Graphics Department, Lecturer of the Automation, Telemechanics, and Communication Department, Far Eastern State Transport University.

Статья поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 31.10.2023; принята к публикации 02.11.2023.

The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 31.10.2023; accepted for publication 02.11.2023.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.225:614.84
doi 10.52170/1815-9265_2023_67_47

Правила перевозки опасных грузов по железным дорогам: разработка дополнений и изменений

Владимир Ильич Медведев^{1✉}, Сергей Анатольевич Бессоненко²,
Марк Евгеньевич Корягин³, Михаил Дмитриевич Сурков⁴, Наталья Борисовна Попова⁵

^{1,2,3,4,5} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ MedvedevVI2017@yandex.ru✉

² bessonenko@stu.ru

³ markkoryagin@yandex.ru

⁴ surkovmd@yandex.ru

⁵ pnb1512@yandex.ru

Аннотация. Перевозка опасных грузов по-прежнему представляет собой важную народно-хозяйственную задачу для крупных экономик стран мира. Это связано как с большими объемами перевозок и необходимостью обеспечения нормативных мер безопасности, так и с введением в хозяйственный оборот новых опасных веществ, материалов и изделий. По нашим оценкам, активно продвигаемые зеленая энергетика и зеленая экономика потребуют вовлечения в производство на 15–20 % больше опасных компонентов, чем традиционная экономика пятого уклада. Стремительное развитие транспортных коридоров в современном мире с вовлечением всех видов транспорта: авиационного, железнодорожного, автомобильного, трубопроводного, речного и морского (в том числе по Северному морскому пути) – может представлять существенную опасность по целому ряду причин. При транзитных, а также мультимодальных перевозках могут возникать нагрузки, не предусмотренные условиями перевозок в обычном режиме. Неизбежным последствием станет фактор дополнительных техногенных нагрузок на уязвимые экосистемы территорий, чему уделяется в современном обществе особое внимание.

В нашей стране перевозка регламентируется значительным массивом нормативно-правовых актов и нормативно-технических документов. Большое количество документов служит решению двуединой задачи: 1) обеспечению устойчивой и безопасной перевозки широкой номенклатуры специфических опасных грузов в нашей стране; 2) соблюдению условия безбарьерного транзита грузов, гармонизации требований внутренних перевозок с требованиями международного грузового сообщения. В данной работе предпринята попытка разработки дополнений и изменений для внесения в правила перевозки опасных грузов по железным дорогам Российской Федерации с учетом необходимости гармонизации условий и унификации требований.

Разработаны предложения по корректировке условий перевозки новых для железнодорожного транспорта Российской Федерации опасных грузов. Прежде всего результаты касаются атрибуции новых опасных грузов и соотнесения этой атрибуции груза с релевантной аварийной карточкой. Применена ранее описанная и неоднократно успешно примененная нами методика гармонизации внутренних и международных требований, основанная на сравнительной типологии и круговых экспертных оценках. Критерием адекватности предлагаемых решений выступает принцип разумной достаточности и приемлемого риска.

Основные результаты касаются опасных грузов генерального списка Организации Объединенных Наций, имеющих номенклатурные позиции (номера) с 3474 по 3549, включенных в список в качестве дополнения за 2007–2022 гг. Новые грузы относятся к классам (подклассам) опасности: 2, 3, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1, 6.1, 6.2, 8 и 9. Теоретическое значение работы заключается в комплексности и системности подхода к анализу и переработке разрозненных данных, касающихся новых грузов: номера ООН, наименования, основного и дополнительного видов опасности, группы упаковки, аварийной карточки. Практическая важность состоит в обеспечении достаточного уровня безопасности перевозок всех допущенных на железных дорогах Российской Федерации опасных грузов в соответствии с гармонизированными условиями.

Ключевые слова: аварийные карточки, аварийные ситуации, железнодорожный транспорт, класс опасности, номер ООН, опасные грузы, правила перевозок

Для цитирования: Правила перевозки опасных грузов по железным дорогам: разработка дополнений и изменений / В. И. Медведев, С. А. Бессоненко, М. Е. Корягин, М. Д. Сурков, Н. Б. Попова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 47–58. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_47.

Rules for the transportation of dangerous goods by rail: development of additions and amendments

Vladimir I. Medvedev^{1✉}, Sergey A. Bessonenko², Mark E. Koryagin³,
Mikhail D. Surkov⁴, Natalya B. Popova⁵

^{1,2,3,4,5} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ MedvedevVI2017@yandex.ru

² bessonenko@stu.ru

³ markkoryagin@yandex.ru

⁴ surkovmd@yandex.ru

⁵ pnb1512@yandex.ru

Abstract. Transportation of dangerous goods is still an important national economic task for the major economies of the world. This is due to both large volumes of transportation and the need to ensure regulatory safety measures, as well as the introduction of new hazardous substances, materials and products into economic circulation. According to our estimates, the actively promoted green energy and green economy will require the involvement of 15–20 % more hazardous components in production than the traditional economy of the fifth way. The rapid development of transport corridors in the modern world involving all types of transport: aviation, rail, road, pipeline, river and sea (including the Northern Sea Route) can pose a significant danger for a number of reasons. During transit, as well as multimodal transportation, loads may occur that are not provided for by the conditions of transportation in the usual mode. The inevitable consequence will be the factor of additional technogenic loads on vulnerable ecosystems of territories that is given special attention in modern society.

In our country, transportation is regulated by a significant array of regulatory legal acts and regulatory and technical documents. A large number of documents serve to solve a two-pronged problem: 1) ensuring stable and safe transportation of a wide range of specific dangerous goods in our country; 2) compliance with the conditions of barrier-free transit of goods, harmonization of domestic transportation requirements with the requirements of international freight traffic. In this paper, an attempt is made to develop additions and amendments to the rules for the transportation of dangerous goods by railways of the Russian Federation in the light of the need to harmonize conditions and unify requirements.

Proposals have been developed to adjust the transportation conditions of new dangerous goods to the railway transport of the Russian Federation. First of all, the results relate to the attribution of new dangerous goods and the correlation of this cargo attribution with the relevant emergency card. The harmonization methodology of domestic and international requirements, previously described and repeatedly successfully applied by us, based on comparative typology and circular expert assessments, has been applied. The criterion of adequacy of the proposed solutions is the principle of reasonable sufficiency and acceptable risk.

The main results relate to dangerous goods of the United Nations general list of nomenclature items (numbers) from 3474 to 3549 included in the list as a supplement for the period 2007–2022. New cargoes belong to hazard classes (subclasses): 2, 3, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1, 6.1, 6.2, 8 and 9. The theoretical significance of the work lies in the complexity and systematic approach to the analysis and processing of disparate data concerning new cargoes: UN numbers, names, main and additional hazards, packing group, emergency card. The practical importance is to ensure a sufficient level of dangerous goods transportation safety allowed on the railways of the Russian Federation in accordance with harmonized conditions.

Keywords: emergency cards, emergency situations, railway transport, hazard class, UN number, dangerous goods, transportation rules

For citation: Medvedev V. I., Bessonenko S. A., Koryagin M. E., Surkov M. D., Popova N. B. Rules for the transportation of dangerous goods by rail: development of additions and amendments. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):47–58. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_47.

Введение

Перевозка (транспортировка) опасных грузов представляет собой важную народно-хозяйственную проблему для крупных экономик стран мира. Внимание к ней должно определенно возрастать, учитывая прогнозируемый 6%-й рост объема перевозки опасных грузов в течение 2023–2028 гг. [1]. Важность связана как с большими объемами перевозок и необходимостью обеспечения нормативных

мер безопасности, так и с введением в хозяйственный оборот новых опасных веществ, материалов и изделий. По нашим экспертным оценкам, активно продвигаемые зеленая энергетика и зеленая экономика потребуют вовлечения в производство опасных компонентов на 15–20 % больше, чем традиционная экономика пятого уклада. В современном мире происходит развитие транспортных коридоров, в том числе мультимодальных, с вовлечением

всех видов транспорта: авиационного, железнодорожного, автомобильного, трубопроводного, водного (речного и морского). При транзитных, мультимодальных перевозках могут возникать нагрузки, не предусмотренные условиями обычного железнодорожного грузового сообщения. Можно ожидать в качестве неизбежного сопутствующего фактора дополнительные техногенные нагрузки на уязвимые экосистемы обширных территорий, однако в настоящей работе он присутствует опосредованно.

В нашей стране перевозка регламентируется значительным массивом нормативно-правовых актов (НПА) и нормативно-технических документов (НТД). Большое количество НПА и НТД необходимо для решения двуединой задачи: 1) обеспечения устойчивой и безопасной перевозки широкой номенклатуры специфических опасных грузов в нашей стране; 2) соблюдения условия безбарьерного транзита грузов, гармонизации требований внутренних перевозок с требованиями международного грузового сообщения. В данной работе представлены результаты разработки дополнений к правилам перевозки опасных грузов по железным дорогам Российской Федерации и сопредельных стран [2, 3] и их изменений с учетом необходимости гармонизации условий и унификации требований.

Основные результаты касаются опасных грузов списка [4, 5] Организации Объединенных Наций (ООН), имеющих номенклатурные позиции (номера) с 3474 по 3549, включенных в список в 2007–2022 гг. Новые грузы относятся к классам (подклассам) опасности: 2, 3, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1, 6.1, 6.2, 8 и 9. Теоретическое значение работы заключается в комплексности и системности подхода к анализу и переработке разрозненных данных: номера ООН, наименования груза, основного и дополнительного видов опасности, группы упаковки, аварийной карточки. Международные и отечественные требования по классификации и атрибуции отличаются в некоторых важных аспектах [6]. Практическая важность состоит в обеспечении достаточного уровня безопасности перевозок всех допущенных на железных дорогах Российской Федерации опасных грузов в соответствии с гармонизированными условиями.

Материалы и методы исследования

Решения основаны на адекватном и релевантном методическом аппарате, основы которого разработаны в последней трети XX в. научным коллективом под руководством профессоров В. К. Бешкетто и А. М. Островского. Сформированный методический аппарат по разработке условий перевозки опасных грузов во внутреннем и международном железнодорожном грузовом сообщении [6, 7] за продолжительный период подтвердил свою теоретическую и практическую состоятельность. Теория проектирования условий перевозки и оценки риска основана на моделировании состояния груза (грузовой единицы) под действием динамических, статических и тепловых воздействий в транспортном процессе [6, 7]. При железнодорожных перевозках воздействия изменяются в широком диапазоне [8].

Один из важных методологических приемов заключается в двухстадийной последовательности: 1) норма устанавливается из сочетания всех учитываемых наиболее неблагоприятных обстоятельств; 2) норма корректируется в «меньшую сторону» (ослабления) на основе моделирования возможной реальной обстановки. Исходные данные основаны на правилах [4], разработанные нормативы – на методах сравнительной типологии и круговых экспертных оценок. Критерием адекватности предлагаемых решений выступает ноксологический принцип разумной достаточности и приемлемого риска.

Результаты исследования

Актуальность исследования проблемы обусловлена целым рядом причин, в частности: 1) все основные нормативно-технические акты по перевозкам опасных грузов по отечественным железным дорогам концептуально разработаны и утверждены в 1996–2000 гг., в дальнейшем претерпевали незначительные редакционные изменения; 2) приобрели важное значение факторы, которые ранее не учитывались или учитывались недостаточно: новые виды грузов и новые риски.

Анализ дополнений генерального списка номенклатурных позиций (или номеров ООН) [4] за последние 15 лет свидетельствует, по нашему мнению, о том, что активно продвигаемая в глобальном масштабе зеленая энергетика и зеленая экономика потребуют вовлечения в

производство опасных компонентов на 15–20 % больше, чем традиционная экономика пятого уклада. Прерогатива присвоения номеров ООН принадлежит Комитету экспертов по перевозке опасных грузов и Согласованной на глобальном уровне системе классификации и маркировки химических веществ Экономического и Социального Совета Организации Объединенных Наций (ЭКОСОС ООН).

Проанализирована динамика пополнения списка опасных грузов ООН изданий с 14-го по 22-е, а также связанных с Комитетом экспертов ЭКОСОС ООН международных соглашений и организаций по видам транспорта:

– Конвенция о международных железнодорожных перевозках (КОТИФ). Приложение С «Регламент о международной железнодорожной перевозке опасных грузов» (МПОГ – РИД) [9];

– Соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ – АДР) [10];

– Европейское соглашение о международной перевозке опасных грузов по внутренним водным путям (ВОПОГ) [11];

– Международный кодекс морской перевозки опасных грузов (МК МПОГ) [12];

– Международная организация гражданской авиации (ИКАО) [13].

Временная характеристика изменений и дополнений в генеральный список опасных грузов, отраженная в важнейших документах международной регламентации, приведена в табл. 1. Также представлены национальные регламенты: Правила перевозок опасных грузов (ППОГ) [2, 3] и Аварийные карточки на опасные грузы, перевозимые по железным дорогам СНГ, Латвийской Республики, Литовской Республики, Эстонской Республики [14]. Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что список опасных грузов в различных регламентах периодически пополняется. Однако, что касается железнодорожных перевозок в Российской Федерации, отсутствует необходимая синхронизация по атрибуции новых опасных грузов и соотнесение их с адекватной аварийной карточкой (АК). Ключевые НПА и НТД [3, 14] разрабатываются Дирекцией Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества (ЦСЖТ), несущей,

Таблица 1

Временная характеристика изменений и дополнений в генеральный список опасных грузов в важнейших документах международной и национальной регламентации

Документ	2005–2006	2007–2008	2009–2010	2011–2012	2013–2014	2015–2016	2017–2018	2019–2020	2021–2022
ООН [5] (издание)	3468 (14)	3469 – 3486 (15)	(16)	3487– 3506 (17)	(18)	(19)	3537– 3548 (20)	(21)	(22)
МПОГ (РИД) [9]	–	–	–	–	–	–	–	–	3535– 3549
ДОПОГ (АДР) [10]	–	–	–	–	–	–	3528– 3534	3549	3549
ВОПОГ [11]	–	–	–	–	–	–		3549, 9000– 9006	3550, 9000– 9006
МК МПОГ [12]	–	–	–	–	–	1001– 3534	–	–	–
ИКАО [13]	–	–	–	–	–	1001– 3526, 8000	–	–	–
ППОГ (прил. 2 к СМГС) [2]	–	–	–	–	–	–	–	–	3537– 3549
ППОГ (прил. 2 к ЦСЖТ) [3]	–	–	1001– 3473	3474– 3484	3473–3491, 3494, 3496, 3499–3506	–	–	3527, 3531– 3536	–
Аварийные карточки (ЦСЖТ) [14]	–	–	1001– 3473	–	–	–	–	–	–

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных или необходимости в них.

наряду с Федеральным агентством по железнодорожному транспорту, ответственность за безопасность перевозки опасных грузов.

На основе анализа номенклатуры опасных грузов и их атрибуции, т. е. установления классификационных шифров, адекватных аварийных карточек и в ряде случаев размеров изоляции опасной зоны R_{03} , составлена сводная табл. 2. Наиболее важный результат – выявление отсутствия утвержденной аварийной карточки для существенного числа номенклатурных позиций ООН, что противоречит национальной регламентации и несет угрозу аварийных ситуаций с ущербом для людей, транспортной инфраструктуры и природной среды.

Аварийные карточки на опасные грузы с номерами ООН 1001–3473 разработаны с участием авторов данной работы, утверждены установленным порядком [15]. По решению Дирекции Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества и ассоциированных членов номера аварийных карточек указываются в соответствующей графе приложения 2 «Алфавитный указатель опасных грузов, допущенных к перевозке железнодорожным транспортом» (кроме грузов 1-го и 7-го классов опасности) [3].

Аналогичное решение вынесла II Комиссия по транспортному праву Организации сотрудничества железных дорог (ОСЖД) – указывать номера аварийных карточек в табл. А «Перечень

Таблица 2

Сводные данные о наличии и взаимном соответствии аварийных карточек на опасные грузы генерального списка номеров ООН 1001–3550 в правилах перевозок международной регламентации – прил. 2 к ЦСЖТ и прил. 2 к СМГС, а также в работах авторов (опубликованных в 2020 и 2022 гг. и в настоящей работе)

Совокупность опасных грузов с номерами ООН	ППОГ (прил. 2 к ЦСЖТ) [3]	ППОГ (прил. 2 к СМГС) [2]	Данные авторов [15, 16]
1001–3473	Соответствуют [14]	Соответствуют [14]	Отсутствуют
3474–3498	Утверждены, соответствуют [2]	Утверждены, соответствуют [3]	Отсутствуют
3499	Утверждена, соответствует [2]	Утверждена, соответствует [3]	Разработана, не соответствует [2, 3]
3500–3505	Отсутствуют	Отсутствуют	Разработаны
3506	Утверждена, соответствует [2]	Утверждена, соответствует [3]	Разработана, соответствует [2, 3]
3507	Отсутствует номенклатурная позиция	Отсутствует	Разработана
3508	Утверждена, соответствует [2]	Утверждена, соответствует [3]	Разработана, не соответствует [2, 3]
3509	Отсутствует	Отсутствует	Разработана
3510	Утверждена, соответствует [2]	Утверждена, соответствует [3]	Разработана, не соответствует [2, 3]
3511	Отсутствует	Утверждена	Разработана, не соответствует [2]
3512–3513	Утверждены, соответствуют [2]	Утверждены, соответствуют [3]	Разработаны, соответствуют [2, 3]
3514	Утверждена, соответствует [2]	Утверждена, соответствует [3]	Разработана, не соответствует [2, 3]
3515–3518	Утверждены, соответствуют [2]	Утверждены, соответствуют [3]	Отсутствуют или требуют корректировки
3519–3526	Утверждены, соответствуют [2]	Утверждены, соответствуют [3]	Отсутствуют
3527–3534	Отсутствуют номенклатурные позиции	Утверждены	Отсутствуют
3535–3542	Утверждены, соответствуют [2]	Утверждены, соответствуют [3]	Отсутствуют
3543–3548	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют
3549–3550	Отсутствуют	Отсутствуют	Разработаны
3551–3559	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют

опасных грузов» п. 3.2 [2]. В колонке 21а) указывается номер аварийной карточки. При отсутствии номера (свидетельствует о том, что на данный груз аварийная карточка к текущему времени не разработана) отправитель должен ее разработать инициативно и приложить к перевозочным документам согласно подп. 5.4.3.11 и 5.4.3.12 [2].

АК на опасные грузы с номерами ООН 3474–3498 разработаны инициативно членами временных рабочих групп (ВРГ). Авторы данного исследования в этой работе участия не принимали. Однако нами запланировано проведение критического анализа адекватности результатов работы ВРГ в этой части с публикацией результатов в краткосрочной перспективе.

В табл. 3 представлено обоснование по снятию расхождения нормативов [2, 3] с результатами [5]. Вопрос тем не менее представляется дискуссионным, возможен вариант классификационного шифра 9063 – опасные для окружающей среды вещества.

Характеристика опасных грузов номеров ООН 3500–3505, являющаяся исходным материалом для установления условий и правил перевозки, в том числе рекомендуемых номеров АК, разработана и опубликована в наших работах [15, 16]. Там же представлены предложения по классификационным шифрам и размерам (радиусам) опасных зон изоляции, являющимся обязательными нормативами, указываемыми в «паспортной части» АК и в

подразделе общего характера раздела необходимых действий соответственно.

Относительно надлежащего транспортного наименования опасного груза с номером ООН 3506 существуют синонимические расхождения. Кроме того, нет достаточных данных по отнесению к классификационному шифру данного груза. Для опасного груза «2809 Ртуть» в АК № 811 указан шифр 8013, а в работе [16] – 8061. Поскольку к номенклатурной позиции «Изделия промышленные, содержащие ртуть» отнесены всякого рода ртутьсодержащие приборы, в том числе чрезвычайно распространенные ртутные лампы, проблема требует, по нашему мнению, разрешения на основе экспериментальных методов [5, 17].

Предложение по соотношению опасного груза номера ООН 3507 к АК № 806 представляется адекватным. В работе [15], опубликованной в 2020 г., было предложено отнесение к АК № 815, что было исправлено в последующей публикации 2022 г. [16]. Рекомендуемый классификационный шифр – 8061 (решение о группе упаковки, в данном случае эквивалентной степени опасности, дискуссионно).

Опасный груз «3510 Газ адсорбированный, воспламеняющийся, н. у. к.» (н. у. к. – общепринятое в источниках на русском языке сокращение в надлежащем транспортном наименовании опасных грузов так называемых обобщенных рубрик: *не указанный конкретно*) в перечнях [2, 3] отнесен к АК № 220, в работах [15, 16] – к АК

Таблица 3

Обоснование по снятию расхождения нормативов [2, 3] с результатами [16]

Номер ООН	Наименование груза	Номер АК		Классификационный шифр		Обоснование
		[2, 3]	[15]	[2, 3]	[15]	
3499	Конденсатор с двойным электрическим слоем (с энергоемкостью более 0,3 Вт·ч)	910	907	Не определен	9093	Классификационный шифр 9093 – категория, включающая «другие опасные вещества, материалы, изделия (и отходы)», которым присвоен индивидуальный номер ООН [17, 18].
3508	Конденсатор асимметричный (с энергоемкостью более 0,3 Вт·ч)	910	907	910	9093	АК № 910 отсутствует в [14]; 907 – содержащее опасные грузы оборудование
3509	Тара отработанная, неочищенная	Не определен	907	Не определен	9093	Классификационный шифр 9093 – категория, включающая «другие опасные вещества, материалы, изделия (и отходы)», которым присвоен индивидуальный номер ООН [17, 18]. АК № 907 – содержащее опасные грузы оборудование

№ 218. На наш взгляд, допущена серьезная оплошность, поскольку в АК № 220 объединены газы и содержащие их емкости небольшого размера, преобладающими опасностями которых являются ядовитость (токсичность), коррозионность и окисляющее действие. Причем грузы могут характеризоваться одной, двумя или тремя вышеприведенными видами опасности. В то же время АК № 218 объединяет воспламеняющиеся газы, что существенно важно. Есть основание ожидать, что разработчики [2, 3] при корректировке издания обратят внимание на это существенное обстоятельство.

В перечне [2] опасный груз «3511 Газ адсорбированный, н. у. к.» отнесен к АК № 220, в ранее опубликованных работах авторов – к АК № 215. Выше дана системообразующая характеристика видов опасности газов, включенных в АК № 220. В АК № 215 объединены газы, не отличающиеся каким-либо дополнительным видом опасности, следовательно, рассматриваемая номенклатурная позиция может быть соотнесена с этими грузами.

Относительно АК для номенклатурных позиций «3512 Газ адсорбированный, токсичный, н. у. к.» и «3513 Газ адсорбированный, окисляющий, н. у. к.» наблюдается согласие между [2, 3] и [16] о соответствии № 220. Однако вопрос квалификации газов адсорбированных, окисляющих, н. у. к. дискуссионный – в работе [15] нами предлагался альтернативный вариант о соотношении с № 202. Характеристика АК № 220 дана выше, № 202 включает «индивидуальные» окисляющие газы (определенного химического состава), например кислород. Целесообразно проведение дополнительного исследования.

По грузу «3514 Газ адсорбированный, токсичный, воспламеняющийся, н. у. к.» расхождение между [2, 3] и [15, 16] обусловлено тем, что АК № 220 не содержит воспламеняющихся газов, в отличие от предлагаемого нами № 219, включающего не указанные конкретно окисляющие газы с дополнительными видами опасности.

Предложения по квалификации опасных грузов номеров ООН 3515–3518 на основе аналогов среди списочных опасных грузов [14] приведены в табл. 4. Ориентировочное значение

Таблица 4

Характеристика опасных грузов номеров ООН 3515–3518, имеющих аналоги среди списочных опасных грузов (как обоснование результатов), аргументирующая согласие или расхождение с нормативами [2, 3]

Груз		Знак опасности	Классификационный шифр	Аналог груза		Номер АК	Соответствие [7, 8]	R_{03}^* , м
Номер ООН	Наименование			Номер ООН	Наименование			
3515	Газ адсорбированный, токсичный, окисляющий, н. у. к.	2.3, 5.1	2337	3303	Газ сжатый, токсичный, окисляющий, н. у. к.	220	Да	180
				3307	Газ сжиженный, токсичный, окисляющий, н. у. к.			
3516	Газ адсорбированный, токсичный, коррозионный, н. у. к.	2.3, 8	2347	3304	Газ сжатый токсичный, коррозионный, н. у. к.	220	Да	180
				3308	Газ сжиженный, токсичный, коррозионный, н. у. к.			
3517	Газ адсорбированный, токсичный, воспламеняющийся, коррозионный, н. у. к.	2.3, 2.1, 8	2357**	3305	Газ сжатый, токсичный, воспламеняющийся, коррозионный, н. у. к.	219	Нет	300
				3309	Газ сжиженный, токсичный, воспламеняющийся, коррозионный, н. у. к.			
3518	Газ адсорбированный, токсичный, окисляющий, коррозионный, н. у. к.	2.3, 5.1, 8	2367**	3306	Газ сжатый, токсичный, окисляющий, коррозионный, н. у. к.	220	Да	180
				3310	Газ сжиженный, токсичный, окисляющий, коррозионный, н. у. к.			

* R_{03} – ориентировочное значение радиуса изоляции.

** Предложены гипотетические классификационные шифры, не предусмотренные в табл. А4 стандарта [18].

радиуса опасной зоны $R_{оз}$ откорректировано относительно сборника АК [14] на основе результатов [15].

Предложения по квалификации опасных грузов номеров ООН 3519–3526 на основе аналогов среди списочных опасных грузов [14] приведены в табл. 5. Все разработанные номера АК согласуются с нормативами [2, 3].

Предложения по включению опасных грузов номеров ООН 3527–3534 в аварийные карточки даны табл. 6. Объем статьи не позволяет привести убедительное обоснование.

Характеристика опасных грузов номеров ООН 3515–3518 с номерами АК приведена в табл. 4 [15]; характеристика опасных грузов предложений о соотношении опасных грузов с

Таблица 5

Характеристика опасных грузов номеров ООН 3519–3526, имеющих аналоги среди списочных опасных грузов

Груз		Знак опасности	Классификационный шифр	Аналог груза		Номер АК	Ориентировочное значение $R_{оз}$, м
Номер ООН	Наименование			Номер ООН	Наименование		
3519	Бора трифторид адсорбированный	2.3, 8	2347	1008	Бора трифторид	203	200
3520	Хлор адсорбированный	2.3, 5.1, 8	2347	1017	Хлор	203	200
3521	Кремния тетрафторид адсорбированный	2.3, 8	2347	1859	Кремния тетрафторид	203	200
3522	Арсин адсорбированный	2.3, 2.1	2327	2188	Арсин	209	200
3523	Герман адсорбированный	2.3, 2.1	2327	2192	Герман	209	200
3524	Фосфора пентафторид адсорбированный	2.3, 8	2347	2198	Фосфора пентафторид	203	200
3525	Фосфин адсорбированный	2.3, 2.1	2327	2199	Фосфин	209	200
3526	Водорода селенид адсорбированный	2.3, 2.1	2327	2202	Водорода селенид безводный	209	200

Таблица 6

Характеристика опасных грузов номеров ООН 3527–3534, номера аварийных карточек которых не указаны в перечнях [2, 3], для включения в соответствующие АК

Номер ООН	Наименование	Знак опасности	Номер АК
3527	Смол полиэфирных комплект, твердое основное вещество	4.1	402
3528	Двигатель внутреннего сгорания, работающий на легковоспламеняющейся жидкости, или двигатель, работающий на топливных элементах, содержащих легковоспламеняющуюся жидкость, или машина с двигателем внутреннего сгорания, работающим на легковоспламеняющейся жидкости, или машина, работающая на топливных элементах, содержащих легковоспламеняющуюся жидкость	3	335
3529	Двигатель внутреннего сгорания, работающий на воспламеняющемся газе, или двигатель, работающий на топливных элементах, содержащих воспламеняющийся газ, или машина с двигателем внутреннего сгорания, работающим на воспламеняющемся газе, или машина, работающая на топливных элементах, содержащих воспламеняющийся газ	2.1	218
3530	Двигатель внутреннего сгорания или машина с двигателем внутреннего сгорания	9	909
3531	Вещество полимеризующееся, твердое, стабилизированное, н. у. к.	4.1	402
3532	Вещество полимеризующееся, жидкое, стабилизированное, н. у. к.	4.1	402
3533	Вещество полимеризующееся, твердое, перевозимое при регулируемой температуре, н. у. к.	4.1	411
3534	Вещество полимеризующееся, жидкое, перевозимое при регулируемой температуре, н. у. к.	4.1	411

Таблица 7

Характеристика опасных грузов номеров ООН 3543–3549 и номера АК

Но- мер ООН	Наименование	Класс опас- ности	Знак опасно- сти	Классифи- кационный шифр	Номер АК	Ориенти- ровочное значение R_{03} , м
3543	Изделия, содержащие вещество, выделяющее воспламеняющиеся газы при взаимодействии с водой, н. у. к.	4.3	4.3	4311, 4312, 4313	429, 421	200
3544	Изделия, содержащие окисляющее вещество, н. у. к.	5.1	5.1	5111, 5112, 5113	515	100
3545	Изделия, содержащие органический пероксид, н. у. к.	5.2	5.2	5211, 5212, 5213	506	800
3546	Изделия, содержащие токсичное вещество, н. у. к.	6.1	6.1	6111, 6112, 6113	639	200
3547	Изделия, содержащие коррозионное вещество, н. у. к.	8	8	8111, 8112, 8113	836	50
3548	Изделия, содержащие вещество, опасное для окружающей среды, н. у. к.	9	9	9063	906	50
3549	Медицинские отходы категории А, влияющие на человека, твердые, или медицинские отходы категории А, влияющие только на животных, твердые	6.2	6.2	6211, 6212, 6213	623	50

Таблица 8

Прогнозные, гипотетические наименования и классы опасности «самых новых» опасных грузов номеров 3550–3559

Номер ООН	Наименование (предварительное) на основе протокола [19]	Класс опасности
3550	Кобальта дигидроксид, порошок, содержащий не менее 10 % вдыхаемых частиц	9
3550	Батареи натрий-ионные	9
3551	Устройства огнетушащие распыляющие	9
3552	Дисилан, содержащийся в изделиях	3
3553	Галлий, содержащийся в изделиях	8
3554	Трифторметилтетразол-натриевая соль в ацетоне	3
3555	Тетраметиламмония гидроксид, с концентрацией не менее 25 %	8
3556–3558	Транспортные средства с батарейным питанием	9
3559	Аммония нитрат, горячие концентрированные растворы	5.1

номеров ООН 3543–3549 для рассмотрения соответствующими АК – в табл. 7. Объем статьи не позволяет привести обоснование.

В табл. 8 представлены прогнозные, гипотетические наименования и классы опасности «самых новых» опасных грузов № 3550–3559 (предположительно, как попытка рискованного прогноза) на основе рассмотрения протокола [19]. Попытка соотнесения данной совокупности грузов с аварийными карточками будет предпринята нами в следующей работе.

Выводы

С целью гармонизации национальных (внутренних) и международных требований к перевозке новых для железнодорожного транс-

порта Российской Федерации опасных грузов по разработанной ранее нами методике представлены предложения по уточнению и конкретизации параметров перевозки. Они направлены на снижение вероятности аварийных ситуаций на транспорте и «риска неопределенности» при транзитных и мультимодальных перевозках.

Основные результаты касаются опасных грузов генерального списка Организации Объединенных Наций номенклатурных позиций 3474–3549, включенных в список в 2007–2022 гг. Новые грузы относятся к классам и подклассам опасности: 2, 3, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1, 6.1, 6.2, 8 и 9.

Список источников

1. Анализ размера и доли рынка логистики опасных грузов – тенденции роста и прогнозы (2023–2028 гг.) // Mordor Intelligence : [сайт]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/hazardous-goods-logistics-market> (дата обращения: 30.06.2023).
2. Правила перевозок опасных грузов : приложение 2 : к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) : по состоянию на 1 июля 2015 г. : [сборник] : том II / Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД) // Министерство транспорта Российской Федерации : [сайт]. URL: <https://www.mintrans.ru/documents/8/4293> (дата обращения: 30.06.2023).
3. Правила перевозок опасных грузов по железным дорогам. Правила перевозок жидких грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума. Новосибирск : Манускрипт, 2010. 584 с.
4. Рекомендации ООН по перевозке опасных грузов : «Оранжевая книга» : ST/SG/AC.10/1/Rev. 21 : Типовые правила : Vol. I / Организация Объединенных Наций. Нью-Йорк ; Женева, 2019. 506 с. URL: http://zakonrus.ru/asmapp/rec_oon/toc_oon.htm (дата обращения: 30.06.2023).
5. Recommendations on the transport of dangerous goods. Manual of tests and criteria. 7th revised edition. New York ; Geneva, 2019. 581 p.
6. Островский А. М., Медведев В. И., Тесленко И. О. Проблемы перевозки опасных грузов // Транспорт Российской Федерации. 2005. № 2. С. 57–60.
7. Медведев В. И. Методы управления безопасностью перевозочного процесса опасных грузов и пути повышения экологической безопасности на железнодорожном транспорте : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Медведев Владимир Ильич. Новосибирск, 2001. 43 с.
8. 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.
9. Регламент о международной железнодорожной перевозке опасных грузов (РИД) : приложение С : к Конвенции о международных железнодорожных перевозках (КОТИФ) : (Берн, 9 мая 1980 г.) : (в редакции Протокола об изменениях от 3 июня 1999 г.) // Гарант : информационно-правовое обеспечение : [сайт]. URL: <https://base.garant.ru/2568967/7d7b9c31284350c257ca3649122f627b/> (дата обращения: 30.06.2023).
10. Соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ) : том I / Организация Объединенных Наций. Нью-Йорк ; Женева, 2022. 748 с.
11. Европейское соглашение о международной перевозке опасных грузов по внутренним водным путям (ВОПОГ) : том II / Организация Объединенных Наций. Нью-Йорк ; Женева, 2022. 506 с.
12. Международный кодекс морской перевозки опасных грузов (МК МПОГ) / АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота». Санкт-Петербург, 2016. 835 с.
13. Технические инструкции по безопасной перевозке опасных грузов по воздуху : Дос. 9284 : утверждены Советом ИКАО и опубликованы по его решению. [Б. м.] : Международная организация гражданской авиации, 2015–2016. 1106 с.
14. Аварийные карточки на опасные грузы, перевозимые по железным дорогам СНГ, Латвийской Республики, Литовской Республики, Эстонской Республики : утверждены решением 48-го заседания Совета по железнодорожному транспорту 29–30 мая 2008 г. Новосибирск : Манускрипт, 2010. 752 с.
15. Dangerous zone during transportation of dangerous goods by rail / V. Medvedev, Z. Oshchepkov, E. Bogomolova, V. Bogomolov // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116. P. 1186–1196.
16. The problem of new dangerous goods on rail and other transport modes / V. Medvedev, M. Surkov, Z. Oshchepkov, M. Rublev // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 403. P. 547–559.
17. ГОСТ Р 57479–2017. Грузы опасные. Маркировка : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 мая 2017 г. № 455-ст : дата введения 2019-11-01. Москва, 2017.
18. 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 : дата введения 2019-11-01. Москва, 2017.
19. Поправки к двадцать второму пересмотренному изданию Рекомендаций по перевозке опасных грузов, Типовые правила (ST/SG/AC.10/1/Rev.22) : ST/SG/AC.10/50/Add.1 : приложение I : к Докладу Комитета экспертов по перевозке опасных грузов и Согласованной на глобальном уровне системе классификации опасности и маркировки химической продукции о работе его одиннадцатой сессии, Женева, 9 декабря 2022 г. / Организация Объединенных Наций. Женева, 2023.

References

1. Analysis of the Dangerous Goods Logistics Market Size and Share – Growth Trends and Forecasts (2023–2028). *Mordor Intelligence: [site]*. (In Russ.). URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/hazardous-goods-logistics-market>.
2. Rules for the Carriage of Dangerous Goods. Annex 2: to the Agreement on International Goods Transport by Rail. July 1, 2015: collection: Volume II. Organization for Cooperation between Railways. *Ministry of Transport of the Russian Federation: [site]*. (In Russ.). URL: <https://www.mintrans.ru/documents/8/4293>.
3. Rules for Transportation of Dangerous Goods by Rail. Rules for transportation of liquid cargoes in bulk in tank wagons and bunker-type wagons for transportation of oil bitumen. Novosibirsk: Manuscript; 2010. 584 p. (In Russ.).
4. United Nations Organization Recommendations on the Transport of Dangerous Goods: Orange Book: ST/SG/AC.10/1/Review 21. Model Regulations. Volume I. United Nations. New York; Geneva; 2019. 506 p. (In Russ.). URL: http://zakonrus.ru/asmmap/rec_oon/toc_oon.htm.
5. Recommendations on the transport of dangerous goods. Manual of tests and criteria. 7th revised edition. New York; Geneva; 2019. 581 p.
6. Ostrovskiy A. M., Medvedev V. I., Teslenko I. O. Problems of dangerous cargo transportation. *Transport of the Russian Federation*. 2005;(2):57–60. (In Russ.).
7. Medvedev V. I. Methods of safety management of dangerous cargo transportation process and ways of ecological safety increase on the railway transport. Specialty 05.22.08 Transportation Process Management. Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences. Medvedev Vladimir Ilyich. Novosibirsk; 2001. 43 p. (In Russ.).
8. Makhutov N. A., Gadenin M. M., Sokolov A. M., Titov E. Yu. Development of methods for analysis of man-made hazards and risks for railway transport objects. *The Railway Research Institute Bulletin*. 2014;(6):3–12. (In Russ.).
9. Regulations on the International Carriage of Dangerous Goods by Rail. Annex C: to the Convention on International Carriage by Rail. Bern, May 9, 1980. As amended by the Protocol of Amendments of June 3, 1999). *Garant: information and legal support: [site]*. (In Russ.). URL: <https://base.garant.ru/2568967/7d7b9c31284350c257ca3649122f627b/>.
10. Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. Volume I. United Nations. New York; Geneva; 2022. 748 p. (In Russ.).
11. European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways. Volume II. United Nations. New York; Geneva; 2022. 506 p. (In Russ.).
12. International Maritime Dangerous Goods Code (IMDGC). Central Research and Design Institute of Maritime Fleet. Saint Petersburg; 2016. 835 p. (In Russ.).
13. Technical Instructions for the safe transportation of dangerous goods by air. Document 9284. Approved by the ICAO Council and published by its decision. International Civil Aviation Organization; 2015–2016. 1106 p. (In Russ.).
14. Emergency cards for dangerous goods transported by railroads of Russian Federation, the Republic of Latvia, the Republic of Lithuania, the Republic of Estonia. Approved by the decision of the 48th meeting of the Railway Transport Council on May 29–30, 2008. Novosibirsk: Manuscript; 2010. 752 p. (In Russ.).
15. Medvedev V., Oshchepkov Z., Bogomolova E., Bogomolov V. Dangerous zone during transportation of dangerous goods by rail. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1116:1186–1196.
16. Medvedev V., Surkov M., Oshchepkov Z., Rublev M. The problem of new dangerous goods on rail and other transport modes. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022;403:547–559.
17. GOST R 57479–2017. Dangerous goods. Labeling. Approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from May 30, 2017 № 455-st. Date of introduction 2019-11-01. Moscow; 2017. (In Russ.).
18. GOST P 57478–2017. Dangerous goods. Classification. Approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of May 30, 2017 № 454-st. Date of introduction 2019-11-01. Moscow; 2017. (In Russ.).
19. Amendments to the twenty-second revised edition of the Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Model Regulations (ST/SG/AC.10/1/Rev.22): ST/SG/AC/AC.10/50/Add.1. Annex I: to the Report of the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods and on the Globally Harmonized System of Hazard Classification and Labelling of Chemicals on its eleventh session, Geneva, 9 December 2022. United Nations. Geneva; 2023.

Информация об авторах

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

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

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

М. Д. Сурков – аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

Information about the authors

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

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

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

M. D. Surkov – Postgraduate of the Life Safety Department, Siberian Transport University.

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

Статья поступила в редакцию 09.11.2023; одобрена после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 27.11.2023.

The article was submitted 09.11.2023; approved after reviewing 20.11.2023; accepted for publication 27.11.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 59–67.
The Siberian Transport University Bulletin. 2023. No. 4 (67). P. 59–67.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.21

doi 10.52170/1815-9265_2023_67_59

Особенности обследования подводной части опор мостов и русел водотоков современными диагностическими комплексами

Алексей Алексеевич Бондаренко^{1✉}, Алексей Алексеевич Рословец²,
Ольга Михайловна Васильева³

^{1,3} Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

² Центральная дирекция инфраструктуры – филиал ОАО «РЖД» (ЦДИ), Москва, Россия

¹ bondarenko@infotrans-logistic.ru✉

² roslovetasaa@center.rzd.ru@tyuiu.ru

³ olga.vasileva8080@mail.ru

Аннотация. В настоящее время оценка состояния подводной части опор мостов осуществляется, как правило, на основании испытания кернов, выбуренных из подводной части опоры через надводную. О несущей способности сечения площадью несколько десятков квадратных метров приходится судить по прочности единичных кернов, выбуриваемых в основном из центральной части опоры. Оборудование для выбуривания кернов из бетона гидротехнических сооружений непосредственно под водой отечественная промышленность не выпускает.

Наряду с указанным способом применяется диагностика подводной части опор с помощью специалистов центральной водолазной станции. При этом возрастает трудоемкость работ, так как при плохой видимости каждый участок сооружения следует осматривать в несколько приемов. Результаты обследования необходимо передавать на поверхность по телефону и по возможности записывать на диктофон.

На основании полученных данных решается вопрос о возможности дальнейшей эксплуатации опор, обосновании необходимости ремонта подводной части той или иной опоры и очередности ремонта в масштабе дорог и сети в целом. Ошибки в решении этого вопроса могут привести как к необоснованным затратам материальных ресурсов и средств, так и к нарушению безопасности движения.

Оба способа достаточно трудоемки и дороги, а частота обследований не позволяет получать достаточно большое количество статистических данных диагностики, кроме того, возможны ошибки по причине человеческого фактора. С целью сокращения трудоемкости и получения более достоверных и статистически обоснованных данных диагностики возникла необходимость оценки состояния подводной части опор мостов без кернов, выбуренных из подводной части опоры через надводную, и без привлечения водолазов, т. е. современными методами и средствами, одним из которых являются телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА).

В данной статье рассматриваются основные технологические аспекты диагностики подводной части опор мостов с использованием ТНПА. Целью такой диагностики является повышение эффективности обследования подводной части опор, возможность более точной и менее трудоемкой оценки реального состояния опор железнодорожных мостов для окончательного решения вопроса о сроке их службы.

Ключевые слова: диагностика мостов, измерительный контроль, подводная часть опоры, подводный аппарат, размер неисправности, точность диагностики

Для цитирования: Бондаренко А. А., Рословец А. А., Васильева О. М. Особенности обследования подводной части опор мостов и русел водотоков современными диагностическими комплексами // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 59–67. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_59.

Inspection peculiarities of the bridge supports underwater part and watercourse beds by modern diagnostic complexes

Alexey A. Bondarenko^{1✉}, Alexey A. Roslovets², Olga M. Vasilyeva³

^{1,3} Samara State University of Railway Transport, Samara, Russia

² Central Infrastructure Directorate – a branch of Russian Railways, Moscow, Russia

¹ bondarenko@infotrans-logistic.ru✉

² roslovetsaa@center.rzd.ru@tyuiu.ru

³ olga.vasileva8080@mail.ru

Abstract. Currently, the assessment of the state of the bridge supports underwater part is mainly carried out on the basis of testing cores drilled from the underwater part through the surface part of the support. The bearing capacity of a section with an area of several tens of square meters had to be judged by the strength of single cores drilled, as a rule, from the central part of the support. Equipment for drilling cores from concrete of hydraulic structures directly under water is not produced by the domestic industry.

Along with this method, diagnostics of the support underwater part is used using specialists from the central diving station. At the same time, the complexity of the work increases, because in case of poor visibility, each section of the structure should be inspected in several steps. The results of the examination must be transmitted to the surface by telephone, and, if possible, recorded on a voice recorder.

Based on the data obtained, the issue of the possibility of further operation of the supports, justification of the need to repair the underwater part of one or another support and the order of repair on the scale of roads and the network as a whole is being decided. Mistakes in solving this issue can lead to both unreasonable costs of large material resources and funds, and to a violation of traffic safety.

Both methods are quite laborious and expensive, and the frequency of examinations does not allow obtaining a sufficiently large amount of statistical diagnostic data and includes errors from the influence of the human factor.

In order to reduce labor intensity and obtain more reliable and statistically valid diagnostic data, it became necessary to assess the state of the underwater part of the bridge supports without cores drilled from the underwater part through the above-water part of the support, and without the involvement of divers, i.e., using modern methods and means, one of which are remote-controlled uninhabited underwater vehicles (RUUV).

This article discusses the main technological aspects of diagnosing the bridge supports underwater part using RUUV. The purpose of diagnostics of bridge supports using RUUV is to increase the efficiency of surveying the support underwater part, the possibility of a more accurate and less laborious assessment of the real state of railway bridge supports for the final decision on the service life of railway bridge supports.

Keywords: bridge diagnostics, measurement control, support underwater part, underwater vehicle, fault size, diagnostic accuracy

For citation: Bondarenko A. A., Roslovets A. A., Vasilyeva O. M. Inspection peculiarities of the bridge supports underwater part and watercourse beds by modern diagnostic complexes. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):59–67. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_59.

Введение

В настоящее время диагностика искусственных сооружений производится при помощи самого разнообразного диагностического оборудования, например QUANTUM-X, «Тензор» и др., на основании нормативных требований [1–5]. Применяют также беспилотные летательные аппараты для оценки состояния пролетных строений и надводной части опор мостов (рис. 1, а) [6]. Как показал многолетний опыт водолазного обследования, с течением времени в подводной части опор появляются и развиваются повреждения, снижающие их несущую способность. Это происходит в условиях существенного изменения эксплуатационных факторов: растут осевые нагрузки от подвижного состава, скорость и

интенсивность движения, все более широко используются тяжеловесные поезда. В то же время замена пролетных строений старых лет постройки производится на новые с установкой их, как правило, на старые опоры без какого-либо анализа состояния подводной части опор, т. е. в предположении их достаточной надежности.

До настоящего времени использовался способ оценки прочности бетона подводной части опор мостов, основанный на испытаниях кернов, выбуренных из подводной части опоры через надводную. О несущей способности сечения площадью несколько десятков квадратных метров приходилось судить по прочности единичных кернов, выбуриваемых, как правило, из центральной части опоры.

Кроме того, установка буровых станков на опорах эксплуатируемых мостов не всегда возможна. Оборудование для выбуривания кернов из бетона гидротехнических сооружений непосредственно под водой отечественная промышленность не выпускает. Наряду с указанным способом применяется диагностика подводной части опор с помощью специалистов центральной водолазной станции. Эти способы трудоемки и дороги, они не позволяют получать достаточно большое количество данных о прочности материала, могут иметь место ошибки, обусловленные влиянием человеческого фактора.

В таких условиях совершенно очевидна необходимость своевременной оценки состояния подводной части опор мостов современными методами и средствами, т. е. без привлечения водолазов и выбуривания кернов.

Обследование подводной части сооружения должно производиться путем технического осмотра элементов, их измерительного контроля – определения значений установленных геометрических параметров и изучения технического состояния материалов конструкций [7–12]. К подводной части опоры относятся фундамент и часть тела опоры, находящиеся ниже отметки наивысшего уровня воды, а также грунт дна реки в непосредственной близости от опоры.

При выполнении обследований должны быть получены изображения дефектных элементов сооружений или элементов, характеризующих техническое состояние объекта.

Материалы и методы исследования

Обследование подводной части опор искусственных сооружений и русла водотоков с применением современных средств производится в основном телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами – ТНПА (рис. 1, б; 2) [11, 12]. Основным функциональным назначением ТНПА является получение оператором видеоизображения объектов, находящихся в толще или на поверхности воды, посредством перемещения телеуправляемого подводного аппарата, оснащенного видеокамерой. Перемещения и управление режимами работы ТНПА, находящегося под водой, осуществляются по командам с надводного блока управления (рис. 2, 3). Эта работа

может выполняться на перегоне или на станции в разных климатических районах в любое время года, без перерывов в движении поездов («окон»). При этом ограждение места работ сигналами остановки (или уменьшения скорости) не производится, выдается предупреждение на поезда и суда (при интенсивном судоходстве). Работы по диагностике не связаны с ограничением скорости, разрывом рельсовой колеи и не представляют угрозы для безопасного движения поездов.

При включении питания ТНПА происходит тестирование системы и выполняется автоматическая калибровка его движителей.

Для более точного измерения глубины рекомендуется калибровать датчик глубины перед работой, если он не показывает значение «0» на поверхности воды (разброс до 0,1 м допустим при нахождении аппарата на поверхности воды). Калибровку датчика глубины рекомендуется производить через 4–5 мин после включения и нахождения аппарата в воде.

Для равномерного погружения/подъема аппарата предусмотрена опция «фиксация вертикальной скорости». Размер поверхностных разрушений опоры (раковины, сколы, трещины и т. д.) определяется с помощью лазерных указателей, установленных параллельно, на фиксированном расстоянии друг от друга. Отображение и запись данных с камер аппарата, информация о его курсе и глубине, состоянии осветителей, движителей выводится на сенсорный монитор блока управления при помощи программы GNOM ROV CONTROL. Запуск программы выполняется с экрана сенсорного монитора блока управления.

На экране GNOM ROV CONTROL (рис. 4) представлены области для отображения вида с камер аппарата: центральная и угловая. Смена вида камеры выполняется при помощи пульта управления.

При обследовании подводной части опоры необходимо предварительно разбить ее на секции для отслеживания местоположения аппарата относительно опоры, а также корректности локализации выявленных отступлений (рис. 5).

Точность измерений геометрических параметров должна позволить определить их отклонения от проектных значений [2, 3, 8, 9]. Измерение габаритов элементов бетонных



Рис. 1. Инновационные методы диагностики железнодорожной инфраструктуры:
 а – применение беспилотных летательных аппаратов при диагностике мостов; б – применение беспилотных подводных аппаратов при обследовании подводной части мостов



Рис. 2. Подводный аппарат «ГНОМ ПРО» для обследования подводной части инженерных сооружений



Рис. 3. Процесс обследования подводной части русловой опоры

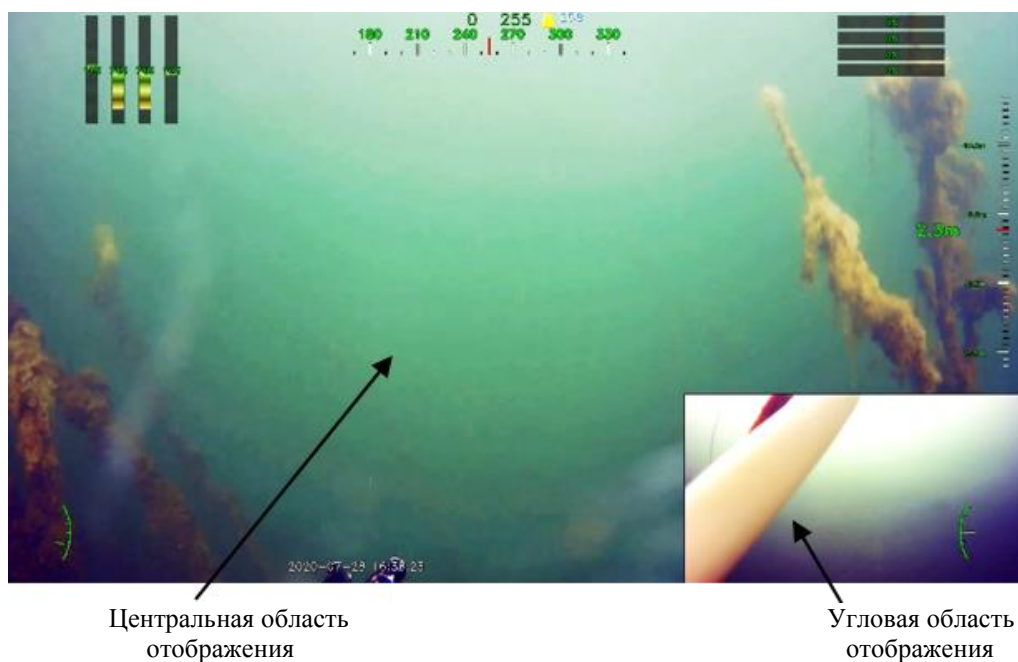


Рис. 4. Области для отображения вида с камер аппарата

и железобетонных конструкций необходимо, как правило, производить с точностью до 10 мм. С такой же точностью определяются размеры дефектов этих конструкций, а также измеряются швы между элементами конструкций. В случаях, когда изменение размеров швов может свидетельствовать о деформации сооружения, точность измерений должна быть повышена до 1 мм. Металлические элементы и прокатные профили следует измерять с точностью до 1 мм.

Посекционное обследование подводной части опоры и прилегающего русла выполняется путем регулировки направления и скорости движения аппарата, яркости освещения, наклона передней камеры (выбор камеры производится в процессе обследования).

Обследование каждой секции опоры должно осуществляться в следующей последовательности:

- погружение аппарата до уровня сопряжения опоры с грунтом в пределах секции для предварительной оценки ее состояния;
- включение видеозаписи;
- подъем аппарата в пределах секции с остановками в зоне обнаружения дефектов для их фиксации.

При этом аппарат следует установить под углом 90° к обследуемой неисправности с целью уменьшения погрешности измерения. Включение/выключение лазерных указателей осуществляется с поста управления оператором комплекса. Размер неисправности L определяется по формуле

$$L = Sl/s,$$

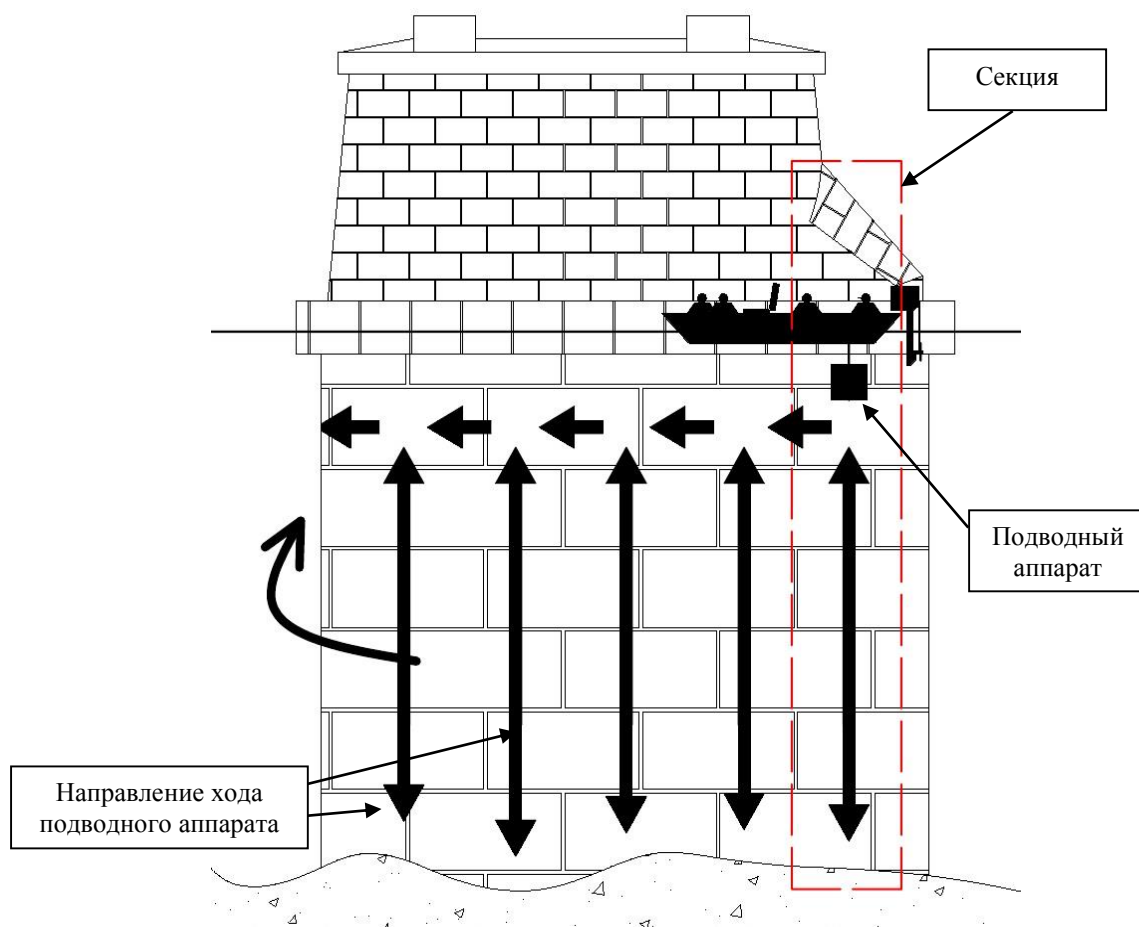


Рис. 5. Обследование секций

где S – натуральное расстояние между лучами лазера, мм; l – размер дефекта на кадре изображения; s – расстояние между лучами лазера на кадре изображения, мм.

При необходимости продолжения обследования опор и участков русла мостового перехода вновь выполняют калибровку, настройку

или переконфигурацию комплекса и при необходимости подключают дополнительные устройства.

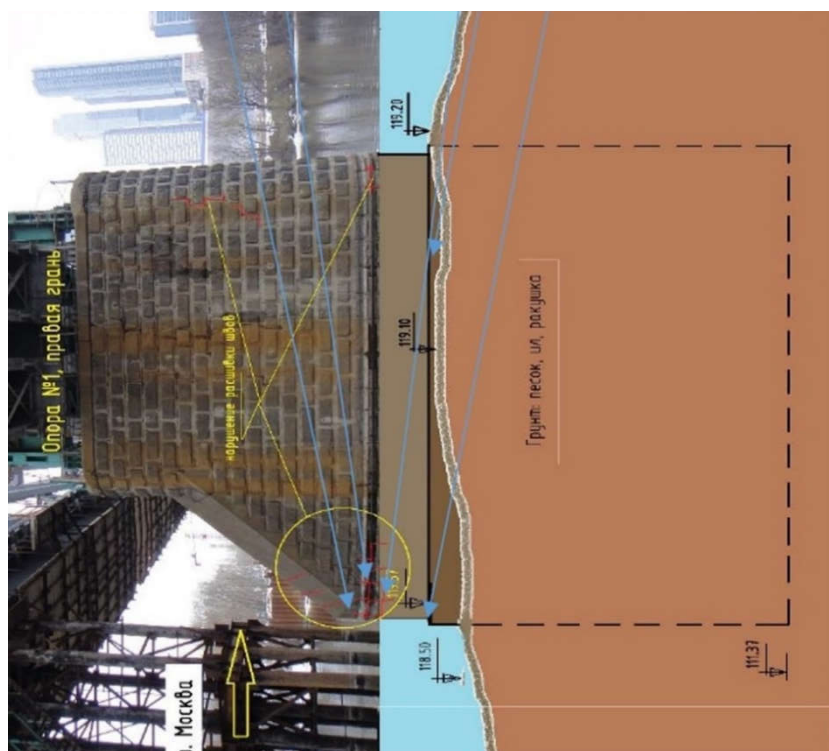
Промежуточные результаты обследования

Некоторые результаты посекционного обследования подводной части опор действующего моста приведены на рис. 6, 7.



Рис. 6. Подводная съемка опоры № 2 (изображение с ТНПА):

a – правая носовая грань, горизонтальная трещина по шву бетонирования; b – правая грань левой по ходу км стойки, угол с поверхностным разрушением бутобетона



Опора № 1. Пустые швы между камнями облицовки ледореза в зоне переменных вод (до 20 см)



Левая носовая часть
сопряжения тела опоры
с фундаментом

Правая грань сопряжения
фундамента с грунтом

Пустой шов между камнями
облицовки в зоне переменных
вод

Рис. 7. Обследование опоры № 1 на действующем мосту ПТОК «ГНОМ»

При обследовании подмостовых русел акваторию по берегам (в пределах видимости) нужно разбить на поперечные створы через 5–10 м выше и ниже по течению от моста [8, 9]. Продольные створы (вдоль реки) отмечаются по пролетным строениям также через 5–10 м, либо по узлам ферм. Таким образом выполняется разбивка русла на участки 5×5 или 10×10 м. Каждый участок русла обследуют поочередно. При значительной ширине акватории (когда не видно береговых вешек) участки русла разбиваются при помощи поплавков с грузами, позволяющими зафиксировать точки.

Обязательным элементом освидетельствования подводной части опор на мостах с размываемым руслом является оценка руслового процесса, выявление и оценка динамики общих размывов, а также динамики и степени опасности местных размывов у опор. Русловой процесс оценивается по данным гидрогеологических наблюдений, в частности, путем сравнения результатов измерения глубин русла в различные моменты времени и сопоставлением этих данных с данными о расходах и уровнях воды в реке.

Расположение воронок местных размывов зависит от конструкции опоры, величины и направления течения относительно опоры. У массивных русловых опор местные размывы, как правило, локализуются в их носовой части.

При измерении глубин должно быть выполнено столько промеров, чтобы полностью оконтурить воронки местных размывов.

При обследовании дна реки у опор необходимо выявлять признаки дефектов, связанных с нарушением общей устойчивости сооружения и работоспособности несущих элементов конструкций. Выявляют выпучины, промоины и просадки грунта, наличие на дне засыпки, вымытой из сооружения, отмечают степень заиле-

ния дна. Фиксируют местоположение посторонних предметов, которые могут препятствовать судоходству, в том числе технологических отсыпок при погрузке-разгрузке камня, щебня, минерально-строительных грузов. При наличии каменной постели проверяют состояние ее откосов и берм. При этом производят промеры ширины берм постели по поперечникам, разбиваемым не реже, чем через 5 м; проверяют крутизну откосов каменной отсыпки и уклон поверхностей берм; производят осмотр каменной постели для выявления недосыпки и пересыпки камня, местных оползней или вымоин в откосах, заиленности.

Выводы

1. Обследование подводной части опор искусственных сооружений и русла водотоков телеуправляемыми подводными аппаратами позволяет минимизировать или полностью исключить выполнение трудоемких работ при выбуривании кернов и работ, выполняемых водолазами; оптимизировать сроки периодических обследований. Например, при обнаружении повреждений, представляющих потенциальную угрозу безопасной эксплуатации опоры, или получении данных об интенсивном развитии разрушений могут быть назначены более частые обследования до устранения указанных повреждений.

2. Точность и объективность оценки состояния опор за счет получения более полной информации при диагностике состояния подводной части опор с использованием ТНПА существенно выше, чем результаты визуального осмотра водолаза, даже самой высокой квалификации. При этом улучшаются условия и повышается производительность обследования за счет перенесения на поверхность части работ, требующих больших затрат времени работы водолазов.

Список источников

1. Инструкция по диагностике и мониторингу технического состояния искусственных сооружений : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 25 марта 2022 г. № 754/р. Москва, 2022. 128 с.
2. Инструкция по содержанию подводной части опор железнодорожных мостов ОАО «РЖД» : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» в декабре 2007 г. Москва, 2008. 48 с.
3. Инструкция по содержанию искусственных сооружений : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2193/р от 02.10.2020 : (В редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 03.11.2021 № 2376/р.). Москва, 2020. 94 с.
4. Инструкция по устройству и конструкции мостового полотна на железнодорожных мостах ОАО «РЖД» : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 28/р от 14 января 2019 г. Москва, 2019. 187 с.
5. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утверждены приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 23 июня 2022 г. № 250. Москва, 2022. 513 с.

6. Догерти Мартин. Дроны. Чехов : Чеховский печатный двор, 2017. 224 с.
7. Содержание и реконструкция мостов и водопропускных труб на железных дорогах : учебник / С. А. Бокарев, Э. С. Карапетов, С. В. Чижов, А. Н. Яшнов. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. 576 с.
8. РД 31.3.3–97. Руководство по техническому контролю гидротехнических сооружений морского транспорта. Москва : Министерство транспорта РФ, 1997. 185 с.
9. РД 31.84.01–90. Единые правила безопасности труда на водолазных работах. Часть 1. Правила водолазной службы. Москва : В/О «Мортехинформреклама», 1992. 357 с.
10. СП 79.13330.2012. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний : актуализированная редакция СНиП 3.06.07–86* : утверждены приказом Министерства регионального развития РФ от 30 июня 2012 г. № 273. Москва, 2012. 37 с.
11. Бондаренко А. А., Васильева О. М., Щенникова Т. В. Диагностика подводной части опор мостов и русел водотоков // Наука и образование транспорту. 2022. № 2. С. 160–163.
12. Телеуправляемый подводный аппарат «ГНОМ» : Руководство по эксплуатации и Руководство оператора : 6574-001-56503411–2022 РЭ. Москва, 2022. 34 с.

References

1. Instruction on diagnostics and monitoring of technical condition of artificial constructions. Approved by order of Russian Railways, March 25, 2022, No. 754/r. Moscow; 2022. 128 p. (In Russ.).
2. Instruction on maintenance of the underwater part of the piers of railway bridges of Russian Railways. Approved by order of Russian Railways in December 2007. Moscow; 2008. 48 p. (In Russ.).
3. Instruction on the Maintenance of Artificial Structures. Approved by Russian Railways Order No. 2193/r dated 02.10.2020 (As amended by Russian Railways Order No. 2376/r dated 03.11.2021). Moscow; 2020. 94 p. (In Russ.).
4. Instruction on the construction and design of the bridge deck on railway bridges of Russian Railways. Approved by Russian Railways Order No. 28/r of January 14, 2019. Moscow; 2019. 187 p. (In Russ.).
5. Rules of technical operation of railroads of the Russian Federation. Approved by the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation from June 23, 2022, No. 250. Moscow; 2022. 513 p. (In Russ.).
6. Martin Daugherty. Drones. Chekhov: Chekhov Printing House; 2017. 224 c. (In Russ.).
7. Bokarev S. A., Karapetov E. S., Chizhov S. V., Yashnov A. N. Maintenance and reconstruction of bridges and culverts on the railroads: a textbook. Moscow: Training and Methodical Center for Education in Rail Transport; 2019. 576 p. (In Russ.).
8. RD 31.3.3-97 Guidance on technical control of hydraulic structures of sea transport. Moscow: Ministry of Transport of Russian Federation; 1997. 185 p. (In Russ.).
9. RD 31.84.01-90. Unified safety rules for diving works. Part I. Diving service rules. Moscow: Mortechninformreklama; 1992. 357 p. (In Russ.).
10. SP 79.13330.2012. Bridges and tubes. Rules of inspection and testing: updated version of SNiP 3.06.07–86*: approved by order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation dated June 30, 2012 No. 273. Moscow; 2012. 37 p. (In Russ.).
11. Bondarenko A. A., Vasilyeva O. M., Schennikova T. V. Diagnostics of the underwater part of bridge piers and watercourse beds. *Science and Education for Transport*. 2022;(2):160–163. (In Russ.).
12. Teleoperated underwater vehicle GNOM Operation Manual and Operator's Manual 6574-001-56503411-2022 RE. Moscow; 2022. 34 p. (In Russ.).

Информация об авторах

- А. А. Бондаренко – доцент кафедры «Железнодорожный путь и строительство» Самарского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.
- А. А. Рословец – заместитель начальника по безопасности движения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» (ЦДИ).
- О. М. Васильева – старший преподаватель кафедры «Железнодорожный путь и строительство» Самарского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

- A. A. Bondarenko – Associate Professor of the Railway Track and Construction Department, Samara State University of Railway Transport, Candidate of Engineering.
- A. A. Roslovet – Deputy Head for Traffic Safety of the Central Infrastructure Directorate – a branch of Russian Railways.
- O. M. Vasilyeva – Senior Lecturer of the Railway Track and Construction Department, Samara State University of Railway Transport.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 29.05.2023; принята к публикации 21.09.2023.

The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 29.05.2023; accepted for publication 21.09.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.04
doi 10.52170/1815-9265_2023_67_68

Теоретическая и экспериментальная оценка динамического отклика пролетного строения при отказе гибкой связи

Павел Олегович Курчанов^{1✉}, Дмитрий Андреевич Ярошутин²,
Дмитрий Александрович Шестовицкий³

^{1,3} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

² Центр компетенции «Мосты», Санкт-Петербург, Россия

¹ pavel-kurchanov@yandex.ru✉

² day.ckmost@gmail.com

³ shestovitsky@mail.ru

Аннотация. В настоящее время в мировой практике мостостроения широкое применение нашли различные комбинированные системы с использованием стальных элементов, воспринимающих только растягивающие усилия. Как показывает опыт эксплуатации, в подобных системах существуют риски разрушения гибкого элемента. Незначительные аварийные воздействия на конкретный элемент могут привести к значительному или же полному разрушению конструкции, что, естественно, сопровождается катастрофическими экономическими и общественными последствиями. Поэтому вопросы расчета мостов в случае внезапного отказа гибкого элемента приобретают большое практическое значение.

В данной статье рассмотрено аварийное воздействие в виде одиночного мгновенного отказа гибкого элемента в комбинированной системе в виде арки с затяжкой. Выполнена экспериментальная проверка динамического отклика модели пролетного строения в случае локального разрушения гибкого элемента; рассмотрены два основных теоретических метода анализа конструкции в случае отказа элемента: упрощенный статический расчет (с коэффициентом динамичности к нагрузке) и прямой динамический анализ; дано сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Показано, что квазистатический расчет, рекомендованный отечественными и зарубежными нормами, не позволяет оценить реальное напряженно-деформированное состояние пролетного строения во времени и возможность прогрессирующего обрушения всей конструкции.

Ключевые слова: пролетное строение, арка с затяжкой, отказ подвески, прогрессирующее разрушение, динамический отклик

Для цитирования: Курчанов П. О., Ярошутин Д. А., Шестовицкий Д. А. Теоретическая и экспериментальная оценка динамического отклика пролетного строения при отказе гибкой связи // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 68–75. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_68.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Theoretical and experimental evaluation of the superstructure dynamic response in case of hanger failure

Pavel O. Kurchanov^{1✉}, Dmitriy A. Yaroshutin², Dmitriy A. Shestovitskiy³

^{1,3} Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia

² Bridges Competence Center, Saint-Petersburg, Russia

¹ pavel-kurchanov@yandex.ru✉

² day.ckmost@gmail.com

³ shestovitsky@mail.ru

Abstract. At present in the world practice of bridge construction, various combined systems are widely used with steel elements exclusively subjected to tensile forces. The analysis of operating experience shows, there is a risk of failure of the flexible element. Such a minor accidental impact on a particular element can lead to considerable

or total failure of the structure, which naturally accompanied by catastrophic economic and social consequences. Therefore, bridges analysis in case of a sudden failure of a flexible element is of great practical importance.

The publication deals with single failure of a flexible element in a tied arch. This article shows the experimental verification of dynamic response of bridge superstructure model in the case of single failure of a flexible element, presents two basic theoretical methods of structural analysis in the case of element failure – a simplified static analysis (with dynamic load factor) and the direct dynamic analysis method, gives the comparison of theoretical and experimental data.

It shown, that quasi-static analysis, recommended by domestic and foreign standards, does not permit exactly the superstructure stress-strain state over time and evaluate the possibility of the whole structure progressive collapse.

Keywords: bridge superstructure, tied arch, hanger failure, progressive collapse, dynamic response

For citation: Kurchanov P. O., Yaroshutin D. A., Shestovitskiy D. A. Theoretical and experimental evaluation of the superstructure dynamic response in case of hanger failure. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):68–75. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_68.

Введение

Предотвращение аварий сооружений остается одним из основных направлений научных исследований в строительной отрасли [1, 2]. Поэтому за последние десятилетия вопрос безопасности конструкций мостов при аварийных воздействиях возникает все чаще. В России проблемы расчета строительных конструкций в условиях появления локального разрушения конструктивного элемента и проблемы возможного развития так называемого прогрессирующего разрушения исследуются пока только применительно к зданиям и сооружениям промышленного и гражданского назначения, но практически не затрагиваются при рассмотрении мостовых сооружений [1, 3]. Однако в нашей стране и за рубежом уже происходили случаи разрушения пролетных строений с гибкими несущими элементами, вызванные обрывом гибкой связи.

В качестве примера внезапного разрушения пролетного строения из-за случайного локального отказа можно привести разрушение моста Нанфангао в Тайване. Строительство моста началось в 1996 г. и было завершено в 1998 г. Мост обрушился 1 октября 2019 г., в результате чего шесть человек погибли, а 12 получили ранения. Совет по безопасности на транспорте Тайваня был назначен ответственной за расследование этого происшествия независимой организацией.

Моделирование, выполненное в рамках специального технического расследования, показало, что максимальное растягивающее усилие в подвесках, вызванное нагрузкой от проходящих транспортных средств, в момент обрушения составляло примерно 39,1 % от предельной расчетной нагрузки. Также расчет

показал, что воздействие от постоянно обращающегося по мосту транспортного потока также не превышало диапазона воздействий расчетной временной нагрузки [4].

Обследование моста после разрушения показало, что в течение эксплуатации в узлы крепления подвесок на затяжке проникала вода, при этом сама конструкция узлов благоприятствовала их обводнению. В результате происходила коррозия отдельных стрендов в подвесках [4].

Расследование не пришло к точному выводу в отношении начального инициирующего разрушения. Вероятнее всего, возник отказ нескольких стрендов вблизи нижнего узла крепления одной из подвесок, что привело к перераспределению усилий и разрушению анкерной колодки в верхнем узле крепления этой подвески (рис. 1).

Далее из-за динамических эффектов и перераспределения усилий разрушения подвесок происходили каскадно, одно за другим. Такой характер разрушения называют прогрессирующим. Поэтому проблема расчета динамического отклика конструкций при мгновенном отказе элементов тесно связана и с проблематикой прогрессирующего обрушения.

Такие случаи говорят о том, что возникновение локальных отказов гибких элементов в вантовой системе пролетного строения следует учитывать при проектировании и полная защита от них принципиально невозможна, так как на систему воздействует множество неблагоприятных факторов, которые невозможно учесть в расчете сооружения.

Изменения, характеризующие на данный момент мостовую строительную отрасль, позволяют говорить об усложнении архитектурных и конструктивных решений, увеличении проле-



Рис. 1. Разрушенная анкерная колодка узла крепления подвески

тов, возрастании интенсивности временных нагрузок и увеличении скоростей движения. Подобные тенденции развития мостовой отрасли приводят к возникновению нетривиальных инженерных решений с акцентом на применение новых материалов и сложных строительно-эксплуатационных систем, мало изученных в области динамических воздействий.

Слабая изученность отклика уникальных мостовых сооружений, в частности на запроектные воздействия, требует повышения уровня ответственности на всех стадиях жизненного цикла, включая и период эксплуатации.

Если в промышленном и гражданском строительстве некоторые аспекты расчетов в случае локального разрушения несущего элемента уже официально закреплены в нормативных документах и ведется их активное развитие, то в нормативных документах в области мостостроения

только недавно появились разделы, посвященные живучести мостов. По этим разделам понятно, что обоснование способности моста противостоять мгновенным отказам элементов осуществляется на основании расчета, однако его алгоритм не приводится.

Основные методы расчета

Абсолютным большинством нормативных документов рекомендуется так называемый квазистатический метод расчета, суть которого заключается в том, что к узлам разрушенной связи прикладывается усилие, которое существовало в этой связи в первоначальной (неразрушенной) системе, но с обратным знаком [5, 6]. Таким образом как бы учитывается динамический эффект внезапного отказа, но система рассчитывается в статической постановке задачи (рис. 2).

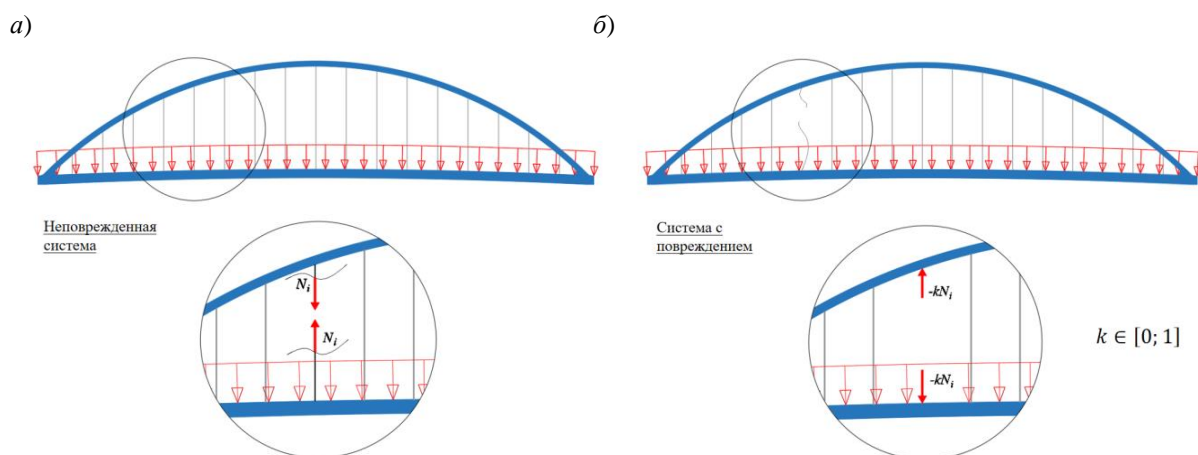


Рис. 2. Схема нормативного квазистатического метода расчета:

а – определение внутренних усилий в гибких связях в неповрежденной системе; *б* – расчет поврежденной системы с дополнительной статической нагрузкой, приложенной к узлам разрушенной связи

Второй способ расчета системы на внезапный отказ – прямой динамический метод. Под этим методом подразумевается решение дифференциального уравнения движения системы во временной области. В случае расчета системы на внезапный отказ гибкой связи рассматривается поврежденная система, к узлам которой прикладывается усилие связи, существовавшее в ней до разрушения, но при этом это усилие принимается зависящим от времени, как показано на рис. 3 [6, 7].

Материалы и методы исследования

Для того чтобы выяснить, как соотносятся динамический и квазистатический методы с динамическим откликом реальной конструкции при отказе элемента, была создана экспериментальная модель, которая представляет собой жесткую п-образную раму, внутри ко-

торой находится плоская модель комбинированного пролетного строения, выполненная из алюминиевой полосы шириной 50 мм и толщиной 2 мм. Арка имеет расчетный пролет 1,2 м и стрелу подъема 0,30 м. Затяжка поддерживается пятью стальными тросами, расположенными с шагом 20 см. Для моделирования постоянных и временных нагрузок к узлам крепления подвесок подвешены наборные грузы. Усилия в подвесках передаются на тензодатчики, прикрепленные к затяжке арки. Для обработки сигнала тензодатчиков во времени применялась тензостанция ZET 017-T8 с частотой дискретизации 250 Гц.

Общий вид экспериментального стенда, измерительный тензодатчик в узле подвески и тензорезистор, входящий в конструкцию датчика, показаны на рис. 4.

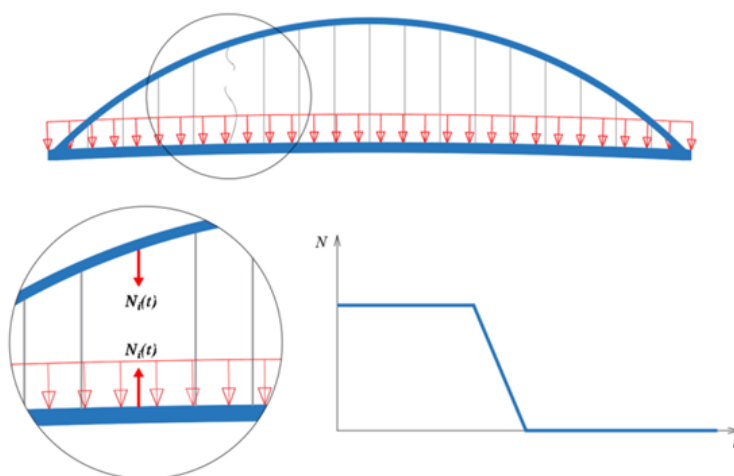


Рис. 3. Схема расчета динамической задачи при отказе гибкого элемента во временной области

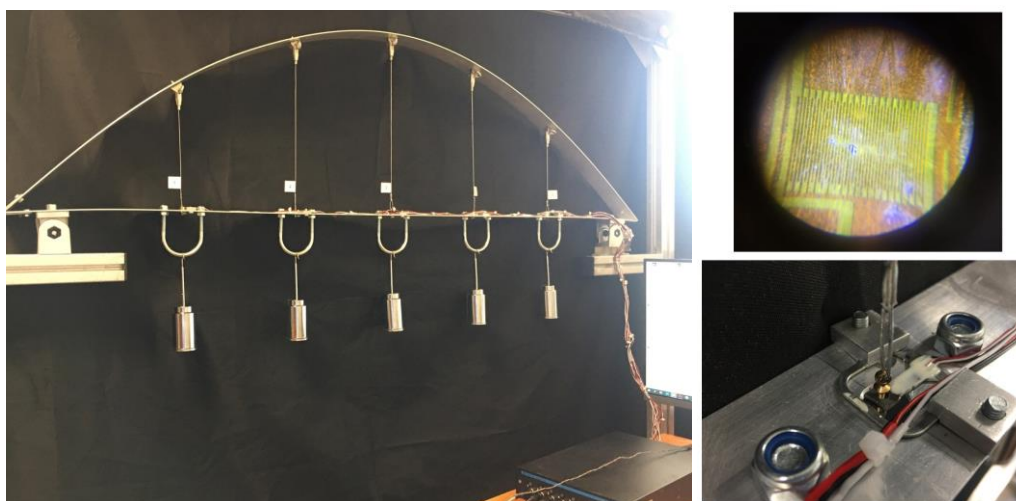


Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки и вид измерительного датчика в узле подвески

Результаты исследования

Сравнение полученных в пространственно-стержневой конечно-элементной модели динамических характеристик в виде значений собственных частот колебаний показало хорошую сходимость с результатами натурных измерений: расхождение составило менее 8 % на всем спектре полученных частот.

На рис. 5 показаны графики изменения во времени осевых усилий в подвесках по результатам экспериментального исследования и моделирования методом МКЭ.

Подобные результаты получены и для других сценариев «разрушения» (отказ подвесок № 2 и 3). По результатам сравнения собственных частот и характера изменения усилий в подвесках доказано соответствие конечно-элементной и экспериментальной моделей. Также в математической модели определены и другие внутренние усилия. Расчет производился как нормативным квазистатическим методом, так и методом решения динамической задачи во временной области. Результаты приведены в таблице.

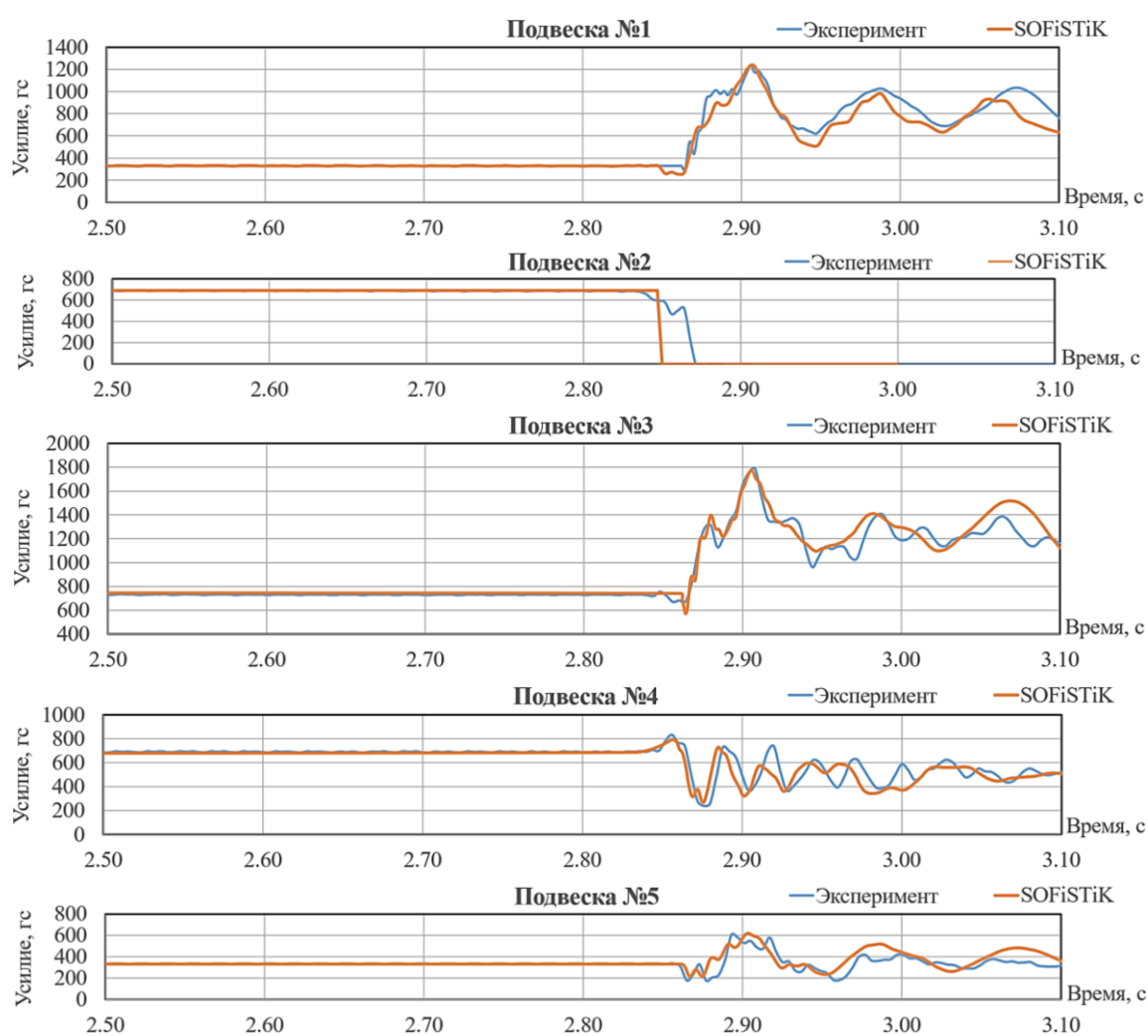


Рис. 5. Изменение усилий во времени по результатам экспериментального исследования и моделирования методом МКЭ

Максимальные усилия в элементах конструкции при отказе подвески

Усилие	Квазистатический расчет	Динамический расчет	Отношение усилий (динамический / квазистатический), %
<i>Максимальные усилия в элементах конструкции при отказе подвески № 1</i>			
$N_{\text{подв}}$, Н	11,74	11,52	98,13
$N_{\text{арка}}$, Н	-24,92	-29,19	117,13
$N_{\text{затяжка}}$, Н	18,90	21,85	115,61
$M_{\text{арка}}$, Н·см	-43,34	-39,61	91,39
$N_{\text{затяжка}}$, Н·см	37,11	34,15	92,02

Усилие	Квазистатический расчет	Динамический расчет	Отношение усилий (динамический / квазистатический), %
<i>Максимальные усилия в элементах конструкции при отказе подвески № 2</i>			
$N_{\text{подв}}, \text{Н}$	17,79	17,48	98,26
$N_{\text{арка}}, \text{Н}$	-27,06	-33,58	124,09
$N_{\text{затяжка}}, \text{Н}$	18,84	28,31	150,27
$M_{\text{арка}}, \text{Н}\cdot\text{см}$	-63,72	-51,81	81,31
$N_{\text{затяжка}}, \text{Н}\cdot\text{см}$	93,75	76,35	81,44
<i>Максимальные усилия в элементах конструкции при отказе подвески № 3</i>			
$N_{\text{подв}}, \text{Н}$	17,69	15,09	85,30
$N_{\text{арка}}, \text{Н}$	-24,28	-31,54	129,90
$N_{\text{затяжка}}, \text{Н}$	18,84	28,25	149,95
$M_{\text{арка}}, \text{Н}\cdot\text{см}$	-69,41	-49,85	71,82
$N_{\text{затяжка}}, \text{Н}\cdot\text{см}$	98,65	73,46	74,47

Примечание. $N_{\text{подв}}$ – максимальное осевое усилие в наиболее нагруженной подвеске; $N_{\text{арка}}$ и $N_{\text{затяжка}}$ – максимальная по абсолютной величине продольная сила в арке и затяжке соответственно; $M_{\text{арка}}$ и $M_{\text{затяжка}}$ – максимальный по абсолютной величине изгибающий момент в арке и затяжке соответственно.

Выводы

Отечественные и зарубежные исследователи приходят к единому мнению о том, что случаи обрушения пролетных строений из-за внезапного разрушения какой-либо локальной области пролетного строения происходят все чаще, конструкции пролетных строений становятся все более сложными и, соответственно, менее изученными. Ряд авторов отмечают принципиальную неустранимость ситуации разрушения какого-либо элемента пролетного строения. Способность пролетного строения воспрепятствовать прогрессирующему разрушению определяется на основании расчета, однако общепринятой методологии расчета пролетных строений на прогрессирующее разрушение в отечественной и зарубежной литературе нет [8–10].

Новые положения в нормативных документах не только не вносят понятных с физической точки зрения положений по расчету пролетных строений мостов на прогрессирующее разрушение при проектировании, но и в некоторых аспектах и формулировках противоречат друг другу [8, 10]. Для определения степени соответствия методик расчета физической сущности явления был использован экспериментальный метод исследования.

По результатам экспериментального и математического моделирования показано, что для сложных систем квазистатический расчет может давать погрешность как в большую сторону (запас прочности), так и в меньшую в пределах от 75 до 150 %.

Это значит, что коэффициент динамики в общем случае зависит от многих параметров и требует уточнения в каждом частном расчетном случае. Для сложных систем предпочтительнее прямой динамический расчет во временной области или расчет методом модальной суперпозиции. Но для реализации этих методик и получения достоверных результатов инженеру необходимы точные рекомендации по настройке конечно-элементной модели и параметров расчета. На данный момент таких рекомендаций не существует.

Также следует отметить, что описанная в данной статье экспериментальная модель имеет ряд недостатков. Во-первых, соотношение геометрических размеров, жесткостей и масс принято произвольным, а значит, модель отражает процессы качественно, без связи с какой-либо реальной конструкцией. Во-вторых, экспериментальная модель располагается в плоскости, в то время как реальные сооружения совершают колебания в пространстве. Поэтому дальнейшее экспериментальное исследование направлено на изучение процессов, протекающих в масштабных моделях реальных сооружений, и определение адекватности вышеуказанных методик реальной физической картине протекающих процессов при различных длинах пролетов, соотношениях жесткостей, масс и других параметров, присущих реальным конструкциям пролетных строений мостов.

Список источников

1. Аварии транспортных сооружений и их предупреждение : учебное пособие для магистрантов направления 08.04.01 «Строительство» : прикладная программа «Искусственные сооружения на транспорте, способы возведения и эксплуатации» / И. И. Овчинников, Ш. Н. Валиев, И. Г. Овчинников, И. С. Шатилов. Чебоксары : Среда, 2020. 216 с.
2. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 / И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников, И. Ю. Майстренко, А. В. Кокодеев // Транспортные сооружения. 2017. № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf> (дата обращения: 10.04.2023).
3. Перельмутер А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. Москва : АСВ, 2007. 256 с.
4. Horgan R. Fatal Taiwan bridge collapse is latest example of maintenance failings // *New Civil Engineer*. 2019. URL: <https://www.newcivilengineer.com/latest/fatal-taiwan-bridge-collapse-is-latest-example-of-maintenance-failings-07-10-2019/> (дата обращения: 10.04.2023).
5. Бирбраер А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения. Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2009. 594 с.
6. Назаров Ю. П., Городецкий А. С., Симбиркин В. Н. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2009. № 4. С. 5–9.
7. Zoli T., Woodward R. Design of long span bridges for cable loss // *IABSE Symposium Report*. 2005. Vol. 90. P. 17–25.
8. Comparison of various procedures for progressive collapse analysis of cable-stayed bridges / J. G. Cai, Y. X. Xu, L. P. Zhuang [et al.] // *Journal of Zhejiang University*. 2012. Vol. 13, No. 5. P. 323–334.
9. Starossek U., Wolff M. Progressive collapse: Design strategies // *IABSE Symposium Report*. 2005. Vol. 90. P. 9–16.
10. Recommendations for stay cable design, testing and installation. 5th Edition. Phoenix : Post-Tensioning Institute, 2008. 112 p.

References

1. Ovchinnikov I. I., Valiev Sh. N., Ovchinnikov I. G., Shatilov I. S. Accidents of transport structures and their prevention: a textbook for undergraduates in the direction 08.04.01 "Construction": the applied program "Artificial structures on transport, methods of construction and operation". Cheboksary: Sreda; 2020. 216 p. (In Russ.).
2. Ovchinnikov I. G., Ovchinnikov I. I., Maystrenko I. Yu., Kokodeev A. V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. *Transport Engineering*. 2017;(4). URL: <https://t-s.today/PDF/08SAT5118.pdf> (In Russ.).
3. Perelmuter A. V. Selected problems of reliability and safety of building structures. Moscow: Deposit Insurance Agency; 2007. 256 p. (In Russ.).
4. Horgan R. Fatal Taiwan bridge collapse is latest example of maintenance failings. *New Civil Engineer*. 2019. URL: <https://www.newcivilengineer.com/latest/fatal-taiwan-bridge-collapse-is-latest-example-of-maintenance-failings-07-10-2019>.
5. Birbraer A. N. Extreme actions on structures. Saint-Petersburg: Polytechnic University; 2009. 594 p. (In Russ.).
6. Nazarov Yu. P., Gorodetskiy A. S., Simbirkin V. N. To the problem of ensuring the survivability of building structures under emergency influences. *Construction mechanics and design*. 2009;(4):5–9. (In Russ.).
7. Zoli T., Woodward R. Design of long span bridges for cable loss. *IABSE Symposium Report*. 2005;90:17–25.
8. Cai J. G., Xu Y. X., Zhuang L. P., Feng J., Zhang J. Comparison of various procedures for progressive collapse analysis of cable-stayed bridges. *Journal of Zhejiang University*. 2012;13(5):323–334.
9. Starossek U., Wolff M. Progressive collapse: Design strategies. *IABSE Symposium Report*. 2005;90:9–16.
10. Recommendations for stay cable design, testing and installation. 5th Edition. Phoenix: Post-Tensioning Institute; 2008. 112 p.

Информация об авторах

П. О. Курчанов – аспирант кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Д. А. Ярошутин – генеральный директор ООО «Центр компетенции “Мосты”».

Д. А. Шестовицкий – доцент кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, кандидат технических наук.

Information about the authors

P. O. Kurchanov – Postgraduate of the Bridges Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

D. A. Yaroshutin – the General Director of the Bridges Competence Center.

D. A. Shestovitskiy – Associate Professor of the Bridges Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 29.05.2023; принята к публикации 21.09.2023.

The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 29.05.2023; accepted for publication 21.09.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 625.072:625.852
doi 10.52170/1815-9265_2023_67_76

Исследование прочности и износостойкости щебеночных материалов, используемых при приготовлении асфальтобетонных смесей

Юрий Александрович Цибариус^{1✉}, Алексей Леонидович Ланис²,
Максим Алексеевич Разуваев³, Алексей Николаевич Бердюгин⁴

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

¹ yustu@yandex.ru[✉]

² lanisal@stu.ru

³ sen@stu.ru

⁴ 2438988@mail.ru

Аннотация. В работе обоснована актуальность исследования процесса абразивного воздействия на асфальтобетонные покрытия в условиях дорожного строительства Новосибирской области и г. Новосибирска, приводящего к образованию дефекта покрытия в виде колеи износа. Отмечено, что существенное влияние на износостойкость асфальтобетонов оказывают прочность и износостойкость входящего в их состав крупного заполнителя – щебня. Таким образом, обусловлена необходимость исследования параметров прочности и износостойкости щебня, в том числе их возможной взаимосвязи между собой, с целью последующего использования полученных результатов при оценке степени влияния данных параметров на износостойкость асфальтобетонов.

Приведены результаты исследований параметров прочности и износостойкости щебеночных материалов, изготовленных из горных пород различного генезиса. В качестве исследуемых параметров щебеночных материалов приняты показатели: «дробимость», «сопротивление дроблению и износу», «микро-Деваль» и «Нордик тест». По результатам проведенных исследований выявлены взаимосвязи и установлены функциональные зависимости между показателями «микро-Деваль», «Нордик тест» и «сопротивление дроблению и износу», обоснована возможность их учета в качестве единого фактора при дальнейших исследованиях процесса абразивного колееобразования асфальтобетонных покрытий при условии учета фактической величины содержания в щебне зерен пластинчатой (лещадной) формы. При этом не выявлены зависимости между показателями «дробимость» и «сопротивление дроблению и износу», а также «дробимость» и «микро-Деваль», что обуславливает необходимость учета показателя «дробимость» в качестве отдельного фактора, способного оказывать влияние на процесс абразивного колееобразования асфальтобетонных покрытий.

Ключевые слова: колея износа, щебень, дробимость, сопротивление дроблению и износу, микро-Деваль, Нордик тест

Для цитирования: Исследование прочности и износостойкости щебеночных материалов, используемых при приготовлении асфальтобетонных смесей / Ю. А. Цибариус, А. Л. Ланис, М. А. Разуваев, А. Н. Бердюгин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 76–83. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_76.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Research of the strength and wear resistance of crushed stone materials used in the preparation of asphalt mixtures

Yuriy A. Tsibarius^{1✉}, Alexey L. Lanis², Maxim A. Razuvaev³, Alexey N. Berdyugin⁴

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

¹ yustu@yandex.ru[✉]

² lanisal@stu.ru

³ sen@stu.ru

⁴ 2438988@mail.ru

Abstract. The article demonstrates the importance of studying the process of abrasion on asphalt concrete surfaces in the conditions of road construction in the Novosibirsk region and Novosibirsk, which leads to the formation of surface defects in the form of wear ruts. It is noted that the strength and wear resistance of the coarse aggregate (crushed stone) included in the composition of asphalt concrete has a significant influence on its wear resistance. Therefore, it is necessary to study the parameters of strength and wear resistance of crushed aggregate, including their possible correlation with each other, in order to use the obtained results to estimate the effect of these parameters on the wear resistance of asphalt concrete.

The results of the studies of strength and wear resistance parameters of crushed stone materials made from rocks of different genesis are presented. The parameters of crushed stone materials studied are accepted as indicators: “crushability”, “crushing and wear resistance”, “micro-Deval” and “Nordic test”. According to the results of the conducted research, the interrelations and functional dependencies between the indicators “micro-Deval”, “Nordic test” and “crushing and wear resistance” have been revealed, as well as the possibility of considering them as a single factor in further research of the rutting process of asphalt concrete pavements, provided that the actual value of plate and flake grains in crushed stone is taken into account. At the same time, there is no relationship between the indicators “crushability” and “crushing and wear resistance”, as well as between the indicators “crushability” and “micro-deval”, which makes it necessary to consider the indicator “crushability” as a separate factor that can influence the process of abrasive rutting of asphalt concrete pavement.

Keywords: wear ruts, crushed stone, crushability, crushing and wear resistance, micro-Deval, Nordic test

For citation: Tsibarius Yu. A., Lanis A. L., Razuvaev M. A., Berdyugin A. N. Research of the strength and wear resistance of crushed stone materials used in the preparation of asphalt mixtures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):76–83. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_76.

Введение

По информации УГИБДД ГУ МВД России по НСО, в 2022 г. доля дорожно-транспортных происшествий на территории Новосибирской области, в которых сопутствующим фактором стало наличие недостатков в состоянии улично-дорожной сети, составила порядка 43 % от их общего количества [1]. Также, согласно данным, приведенным мэрией г. Новосибирска [2], по состоянию на апрель 2021 г. на гарантии у подрядных организаций находились 62 дорожных объекта общей площадью покрытия 1 840 000 м², ремонтные работы на которых выполнялись в период с 2017 по 2020 г. в рамках реализации национального проекта «Безопасные и качественные дороги». По результатам комиссионного обследования указанных объектов, проведенного в апреле 2021 г. специалистами департамента транспорта и дорожно-бла-

гоустроительного комплекса мэрии г. Новосибирска совместно с представителями Министерства транспорта Новосибирской области, Федерального управления автомобильных дорог, Общероссийского народного фронта, было выявлено 261 замечание, отнесенное к гарантийным случаям. В качестве основного замечания по объектам 2017–2019 гг. отмечено образование дефекта в виде колеи покрытия (рис. 1).

Выявленные дефекты по своей разновидности относятся к колее износа [3]. Причиной появления данного дефекта является абразивное воздействие на покрытие со стороны автомобильного транспорта с шипованной резиной в осенне-зимне-весенний период. Исследование данного процесса в условиях дорожного строительства Новосибирской области и г. Новосибирска является актуальным.

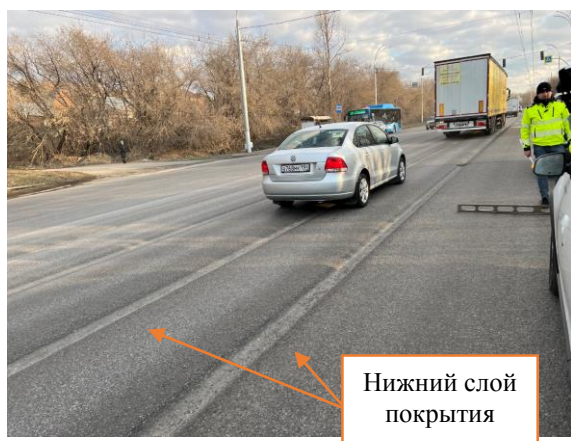


Рис. 1. Колея покрытия на объекте, находящемся в эксплуатации 3,5 года (величина износа более 6 см)

Колея износа является одним из наиболее трудно прогнозируемых дефектов проезжей части [4–6], так как износостойкость асфальтобетона обуславливается целым рядом факторов, внутренних и внешних [5]. Для обеспечения эффективности результатов исследование данного процесса необходимо осуществлять поэтапно, с учетом максимально возможного количества факторов, а также их сочетания.

В исследованиях отечественных и зарубежных ученых отмечено, что существенное влияние на износостойкость асфальтобетонных смесей оказывает прочность и износостойкость входящего в их состав крупного заполнителя – щебня [4, 5, 7, 8, 9–12]. Исследование параметров прочности и износостойкости щебня, в том числе их возможной взаимосвязи, является обязательным для проведения последующей оценки степени их влияния на износостойкость асфальтобетона.

Анализ требований нормативной документации

В рамках исследования предварительно проведен анализ требований действующей нормативной документации (ГОСТ Р 58401.1–2019 (смеси типа SP), ГОСТ Р 58401.2–2019 (смеси типа SMA), ГОСТ Р 58406.1–2020 (смеси типа ЦМА), ГОСТ Р 58406.2–2020 (смеси вида В)), предъявляемых к характеристикам прочности и износостойкости щебня из осадочных, изверженных и метаморфических пород, который используется для приготовления асфальтобетонных смесей верхних слоев покрытий, подверженных абразивному износу в процессе эксплуатации.

В части предъявляемых нормативных требований необходимо отметить следующее:

- требования к марке щебня по показателю «сопротивление дроблению и износу», установленные ГОСТ Р 58401.1–2019 и ГОСТ Р 58401.2–2019, ниже требований, установленных ГОСТ Р 58406.1–2020 и ГОСТ Р 58406.2–2020 при схожих условиях движения;

- ГОСТ Р 58401.1–2019 и ГОСТ Р 58401.2–2019 не предусмотрены требования к сопротивлению истираемости щебня по показателю «микро-Деваль» несмотря на то, что асфальтобетонные смеси по данным ГОСТам применяются на дорогах с наибольшими эксплуатационными нагрузками;

- требования к сопротивлению истираемости щебня по показателю «микро-Деваль» установлены ГОСТ Р 58406.1–2020 и ГОСТ Р 58406.2–2020 в качестве дополнительных и не предъявляются на объектах дорожного строительства по умолчанию, т. е. без указания данного требования в проектной или договорной документации;

- указанными нормативными документами не установлены требования к устойчивости к истиранию щебня шипованными шинами по показателю «Нордик тест».

Перечисленные недостатки исключают возможность проектирования составов асфальтобетонных смесей, устойчивых к абразивному износу в условиях Новосибирской области и г. Новосибирска, только на основании требований данных нормативных документов, которые должны рассматриваться в качестве минимально необходимых, но недостаточных критериев выбора подходящего вида крупного заполнителя асфальтобетонных смесей.

С целью минимизации вероятности появления дефектов покрытия в виде колеи износа в межремонтные сроки необходима разработка региональных строительных норм и/или типовых условий контрактов, дополняющих требования ГОСТов, в том числе в части установления нормируемых значений показателей прочности и износостойкости щебня, входящего в состав асфальтобетонных смесей, для объектов с высокой интенсивностью движения. В ряде регионов и городов РФ (г. Санкт-Петербург, Республика Татарстан и т. д.) внедрение указанных дополнительных требований уже дало положительный эффект в части уменьшения абразивного износа верхних слоев покрытия [4, 7].

Методика и результаты проведения исследований

В научно-исследовательской лаборатории «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» СГУПС выполнены исследования параметров прочности и износостойкости щебня фр. 8–16, изготовленного из горных пород различного генезиса. В качестве исследуемых параметров щебня приняты показатели: «дробимость», «сопротивление дроблению и

износу», «микро-Деваль», «Нордик тест». Выбор параметров обусловлен требованиями существующих нормативных документов и анализом результатов исследований, проведенных отечественными и зарубежными учеными [4, 7, 8, 9–12].

Марка щебня по показателю «дробимость» определена по методике ГОСТ 33030–2014 по степени разрушения его зерен при сжатии в цилиндре.

Марка щебня по показателю «сопротивление дроблению и износу» определена по методике ГОСТ 33049–2014 по потере массы пробы щебня, под которой фактически понимается степень его разрушения, возникающая при воздействии ударных нагрузок от стальных шаров и истирающих усилий (рис. 2, а). Оценка износостойкости щебня по данному показателю является основной в соответствии с действующей нормативной документацией на асфальтобетонные смеси.

Многие отечественные и зарубежные исследователи отмечают [4], что методы испытания, использующие крупную абразивную нагрузку, к которым относится испытание щебня в полочном барабане, не дают подходящую для условий дорожного строительства качественную оценку износостойкости щебня. Поэтому в мировой практике широкое распространение получил метод оценки сопротивления истираемости щебня по показателю «микро-Деваль» (см. рис. 2, б), в процессе ко-

торого проба щебня подвергается воздействию более мелкой абразивной нагрузки в водной среде. Сопротивление истираемости щебня по показателю «микро-Деваль» определено согласно методике ГОСТ 33024–2014 по потере массы пробы щебня (степени разрушения его зерен), возникающей в процессе трения зерен материала, стальных шаров и воды.

В ряде стран также широко распространена оценка устойчивости к истиранию щебня шипованными шинами по показателю «Нордик тест». Порядок проведения испытаний и шкала оценки щебня по данному показателю регламентированы ПНСТ 510–2020.

Так как методика оценки устойчивости к истиранию щебня шипованными шинами по показателю «Нордик тест» схожа с методикой испытания сопротивления истираемости щебня по показателю «микро-Деваль», авторами была выдвинута гипотеза о возможном наличии взаимосвязи указанных показателей. Для проверки гипотезы проведен регрессионный анализ данных, полученных ГКУ «Главтатдортранс» и КГАСУ в 2019 г. [4], о величинах относительных потерь масс щебеночных материалов различного генезиса (осадочных, магматических, метаморфических) при их испытаниях по показателям «Нордик тест» и «микро-Деваль», в результате которого авторами установлена полиномиальная функциональная зависимость между указанными показателями (рис. 3).

а)



б)



Рис. 2. Испытательное оборудование, использованное при проведении исследований износостойкости щебня: а – полочный барабан; б – установка «Микро-Деваль»

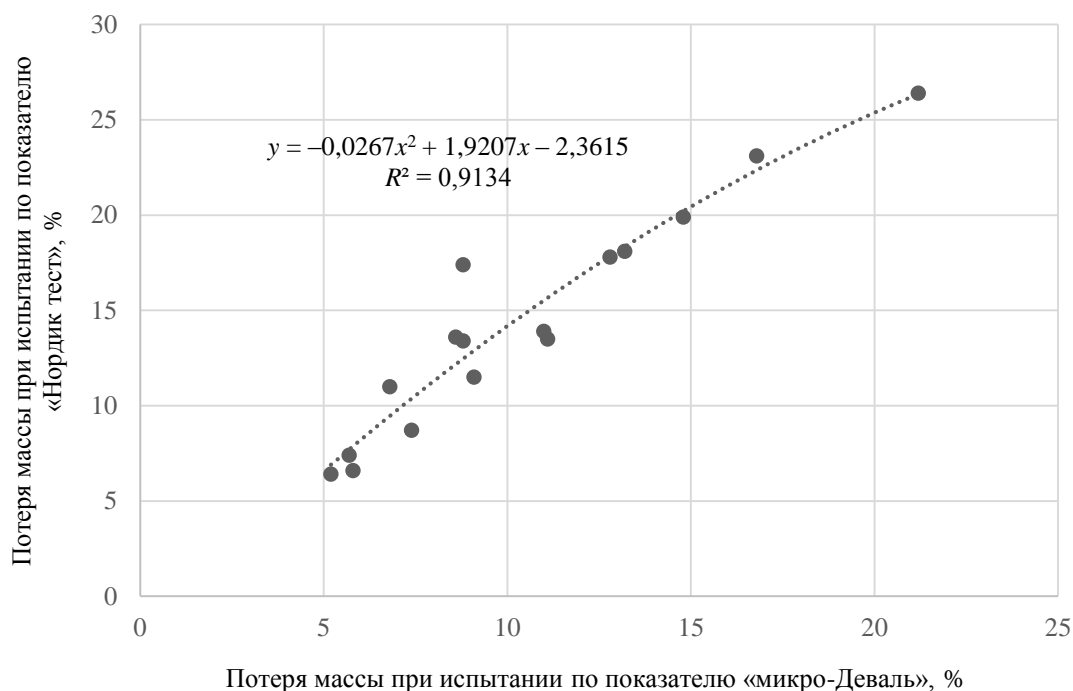


Рис. 3. Зависимость между потерями масс щебня при испытаниях «Нордик тест» и «микро-Деваль»

Полученная зависимость имеет следующий вид:

$HT = -0,0267 MD^2 + 1,9207 MD - 2,3615$, (1)
где HT – потеря массы в результате испытания «Нордик тест», %; MD – потеря массы в результате испытания «микро-Деваль», %.

Величина коэффициента детерминации для данной зависимости составляет $R^2 = 0,9134$, что соответствует фактическому значению критерия Фишера $F_{\text{факт}} = 68,56$ при его табличном значении $F_{\text{табл}}(0,01; 2; 13) = 3,80$. Так как $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, можно сделать вывод о возможности использования данной зависимости при расчете прогнозируемой величины потери массы для оценки устойчивости щебня к истиранию шипованными шинами по показателю «Нордик тест» через показатель «микро-Деваль» при заданном уровне значимости $\alpha = 0,01$.

Рядом авторов [4, 5, 7] отмечается существенное влияние формы зерен щебня на величину оцениваемых в рамках данной работы показателей. По этой причине были проведены дополнительные испытания по определению содержания зерен пластинчатой (лещадной) формы в испытываемых образцах щебня по методике ГОСТ 8269.0–97. Результаты проведенных исследований приведены в таблице.

При проведении регрессионного анализа результатов проведенных исследований полу-

чены функциональные зависимости между величинами потерь масс при испытаниях на дробимость и на дробление и износ, а также на дробимость и по микро-Девалью с максимальными значениями коэффициентов детерминации R^2_{max} 0,7107 и 0,6885, чему соответствуют фактические значения критерия Фишера $F_{\text{факт}}$ 7,37 и 6,63 при его табличном значении $F_{\text{табл}}(0,01; 2; 6) = 10,92$. Так как $F_{\text{факт}} < F_{\text{табл}}$, в обоих случаях можно сделать вывод о нецелесообразности использования данных зависимостей при заданном уровне значимости $\alpha = 0,01$. Данный факт обусловлен существенно различающимся характером силового воздействия на испытываемый материал в процессе указанных испытаний.

При сопоставлении величин относительных потерь масс щебня при испытаниях на дробление и износ и по микро-Девалью выявлена функциональная зависимость между соотношением данных параметров и величиной содержания зерен пластинчатой (лещадной) формы в испытываемых образцах (рис. 4).

Данная зависимость имеет следующий вид:

$$ДИ / MD = 0,0026 CL^2 - 0,0553 CL + 1,1768, \quad (2)$$

где $ДИ$ – потеря массы в результате испытания на дробление и износ, %; CL – содержание зерен пластинчатой (лещадной) формы, %.

Результаты проведенных исследований

Карьер	Характеристика породы (генезис пород)	Дробимость		Дробление и износ		Микро-Деваль*		Нордик тест**		Содержание зерен пластинчатой (лещадной) формы, %
		Потеря массы, %	Марка	Потеря массы, %	Марка	Потеря массы, %	Марка	Потеря массы, %	Марка	
1	Мраморизованный известняк	12,1	1000	26,2	И4	23,4	МД4	28,0	НТ30	18,0
2	Базальтовые и диабазовые порфиры	3,5	1400	11,6	И1	14,6	МД2	20,0	НТ30	13,7
3	Диабаз	1,8	1400	7,0	И1	8,9	МД1	12,6	НТ14	10,1
4	Базальтовый порфирит и альбитофир	7,8	1400	16,8	И2	7,4	МД1	10,4	НТ14	34,0
5	Гранит	9,7	1200	35,1	И5	15,2	МД3	20,7	НТ30	30,8
6	Альбитофир	6,6	1400	14,9	И1	6,3	МД1	8,7	НТ10	35,4
7	Диабаз	2,1	1400	13,2	И1	14,2	МД2	19,5	НТ30	10,3
		2,2	1400	13,3	И1	14,0	МД2	19,3	НТ30	9,1
8	Гранитоиды и роговики	8,3	1400	22,4	И3	13,6	МД2	18,8	НТ19	30,8

* Сопротивление истираемости по показателю «микро-Деваль».

** Устойчивость к истиранию шипованными шинами по показателю «Нордик тест», определенная расчетным методом.

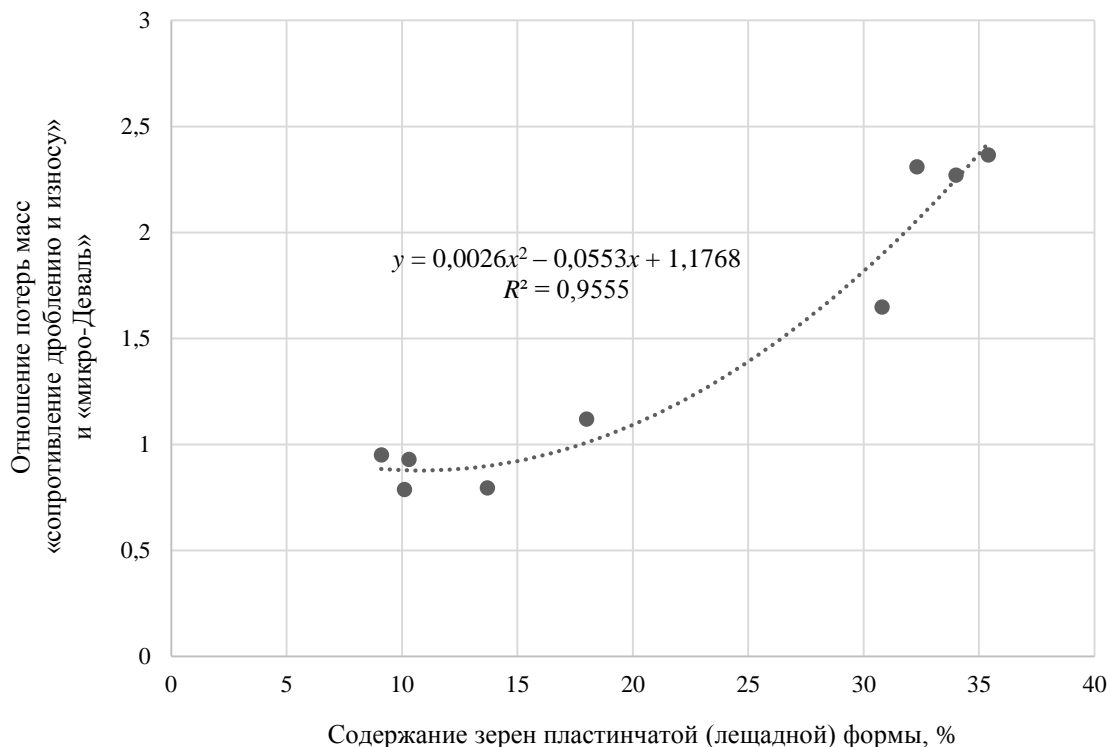


Рис. 4. Зависимость между отношением потерь масс щебня при испытаниях по показателям «сопротивление дроблению и износу» и «микро-Деваль» и содержанием зерен пластинчатой (лещадной) формы

Величина коэффициента детерминации для данной зависимости составляет $R^2 = 0,9555$, что соответствует фактическому значению критерия Фишера $F_{\text{факт}} = 64,42$ при его табличном значении $F_{\text{табл}}(0,01; 2; 6) = 10,92$. Так как $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, гипотеза о наличии взаимосвязи показателей сопротивления щебня дроблению и износу и истиранию по показателю «микро-Деваль» подтверждается при учете фактической величины содержания в щебне зерен пластинчатой (лещадной) формы при заданном уровне значимости $\alpha = 0,01$.

Заключение

В научно-исследовательской лаборатории «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» СГУПС выполнены исследования параметров прочности и износостойкости щебня фр. 8–16, изготовленных из горных пород различного генезиса.

Авторами получены функциональные зависимости с достаточной величиной достоверности аппроксимации, отражающие взаимосвязь

величин потерь масс при испытаниях щебня на сопротивление дроблению и износу, сопротивление истираемости по показателю «микро-Деваль», устойчивость к истиранию шипованными шинами по показателю «Нордик тест». Факт выявления данных взаимосвязей обосновывает возможность учета в качестве влияющего фактора только одного (из трех) из нормируемых показателей износостойкости щебня при дальнейших исследованиях процесса абразивного колееобразования асфальтобетонных покрытий, при условии учета фактической величины содержания в щебне зерен пластинчатой (лещадной) формы.

Функциональная зависимость между величинами потерь масс при испытаниях на дробимость и износостойкость отсутствует. Таким образом, показатель «дробимость» щебня должен рассматриваться в качестве отдельного фактора при дальнейших исследованиях процесса абразивного колееобразования асфальтобетонных покрытий.

Список источников

1. УГИБДД ГУ МВД России по НСО: Аварийность на дорогах за 8 месяцев 2022 года // Новосибирск : [сайт]. URL: <https://novolugovoe.nso.ru/news/1442> (дата обращения: 08.11.2022).
2. В мэрии определили участки дорог для гарантийного ремонта // Официальный сайт города Новосибирска. URL: <https://novo-sibirsk.ru/news/278513> (дата обращения: 19.09.2022).
3. Ковалев Д. И., Шайхутдинова Р. А. Проблемы колееобразования на автомобильных дорогах // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9, № 1. URL: <http://https://t-s.today/10SATS122.html> (дата обращения: 01.02.2023).
4. Гайфутдинов Р. Ф., Хафизов Э. Р. Апробация существующих методов оценки износостойкости щебня на примере каменных материалов, используемых в Республике Татарстан // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4 (50). С. 427–434.
5. Леднев А. В. Анализ факторов, влияющих на износостойкость асфальтобетона // Инженерный вестник Дона: сетевой научный журнал. 2018. № 1. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4699> (дата обращения: 19.01.2023).
6. Лугов С. В., Каленова Е. В. Возможности расчетной оценки износа покрытий при прогнозировании колееобразования // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2013. № 4 (35). С. 53–59.
7. Система контроля износостойкости крупного заполнителя асфальтобетонных смесей и оценка факторов, влияющих на абразивную стойкость щебня / Р. Ф. Гайфутдинов, Г. Ф. Баймухаметов, Т. Ф. Гусманова, Э. Р. Хафизов // Дороги и мосты. 2020. № 2 (44). С. 231–253.
8. Гайфутдинов Р. Ф., Хафизов Э. Р. Исследование абразивного износа щебня для автомобильных дорог // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. № 1 (51). С. 128–137.
9. Analysis of coarse aggregate performance based on the modified Micro Deval abrasion test / J. Wu, Y. Hou, L. Wang [et al.] // International Journal of Pavement Research and Technology. 2017. Vol. 11, iss. 2. P. 185–194.
10. Evaluation of aggregate resistance to wear with Micro-Deval test in combination with aggregate imaging techniques / D. Wang, H. Wang, Y. Bu [et al.] // Wear. 2015. Vol. 338/339. P. 288–296.
11. Gökalp İ., Uz V. E., Saltan M. Testing the abrasion resistance of aggregates including by-products by using Micro Deval apparatus with different standard test methods // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 123. P. 1–7.
12. Tanyu B. F., Yavuz A. B., Ullah S. A parametric study to improve suitability of microdeval test to assess unbound base course aggregates // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 147. P. 328–338.

References

1. State Traffic Police Department of the Ministry of Internal Affairs of Russia in Novosibirsk Region: Road accident rate for 8 months of 2022. *Novosibir: [site]*. (In Russ.). URL: <https://novolugovoe.nso.ru/news/1442>.
2. The mayor's office has identified road sections for warranty repairs. *Official website of the city of Novosibirsk*. (In Russ.). URL: <https://novo-sibirsk.ru/news/278513>.
3. Kovalev D. I., Shaikhutdinova R. A. Problems of rutting on auto-mobile roads. *Transport Structures*. 2022;9(1). (In Russ.). URL: <http://t-s.today/10SAT5122.html>.
4. Gaifutdinov R. F., Khafizov E. R. Approbation of existing methods of evaluation of rubble wear resistance by the example of stone materials used in the Republic of Tatarstan. *Proceedings of Kazan State University of Architecture and Construction*. 2019;(50):427–434. (In Russ.).
5. Lednev A. V. Analysis of factors influencing the wear resistance of asphalt concrete. *Engineering Herald of the Don: electronic scientific journal*. 2018;(1). (In Russ.). URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4699>.
6. Lugov S. V., Kalenova E. V. Possibilities of calculation estimation of pavement wear for rutting prediction. *Bulletin of Moscow State Automobile and Road Technical University*. 2013;(35):53–59. (In Russ.).
7. Gaifutdinov R. F., Baimukhametov G. F., Gusmanova T. F., Khafizov E. R. Wear resistance control system for coarse aggregate of asphalt concrete mixtures and evaluation of factors influencing abrasion resistance of crushed stone. *Roads and Bridges*. 2020;(44):231–253. (In Russ.).
8. Gaifutdinov R. F., Khafizov E. R. Study of abrasion of crushed stone for highways. *Proceedings of Kazan State Architectural and Construction University*. 2020;(51):128–137. (In Russ.).
9. Wu J., Hou Y., Wang L., Guo M., Meng L., Xiong H. Analysis of coarse aggregate performance based on the modified Micro Deval abrasion test. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017;11(2):185–194.
10. Wang D., Wang H., Bu Y., Schulze C., Oeser M. Evaluation of aggregate resistance to wear with Micro-Deval test in combination with aggregate imaging techniques. *Wear*. 2015;338/339:288–296.
11. Gökalp İ., Uz V. E., Saltan M. Testing the abrasion resistance of aggregates including by-products by using Micro Deval apparatus with different standard test methods. *Construction and Building Materials*. 2016;123:1–7.
12. Tanyu B. F., Yavuz A. B., Ullah S. A parametric study to improve suitability of microdeval test to assess unbound base course aggregates. *Construction and Building Materials*. 2017;147:328–338.

Информация об авторах

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

А. Л. Ланис – заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.

М. А. Разуваев – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство», инженер научно-исследовательской лаборатории «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения.

А. Н. Бердюгин – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство», ведущий инженер по надзору за строительством научно-исследовательской лаборатории «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

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

A. L. Lanis – Head of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.

M. A. Razuvaev – Postgraduate of the Track and Track Facilities Department, Engineer of Research Laboratory “Quality Control of Pavements and Earthbeds”, Siberian Transport University.

A. N. Berdyugin – Postgraduate of the Track and Track Facilities Department, Lead construction supervision engineer of Research Laboratory “Quality Control of Pavements and Earthbeds”, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 29.05.2023; принята к публикации 21.09.2023.

The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 29.05.2023; accepted for publication 21.09.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.195
doi 10.52170/1815-9265_2023_67_84

Численные методы при определении горного давления в скальных и дисперсных грунтах

Ярослав Олегович Стахнёв^{1✉}, Константин Валерьевич Королев²

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

¹ yaroslav.stakhnov.95@mail.ru✉

² korolev_kv@mail.ru

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены численные методы решения задачи, посвященной определению горного давления, при помощи аппаратов, базирующихся на методе конечных элементов и на так называемом методе предельного анализа, который в настоящее время получает все большую популярность и реализуется в ряде программных комплексов. Широкое распространение нового метода объясняется тем, что в отличие от метода конечных элементов (в классическом его понимании) в методе предельного анализа реализованы уравнения равновесия и закон прочности грунта напрямую. Важный вопрос при проведении любых численных расчетов, как по методу конечных элементов, так и по методу предельного анализа, заключается в определении модели поведения грунта на предельной стадии работы. Если с поведением дисперсных грунтов все относительно просто: в этом случае применяется идеальная упругопластическая модель с критерием разрушения Кулона – Мора, основными характеристиками которой являются угол внутреннего трения грунта φ и удельное сцепление грунта c , то с поведением скальных грунтов возникают вопросы. В данной работе в качестве критерия разрушения принят критерий Хоука – Брауна, основным параметром которого является R_c – предел прочности грунта на одноосное сжатие. Выполнено сравнение результатов численных расчетов с методикой расчета горного давления, предложенной авторами в ранее опубликованных статьях. Установлено, что результаты, полученные в ходе конечно-элементного расчета, дают качественно неправдоподобную картину. Кроме того, выполнена проверка равновесия конечно-элементной модели.

Ключевые слова: свод обрушения, подземное сооружение, горная выработка, горное давление, грунтовый массив, метод конечных элементов, метод предельного анализа

Для цитирования: Стахнёв Я. О., Королев К. В. Численные методы при определении горного давления в скальных и дисперсных грунтах // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 84–91. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_84.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Numerical methods for determining rock pressure in rocky and dispersed soils

Yaroslav O. Stakhnov^{1✉}, Konstantin V. Korolev²

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

¹ yaroslav.stakhnov.95@mail.ru✉

² korolev_kv@mail.ru

Abstract. This article discusses numerical methods for solving the problem of determining rock pressure using devices based on the finite element method and the so-called limit analysis method, which is currently becoming increasingly popular and is implemented in a number of software systems. Such popularity of the new method is explained by the fact that, unlike the finite element method in its classical sense, the equilibrium equations and the law of soil strength are implemented directly in the method of limit analysis. An important issue in carrying out any numerical calculations, both by the finite element method and by the method of limit analysis, is to determine the behavior model of the soil at the limit stage of work. If everything is relatively simple with the behavior of dispersed soils, in this case an ideal elastic-plastic model with the Mohr-Coulomb destruction criterion is used, the main characteristics of which are φ – the angle of internal friction of the soil and c – the specific adhesion of the soil, then

questions arise with the behavior of rocky soils. In this paper, the Hoek-Brown criterion is adopted as the criterion of destruction, the main parameters of which are R_c – the strength limit of the soil for uniaxial compression. In addition, in this work, the results of numerical calculations were compared with the method of calculating rock pressure proposed by the authors in previously published articles. It was found that the results obtained during the finite element calculation give a qualitatively implausible picture. In addition, in this work, the equilibrium of the finite element model was checked.

Keywords: arch collapse, underground structure, mining, rock pressure, soil mass, finite element method, limit analysis method

For citation: Stakhnyov Ya. O., Korolev K. V. Numerical methods for determining rock pressure in rocky and dispersed soils. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):84–91. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_84.

Введение

Ранее авторами были предложены схемы к определению горного давления в скальных, полускальных и дисперсных грунтах [1–4]. С учетом того что в современном мире большинство задач геотехники решаются численными методами [5–8], вопрос о правильности их решений как никогда актуален. Тем не менее следует отметить, что в мировой практике ранее уже рассматривались подобные задачи [9, 10].

Методика исследования

Расчетная модель

Рассмотрена следующая задача. По нижней грани прямоугольника со сторонами 40×20 м расположено отверстие пролетом 2 м, моделирующее плиту перекрытия подземного сооружения (рис. 1). По низу перекрытия задается нагрузка, величина которой равна весу столба грунта, находящегося над плитой перекрытия, и составляет γh .

Расчет выполняется постадийно. На первой стадии моделируется начальное напряженное состояние. По окончании расчета первой стадии все деформации обнуляются. На второй стадии нагрузка P уменьшается с первоначального значения, равного весу столба грунта γh , который находится над замком плиты перекрытия, до нуля с шагом $\gamma h / 20$.

В качестве модели поведения скального грунта используется идеальная упругопластическая модель с критерием разрушения *Hoek – Brown*:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = R_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{R_c} + s \right)^a, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – главные напряжения на предельной стадии работы грунта; R_c – предел прочности грунта на одноосное сжатие; m_b , s , a – коэффициенты, зависящие от GSI – геологического индекса прочности.

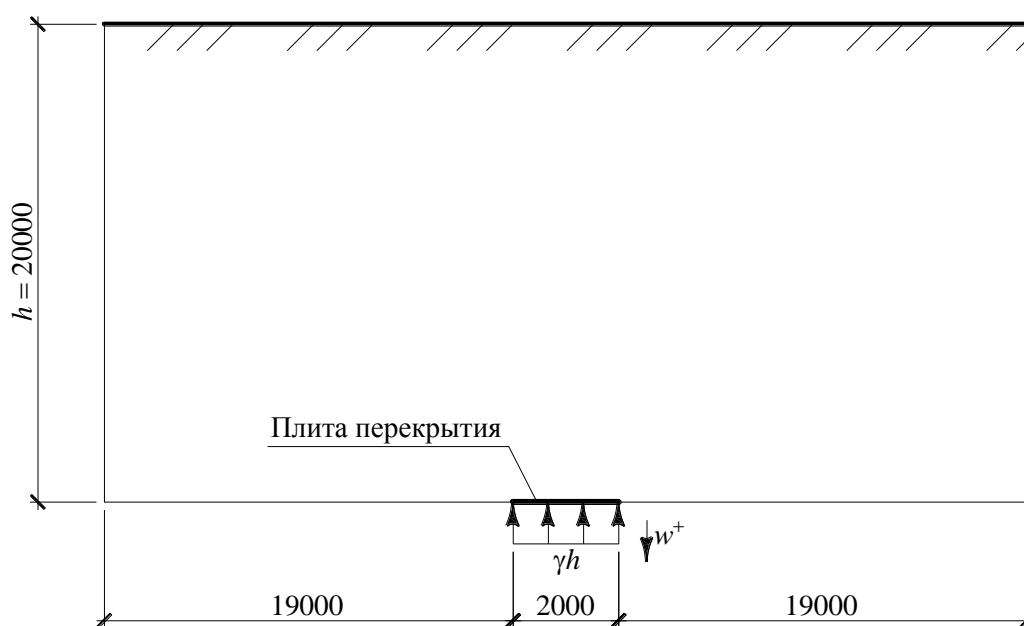


Рис. 1. Расчетная схема

Все расчеты выполнялись в относительных переменных, где $\gamma = 1$ – единица объемного веса; $E = 1\,000$ МПа – единица жесткости. Прочность на одноосное сжатие R_c является величиной переменной.

Коэффициенты m_b , s и a подбирались таким образом, чтобы по значениям главных напряжений σ_1 и σ_3 можно было построить круги Мора к огибающей, описываемой уравнением

$$\tau_n = C_0 \left(1 - \frac{\sigma_n}{R_t} \right)^m, \quad (2)$$

где C_0 – предел прочности грунта на срез; R_t – предел прочности грунта на растяжение; m – показатель, учитывающий кривизну огибающей.

Результаты конечно-элементного анализа

В инженерной практике наибольший интерес представляет изменение зон пластических деформаций (рис. 2).

На рис. 2 показано, что по мере уменьшения поддерживающего давления над выработкой формируются зоны, вышедшие в пластическое состояние, и по форме они напоминают свод обрушения.

Зависимость предельной силы горного давления от предела прочности на одноосное сжатие приведена на рис. 3.

Здесь следует отметить явное несоответствие конечно-элементного решения как решениям по предлагаемым схемам, так и здравому смыслу.

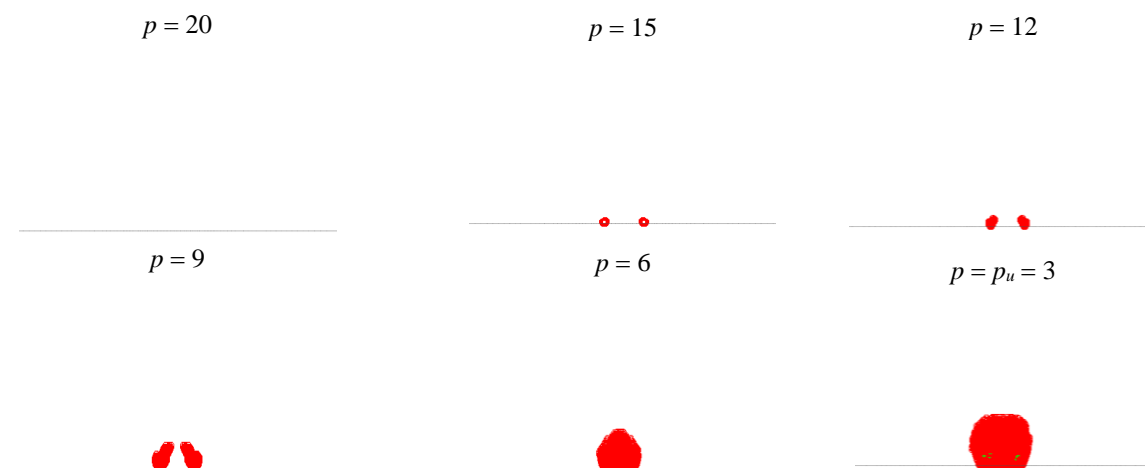


Рис. 2. Зоны развития пластических деформаций при $R_c = 3,5$

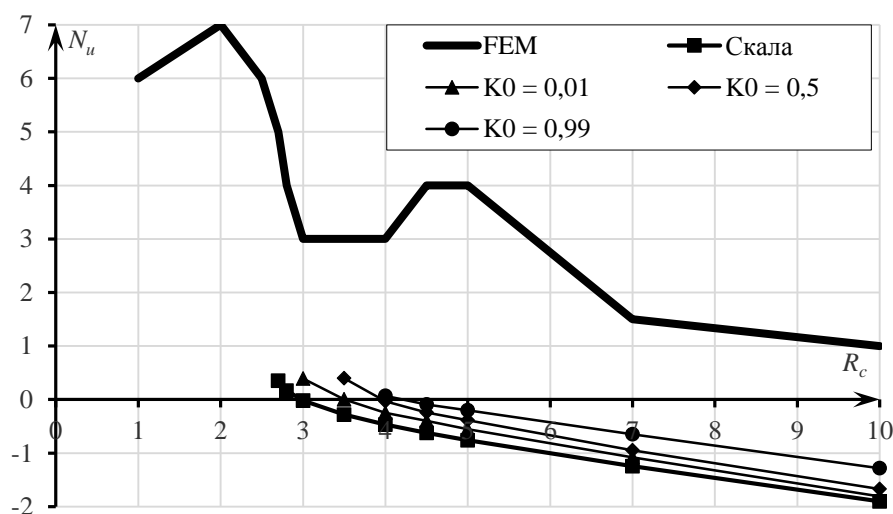


Рис. 3. Зависимость $N_u(R_c)$ в модели *Hoek – Brown*:

FEM – результаты конечно-элементного расчета; *Скала* – результаты расчета по схеме скальных грунтов; $K_0 = 0,01; 0,5; 0,99$ – результаты решения при значениях коэффициента бокового давления 0,01; 0,5 и 0,99

В дисперсных грунтах рассматривалась та же схема, что и в скальных. Исключение составляют лишь размеры расчетной области и поддерживающее давление.

В качестве расчетной модели используется идеальная упругопластическая модель с критерием разрушения *Mohr – Coulomb*:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \operatorname{ctg} \varphi) \sin \varphi, \quad (3)$$

где c и φ – удельное сцепление и угол внутреннего трения грунта соответственно.

Все расчеты, как и в предыдущем случае, выполнялись в относительных переменных, где $\gamma = 1$ – единица объемного веса; $E = 1\,000$ МПа – единица жесткости. Во всех вариантах $\varphi = 30^\circ$. Значение c переменное.

Зоны развития пластических деформаций для различных высот расчетных моделей приведены на рис. 4. Здесь показано, что по мере уменьшения поддерживающего давления над выработкой формируются зоны неупругих деформаций.

На рис. 5 приведены графики зависимости предельной силы горного давления N_u от удельного сцепления грунта c .

На данных графиках видно, что конечно-элементное решение, полученное в модели *Mohr – Coulomb*, показывает гораздо меньшую погрешность, чем то же самое решение, но в модели *Hoek – Brown*.

Кроме того, численное решение показывает, что при отсутствии сцепления грунта возникает свод, в то время как предлагаемая

методика определяет данное состояние как столб обрушения.

Помимо численного решения методом конечных элементов в классическом его понимании, который реализован в большинстве расчетных комплексов, особый интерес представляет так называемый метод предельного анализа, который получает большое развитие в настоящее время.

При выполнении численных расчетов были смоделированы те же расчетные схемы, что и в случае МКЭ-расчета. Все расчеты также производились в относительных переменных.

Результаты расчета горного давления в модели *Hoek – Brown* приведены на рис. 6, в модели *Mohr – Coulomb* – на рис. 7.

Проверка равновесия

На рис. 6, 7 видно, что результаты расчета по методу предельного анализа дают меньшую погрешность по сравнению с предлагаемым решением.

Таким образом, при численных расчетах, в частности расчетах горного давления, рекомендуется применять именно данный метод.

В расчетах по методу конечных элементов была замечена большая погрешность по сравнению с результатами расчета по предлагаемой схеме. Так как рассматриваемая механическая система является статической, то наиболее оптимальной будет являться проверка равновесия системы.

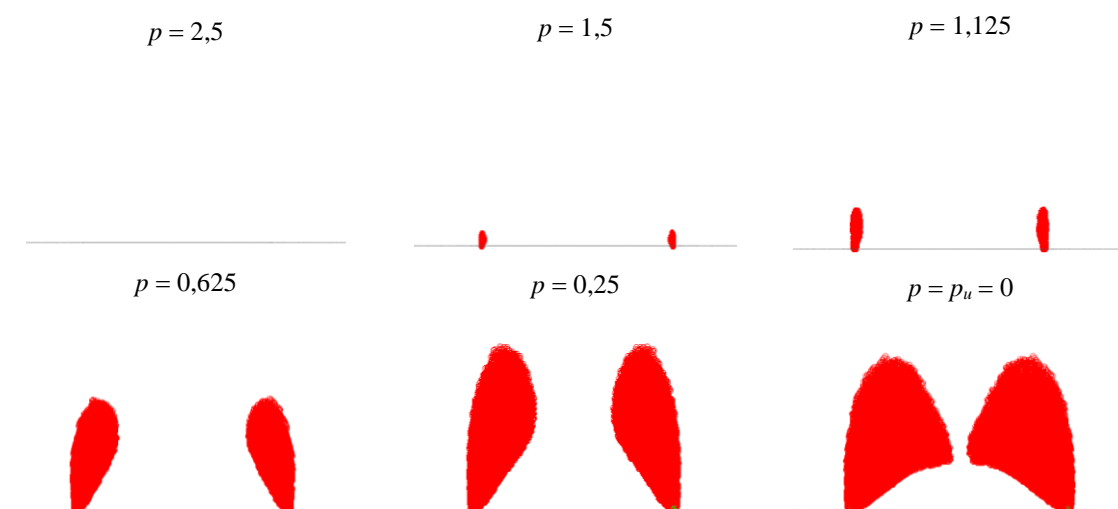


Рис. 4. Зоны развития пластических деформаций при $c = 0,6$ и $\varphi = 30^\circ$

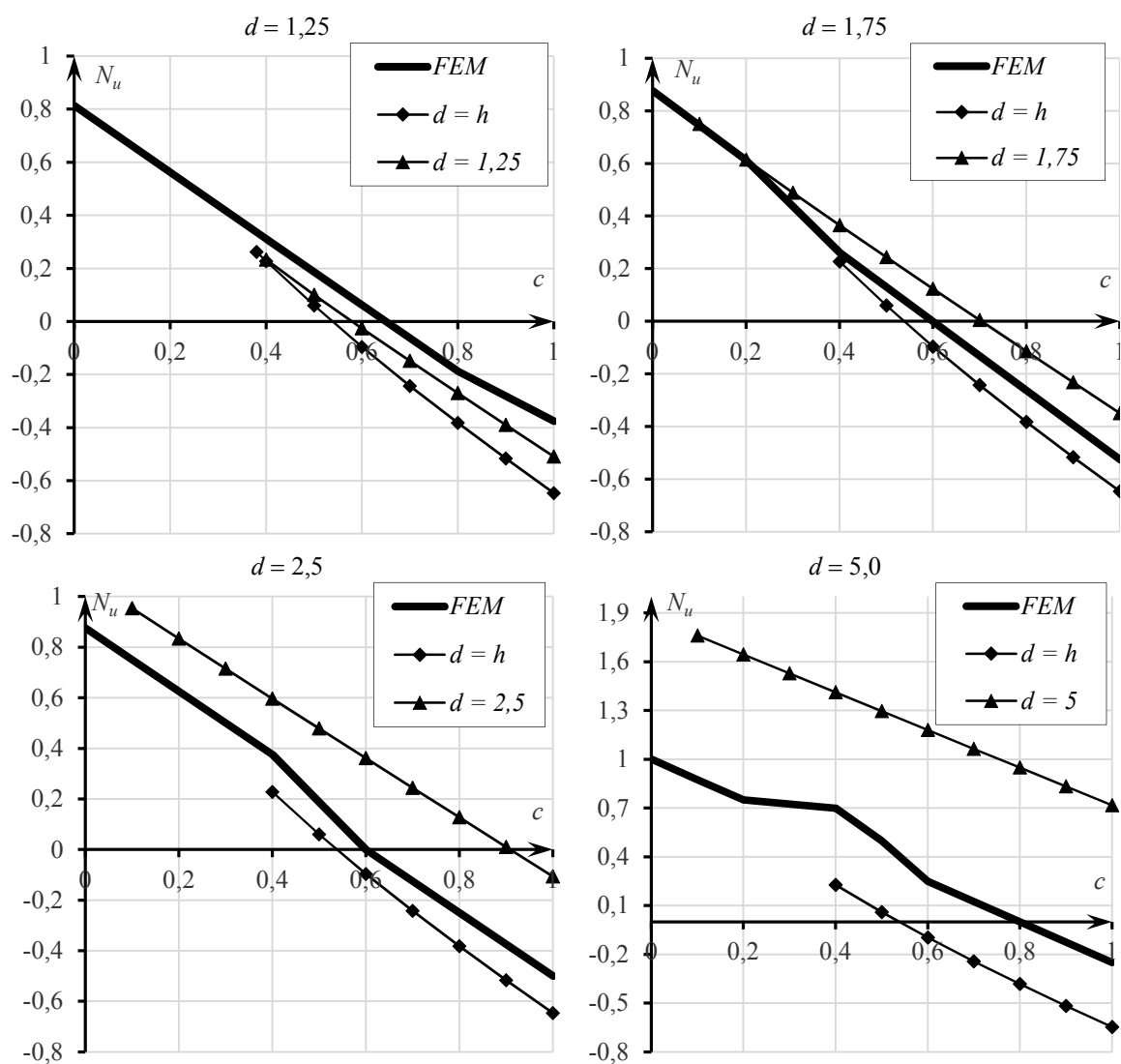


Рис. 5. Зависимость $N_u(R_c)$ в модели Mohr – Coulomb при расчете МКЭ

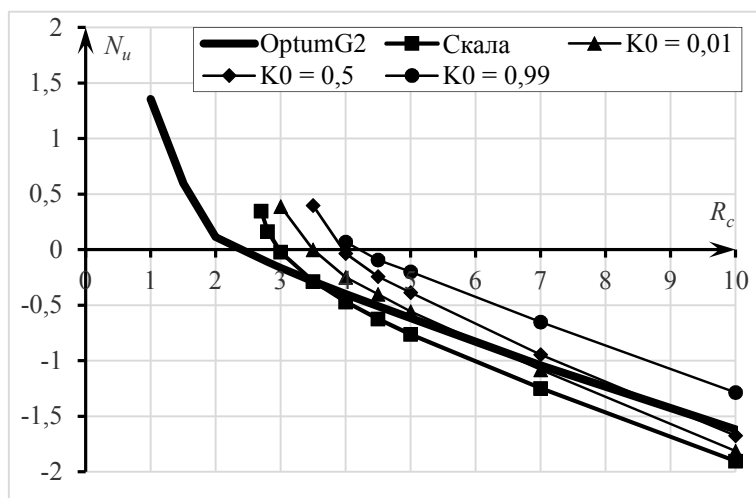


Рис. 6. Зависимость $N_u(R_c)$ в модели Hoek – Brown

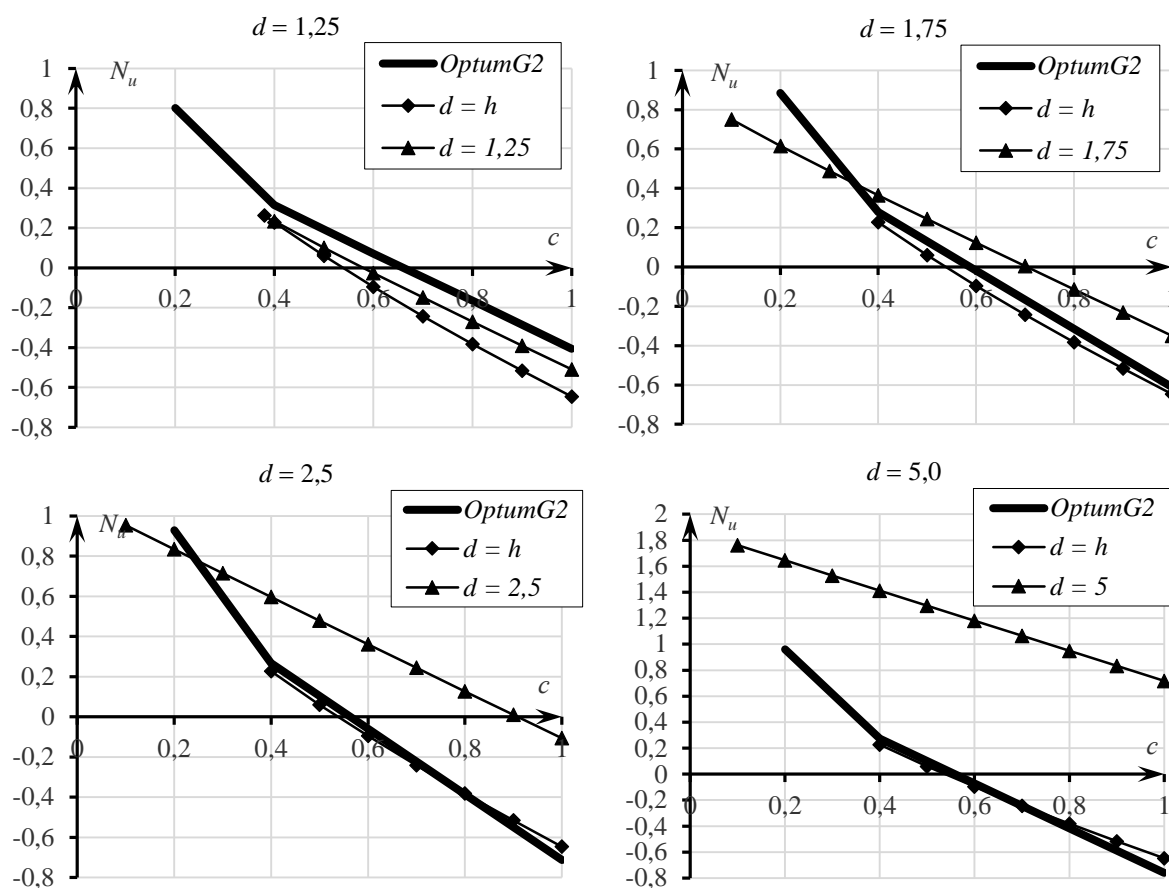


Рис. 7. Зависимость $N_u(R_c)$ в модели Mohr – Coulomb

Равновесие механической системы будет обеспечиваться в случае равенства нулю проекций всех сил на вертикальную и горизонтальную оси, а также в случае равенства нулю моментов

всех сил относительно центра рассматриваемой зоны. Зоны, в которых будет выполняться проверка равновесия, приведены на рис. 8. Результаты проверки равновесия приведены на рис. 9.

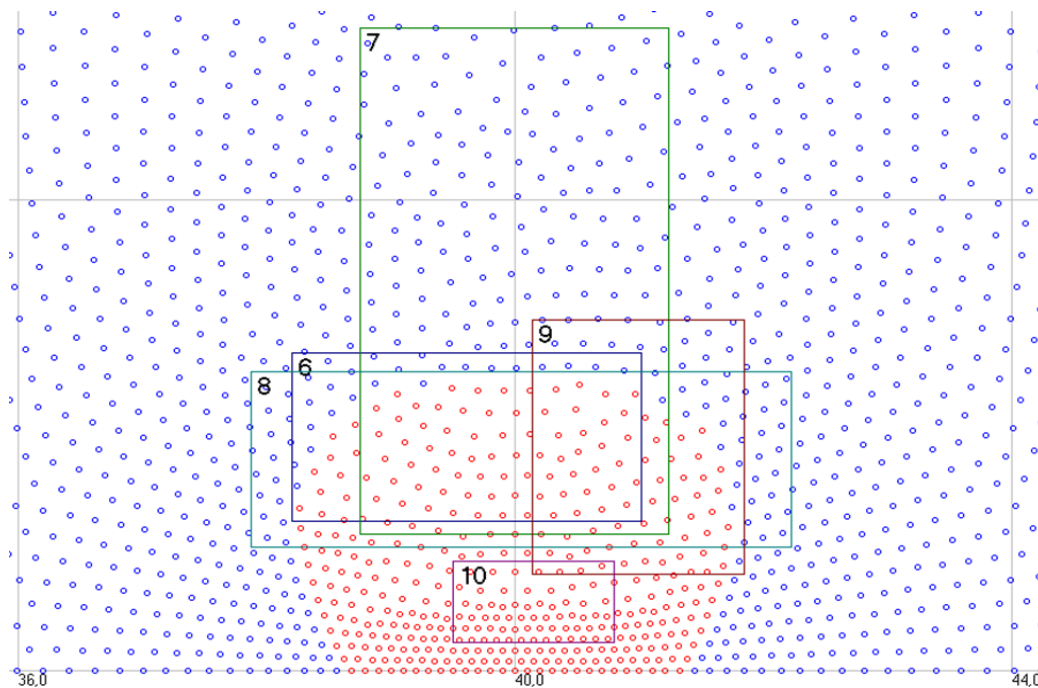


Рис. 8. Зоны 6–10, в которых будет выполняться проверка равновесия

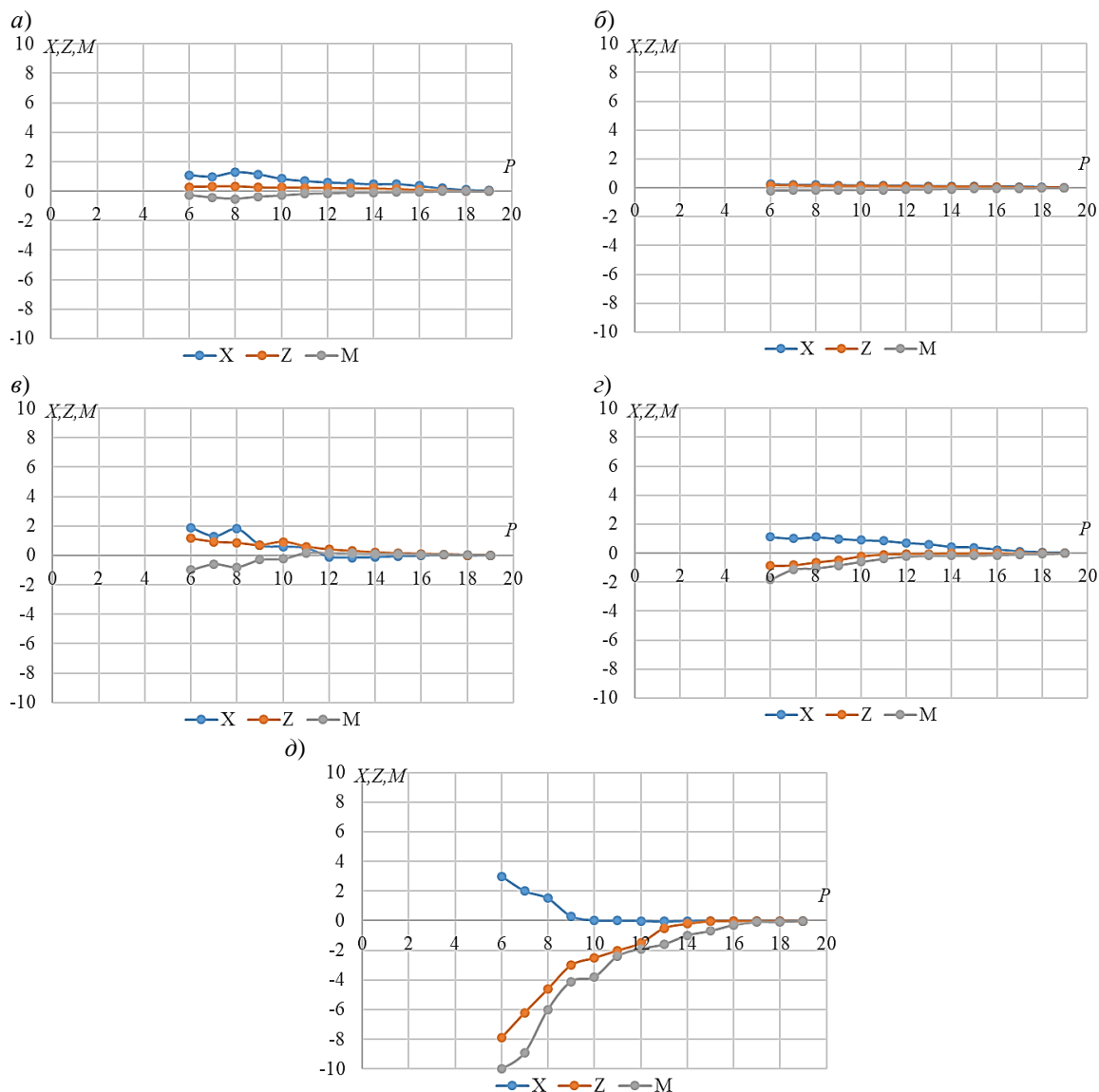


Рис. 9. Равновесие областей:
а – зона 6; б – зона 7; в – зона 8; г – зона 9; д – зона 10

Выводы

Таким образом, были выполнены расчеты горного давления численными методами, которые включали в себя как расчеты по методу конечных элементов, так и расчеты по методу так называемого метода предельного анализа.

Показано, что при расчете горного давления наиболее близкий результат к предлагаемой методике показал метод предельного анализа.

Кроме того, была выполнена проверка равновесия конечно-элементной модели, которая показала невязку, достигающую 10 %.

Список источников

1. Стахнёв Я. О., Королев К. В. Статическое решение задачи о горном давлении методом характеристик теории предельного равновесия // Известия вузов. Строительство. 2020. № 12. С. 78–85.
2. Стахнёв Я. О., Королев К. В. Горное давление в полускальных грунтах и экспериментальное его исследование на примере строительства объекта инфраструктуры железнодорожного транспорта // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 61. С. 104–116.
3. Стахнёв Я. О., Королев К. В., Жукова Е. Н. К вопросу о горном давлении и сводообразовании // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений : труды VI Международной конференции, 10–11 апреля 2019 г. Екатеринбург : Издательство Уральского государственного горного университета, 2019. С. 209–216.

4. Karaulov A. M., Korolev K. V., Stakhnev Ya. O. Determining the Magnitude of Rock Pressure on the Underground Mine Working Support // *Lecture Notes in Civil Engineering : Proceeding of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020 – Commemorating the 90th anniversary of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering*. Novosibirsk, 2020. P. 174–185.
5. Шашкин А. Г. Критический анализ наиболее распространенных нелинейных моделей работы грунта // *Инженерная геология*. 2010. № 3. С. 29–37.
6. Шашкин К. Г., Шашкин В. А., Дунаева М. В. Численное моделирование задач предельного равновесия с помощью упругопластической модели // *Геотехника*. 2011. № 4. С. 10–23.
7. Шашкин К. Г., Васенин В. А. Численный расчет совместной работы основания и конструкций высотного здания // *Геотехника*. 2010. № 6. С. 38–45.
8. Awwad T., Al Kodsi S., Ulitsky V. Numerical analysis using elastic–plastic soil model for a single pile in clay layer to examine the effect surcharge loading on the distribution of skin friction // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions : Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*. 2019. Vol. 49. P. 499–506. (Series: Lecture Notes in Civil Engineering).
9. Undrained Stability of an Unlined Square Tunnel in Spatially Random Soil / A. Ali, A. V. Lyamin, J. Huang [et al.] // *Geo-Risk GSP* 2017. Vol. 284. P. 507–517.
10. Quantitative risk assessment of landslide by limit analysis and random fields / J. Huang, A. V. Lyamin, D. V. Griffiths [et al.] // *Computers and Geotechnics*. 2013. Vol. 53. P. 60–67.

References

1. Stakhnyov Ya. O., Korolev K. V. Static solution of the problem of mountain pressure by the method of characteristics of the theory of limiting equilibrium. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020;(12):78–85. (In Russ.).
2. Stakhnyov Ya. O., Korolev K. V. Mountain pressure in semi–horizontal soils and its experimental study on the example of the construction of a railway transport infrastructure facility. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(61):104–116. (In Russ.).
3. Stakhnyov Ya. O., Korolev K. V., Zhukova E. N. On the question of mountain pressure and arch formation. *Design, construction and operation of complexes of underground structures. Proceedings of the International Conference April 10–11, 2019*. Yekaterinburg: Publishing House of Ural State Mining University; 2019. P. 209–216. (In Russ.).
4. Karaulov A. M., Korolev K. V., Stakhnyov Ya. O. Determining the Magnitude of Rock Pressure on the Underground Mine Working Support. *Lecture Notes in Civil Engineering: Proceeding of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020 – Commemorating the 90th anniversary of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering*. Novosibirsk; 2020. P. 174–185.
5. Shashkin A. G. Critical analysis of the most common nonlinear models of soil work. *Engineering geology*. 2010;(3):29–37. (In Russ.).
6. Shashkin K. G., Shashkin V. A., Dunaeva M. V. Numerical modeling of limit equilibrium problems using an elastic-plastic model. *Geotechnics*. 2011;(4):10–23. (In Russ.).
7. Shashkin K. G., Vasenin V. A. Numerical calculation of the joint work of the foundation and structures of a high-rise building. *Geotechnics*. 2010;(6):38–45. (In Russ.).
8. Awwad T., Al Kodsi S., Ulitsky V. Numerical analysis using elastic-plastic soil model for a single pile in clay layer to examine the effect surcharge loading on the distribution of skin friction. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*. 2019;49:499–506. (Series: Lecture Notes in Civil Engineering).
9. Ali A., Lyamin A. V., Huang J. [et al.]. Undrained Stability of an Unlined Square Tunnel in Spatially Random Soil. *Geo-Risk GSP*. 2017;284:507–517.
10. Huang J., Lyamin A. V., Griffiths D. V. [et al.] Quantitative risk assessment of landslide by limit analysis and random fields. *Computers and Geotechnics*. 2013;53:60–67.

Информация об авторах

Я. О. Стахнёв – аспирант кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

К. В. Королев – заведующий кафедрой «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

Ya. O. Stakhnyov – Postgraduate student of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department, Siberian Transport University.

K. V. Korolev – Head of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 29.05.2023; принята к публикации 21.09.2023.

The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 29.05.2023; accepted for publication 21.09.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.21:620.178
doi 10.52170/1815-9265_2023_67_92

Определение напряженного состояния и динамических коэффициентов балочных мостов

Иван Сергеевич Бондарь¹, Нарзанкул Мусаевна Махметова²,
Михаил Яковлевич Квашнин³, Серик Сатыбаевич Хасенов⁴✉

^{1,2,3,4} Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан

¹ ivan_sergeevich_08@mail.ru

² makhmetova_n1958@mail.ru

³ kvashnin_mj55@mail.ru

⁴ sake-56@mail.ru ✉

Аннотация. Железнодорожный транспорт Республики Казахстан представляет собой уникальную систему, функционирующую в чрезвычайно разнообразных природных и климатических условиях. Обеспечение безопасности функционирования данной системы является сложной и многогранной задачей. Путевое хозяйство – важная составная часть железнодорожного транспорта. Основной деятельностью путевого хозяйства является текущее содержание, а также ремонт железнодорожного пути и искусственных сооружений. Состояние железнодорожного пути и искусственных сооружений – приоритетный объект управления путевого хозяйства, основной результат его деятельности. Содержание искусственных сооружений в состоянии, обеспечивающем их работу без каких-либо ограничений при нормальной эксплуатации, является одной из важнейших задач. Целью настоящей работы являлось исследование напряженного состояния и динамических коэффициентов балочных мостов, а также оценка полученных результатов в соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации железных дорог Республики Казахстан. В работе представлены результаты определения напряжений и динамических коэффициентов балочных мостов от воздействия статических и динамических нагрузок, полученные с применением аппаратно-программного комплекса, реализующего интерпретацию и обработку цифровой записи первичных преобразователей на основе средств тензометрии. Получены зависимости напряженного состояния балочных пролетных строений железнодорожных путепроводов различной конструкции при статическом приложении нагрузки от подвижного состава. Приведены графики изменения динамических коэффициентов при проходе по пролетному строению подвижной нагрузки в различном скоростном режиме. Результаты исследования рекомендуется использовать для проведения обследований и испытаний типовых балочных пролетных строений мостов, а также в случае мониторинга их технического состояния при увеличении эксплуатационных нагрузок.

Ключевые слова: балочные мосты, подвижная нагрузка, напряженное состояние, динамический коэффициент

Для цитирования: Определение напряженного состояния и динамических коэффициентов балочных мостов / И. С. Бондарь, Н. М. Махметова, М. Я. Квашнин, С. С. Хасенов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 92–100. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_92.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Determination of stress state and dynamic coefficients of girder bridges

Ivan S. Bondar¹, Narzankul M. Makhmetova², Mikhail Ya. Kvashnin³, Serik S. Khasenov⁴✉

^{1,2,3,4} Academy of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan

¹ ivan_sergeevich_08@mail.ru

² makhmetova_n1958@mail.ru

³ kvashnin_mj55@mail.ru

⁴ sake-56@mail.ru ✉

Abstract. The railway transport of the Republic of Kazakhstan is a unique system operating in extremely diverse natural and climatic conditions. Ensuring safe functioning of this system is a complex and multifaceted task.

Track facilities are an important part of railway transport. The main task of track facilities is the current maintenance and repair of railroad track and artificial structures. Condition of railway track and artificial structures is a priority object of track facilities management, the main result of its activity. The maintenance of artificial constructions and subgrade in a condition that ensures its operation without any restrictions, under their normal operation and possible extreme effects on the object is one of the most important tasks. The purpose of this study was to ensure the reliable operation of artificial structures, and bringing them into conformity with the requirements of the Rules of technical operation of railroads of the Republic of Kazakhstan. The paper presents the results of determining the stresses and dynamic coefficients of the girder bridges from the effects of static and dynamic loads, obtained by using the hardware-software complex, which implements the interpretation and processing of the digital record of the primary transducers based on tensometry tools. The dependences of the stressed state of girder spans of railway overpasses of various designs under the static loading from the rolling stock have been obtained. The diagrams of the dynamic coefficients change at the passage of the rolling load along the span in different speed modes are given. The results of the study are recommended to be used for examinations and tests of the typical girder spans of the bridges, as well as in case of monitoring of their technical state under the increasing operational loads.

Keywords: girder bridges, moving load, stressed state, dynamic coefficient

For citation: Bondar I. S., Makhmetova N. M., Kvashnin M. Ya., Khasenov S. S. Determination of stress state and dynamic coefficients of girder bridges. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):92–100. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_92.

Введение

Общеизвестно, что постоянный контроль за техническим состоянием искусственных сооружений в стадии эксплуатации приводит к снижению эксплуатационных затрат на их содержание. Кроме того, планирование межремонтных сроков искусственных сооружений производится на основе обработки данных по физическому состоянию объектов инфраструктуры. Актуальной становится задача автоматизированной разработки проектных решений по ремонтно-профилактическим мероприятиям искусственных сооружений в соответствии с их техническим состоянием в текущий момент.

Согласно действующим в Республике Казахстан нормам [1], динамический коэффициент является одним из наиболее важных параметров, используемых при проектировании и эксплуатации балочных мостовых сооружений. Напряжения и динамические коэффициенты для балочных пролетных строений мостов, испытывающих статические и динамические воздействия от подвижного состава, определяются как расчетным, так и экспериментальным методом.

При опытным получении динамического коэффициента испытанием конструкции его количественный показатель может быть получен с использованием следующего выражения:

$$K_d = \frac{U_d}{U_{ст}}, \quad (1)$$

где U_d – максимальный прогиб при проходе по пролетному строению подвижной нагрузки с такой скоростью, которая вызывает максимальные механические колебания балки (ха-

рактеризует динамическое нагружение); $U_{ст}$ – максимальный прогиб балки при проходе по пролетному строению подвижной нагрузки со скоростью не более 5 км/ч (характеризует статическое нагружение).

Значения максимальных прогибов для мостов, предназначенных для пропуска рельсового транспорта, получают, как правило, путем нагружения критических элементов железнодорожным подвижным составом (локомотивами, грузовыми и пассажирскими вагонами) и легкорельсовым транспортом (трамваями). Фиксация максимальных прогибов осуществляется с применением современного оборудования.

При камеральной обработке максимальное значение ординаты соответствует количественной величине наибольшего динамического прогиба. Для определения наибольшего прогиба от статической нагрузки следует на записи кривой нагружения при проходе по пролетному строению подвижной нагрузки со скоростью 5 км/ч вычертить срединную линию, которая делит пополам размах механического колебания. Данная линия характеризует диаграмму статических прогибов, максимальная ордината которой является количественной величиной, используемой при расчете динамического коэффициента.

Помимо прогибов основных несущих элементов, при испытаниях также фиксируют локальные деформации, которые с применением закона Гука преобразуют в напряжения. Данные напряжения от воздействия подвижного состава в несущих конструкциях балочных мостов складываются из напряжений $\sigma_{ст}$ от

собственного веса конструкции с расположенным на ней подвижным составом и динамических напряжений σ_d , вызванных колебаниями пролетного строения при проходе поезда:

$$\sigma = \sigma_{ст} + \sigma_d. \quad (2)$$

Следует отметить, что в данном случае принимаются во внимание динамические напряжения, совпадающие по знаку с напряжениями, возникающими при статическом нагружении. В частности, если вектор изгибных колебаний конструкции совпадает с направлением вектора ее прогиба, то напряжения от статического нагружения складываются с напряжениями от динамического воздействия подвижного состава.

Отметим, что измерение напряженного состояния балки от динамической нагрузки можно выполнить при помощи тензорезисторов, которые устанавливаются в местах определения напряжений, для этого необходимо знать точную величину (особенно для эксплуатируемых длительное время железобетонных мостов) модуля упругости материала балочной конструкции пролетного строения.

При определении динамического напряжения следует рассчитать силу инерции, которая действует на конструкцию пролетного строения. Сила инерции определяется произведением массы и ускорения балки при механических колебаниях:

$$Q_{ин} = ma. \quad (3)$$

Ускорение измеряется специальными преобразователями (акселерометрами) или вычисляется с использованием имеющейся осциллограммы из формулы

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{a}{x}}, \quad (4)$$

где T – период колебаний; x – максимальная амплитуда колебаний.

Из формулы (4) выразим x :

$$x = \frac{4\pi^2 a}{T^2} = 4\pi^2 a f^2, \quad (5)$$

где f – частота колебаний конструкции при динамическом воздействии.

Динамическое напряжение от воздействия на конструкцию осевой силы равно:

$$\sigma_d = \frac{Q_{ин}}{F} = \frac{ma}{F}. \quad (6)$$

Для балки на двух опорах при воздействии в середине пролета длиной l распределенной

нагрузки динамическое напряжение определяется выражением

$$\sigma_d = \frac{Q_{ин}}{4W} = \frac{mal}{4W}. \quad (7)$$

где W – момент сопротивления сечения балки.

Обобщая вышеизложенное, можно констатировать, что в характерном сечении (как правило, в середине длины пролета) балки пролетного строения моста устанавливаются сейсмографы, виброметры, акселерометры или датчики перемещения на основе тензометрии и производится запись осциллограмм, виброграмм, акселерограмм или диаграмм прогибов, из которых определяют ускорения колебаний.

Затем перемножением масс на соответствующие ускорения определяют инерционные силы для каждого участка балочной конструкции моста. Имея количественные величины инерционных сил и зная точки их приложения к центрам отдельных участков балочной конструкции, можем получить изгибающие моменты в пролетном строении моста и вычислить динамические напряжения в любых поперечных сечениях балки.

Амплитуда механических колебаний балочного пролетного строения моста определяет количественные значения возникающих напряжений. В основном для разрезных балочных пролетных строений знак напряжений является постоянным. Иногда количественные значения напряжений, возникающих при статическом и динамическом нагружениях, переходят через ноль и становятся знакопеременными. Тогда возникает вероятность изменения физико-механических свойств конструкции вследствие усталости материала, проявляющейся в большей степени при возникновении знакопеременных напряжений.

Материалы и методы исследования

В работе использован метод натурных испытаний пролетных строений мостов с применением аппаратно-программного комплекса, реализующего интерпретацию и обработку цифровой записи первичных преобразователей на основе средств тензометрии.

Были испытаны балочные пролетные строения железнодорожных железобетонных путепроводов, расположенных на прямой в плане и профиле площадки, построенные по типовым проектам, разработанным Мосгипротрансом в

1987 г. Строительство путепроводов было завершено в 1988 г. Все сооружения запроектированы под нагрузку С14.

Пролетные строения длиной 16,5 и 23,6 м выполнены ребристыми двухблочными, двутаврового сечения, из предварительно напряженного бетона. Пролетные строения длиной 11,5 м – плитные двухблочные. Устои и промежуточные опоры – рамные, двухстоечные, железобетонные, класс бетона В22,5. Устои обсыпного типа, укрепление конусов устоев

выполнено из бетонных плит размером $50 \times 50 \times 10$ см [2, 3].

На рис. 1 приведена схема расположения тензорезисторов на пролетных строениях железнодорожных железобетонных путепроводов.

На рис. 2 представлены схемы загрузки пролетных строений подвижной нагрузкой. Нагружение выполнено при помощи 6-осного тепловоза ТЭМ18 с нагрузкой на ось 20,7 тс общим весом 124 тс и 4-осного вагона хоппер-

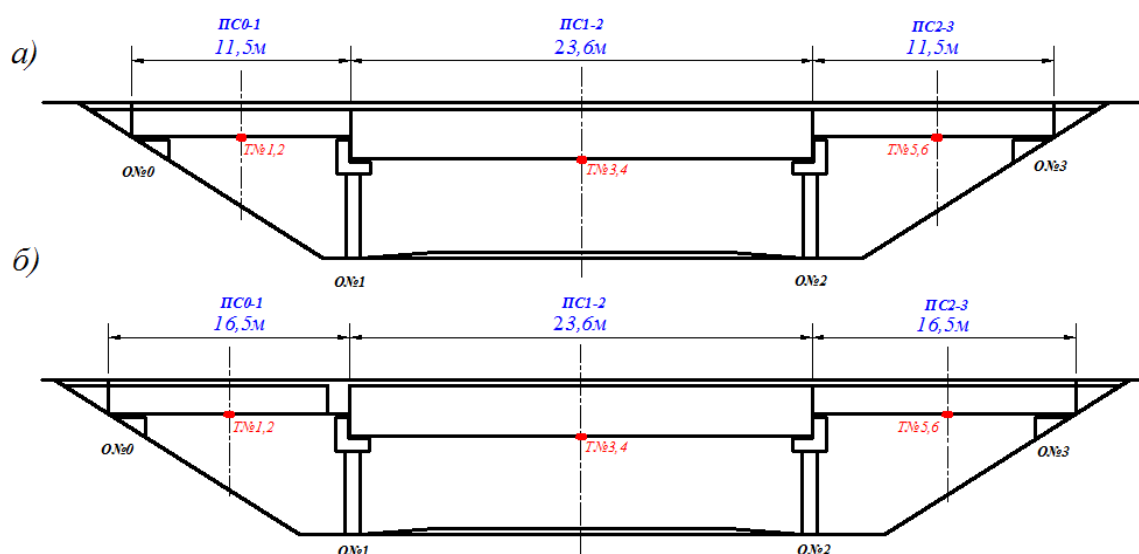


Рис. 1. Схема расположения тензорезисторов на пролетных строениях железнодорожных железобетонных путепроводов:

а – путепровод по схеме 11,5 + 23,6 + 11,5 м; б – путепровод по схеме 16,5 + 23,6 + 16,5 м; ПС 0-1, ПС 1-2, ПС 2-3 – пролетные строения путепроводов; Т № 1, 2, Т № 3, 4, Т № 5, 6 – тензорезисторы FLM-60-11; О № 1, О № 2 – рамные, двухстоечные промежуточные опоры; О № 0, О № 3 – устои обсыпного типа

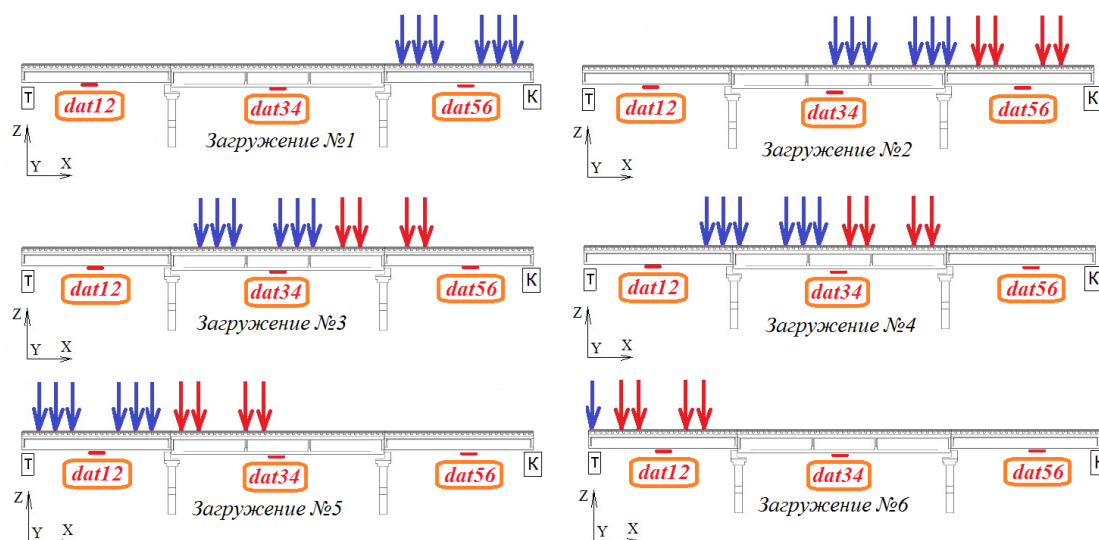


Рис. 2. Схемы загрузки пролетных строений подвижной нагрузкой:

dat 12, 34, 56 – датчики сопротивления, расположенные в средней части балочных пролетных строений; КТ – направление движения испытательной нагрузки

дозатора с нагрузкой на ось 23,3 тс общим весом 93,25 тс.

На рис. 3 показан фрагмент проведения испытаний конструкций пролетного строения под нагрузкой от осей 6-осного тепловоза ТЭМ18 и 4-осного хоппер-дозатора.

Результаты исследования и их анализ

На рис. 4 представлен пример записи напряженного состояния растянутой зоны в середине пролета балки длиной 23,6 м при статических испытаниях. Рисунок 5 иллюстрирует диаграммы напряжений растянутой зоны в середине пролета балки длиной 11,5 м. Для пролетных строений длиной 16,5 и 23,6 м аналогичные диаграммы приведены на рис. 6 и 7 соответственно.

Из диаграмм напряжений балки длиной 11,5 м (см. рис. 5) видно, что при одной и той же нагрузке в правом и левом блоках пролетных строений возникают различные по величине напряжения. По зафиксированным максимальным количественным величинам напряжений разница составила 3 % при загрузке № 2 и 7 % при загрузке № 6. Для балки длиной 16,5 м (см. рис. 6) разница составила 2 % (загрузка № 6) и 7 % (загрузка № 1), для балки длиной 23,6 м (см. рис. 7) – 8 % (загрузка № 4) и 2 % (загрузка № 3). Разница в численных значениях измеренных напряжений в правом и левом блоках пролетных строений может являться следствием неравномерного износа конструкций от воздействия климатических факторов.



Рис. 3. Проведение испытаний конструкций пролетного строения с помощью 6-осного тепловоза ТЭМ18 и 4-осного хоппер-дозатора

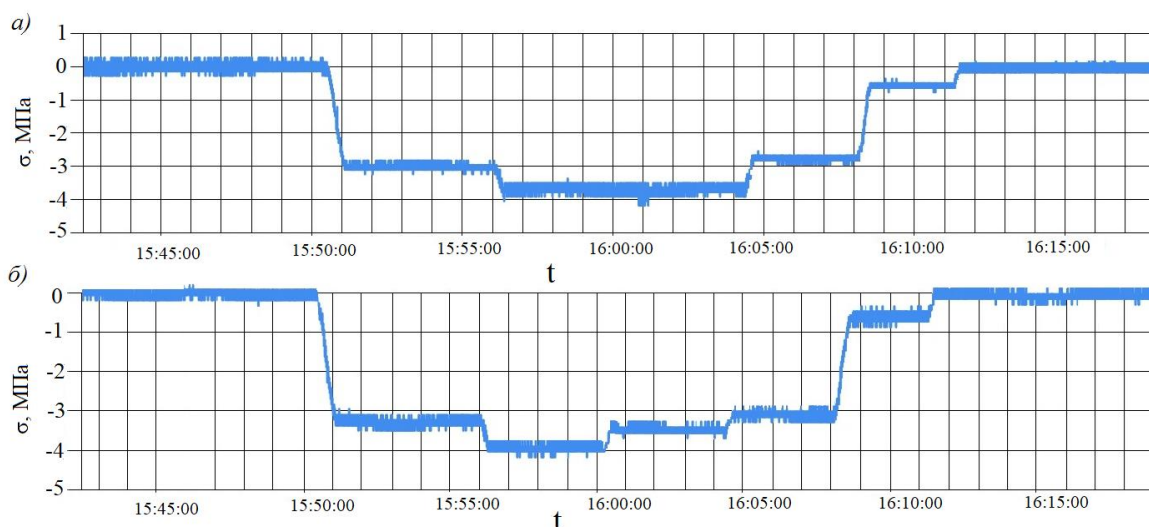


Рис. 4. Напряженное состояние растянутой зоны в середине пролета балки длиной 23,6 м при статических испытаниях пролетного строения:
а – правый блок; б – левый блок

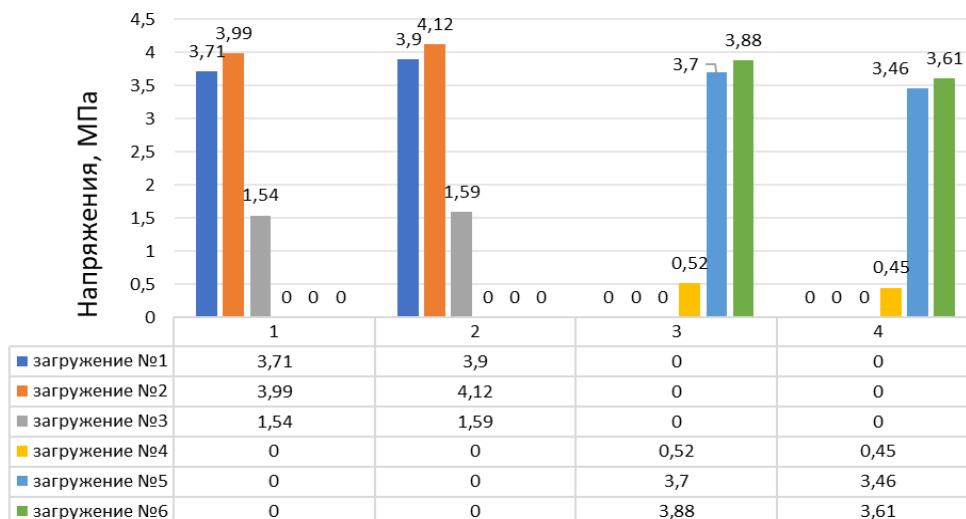


Рис. 5. Напряжения растянутой зоны пролетного строения длиной 11,5 м:
1 и 3 – правый блок; 2 и 4 – левый блок

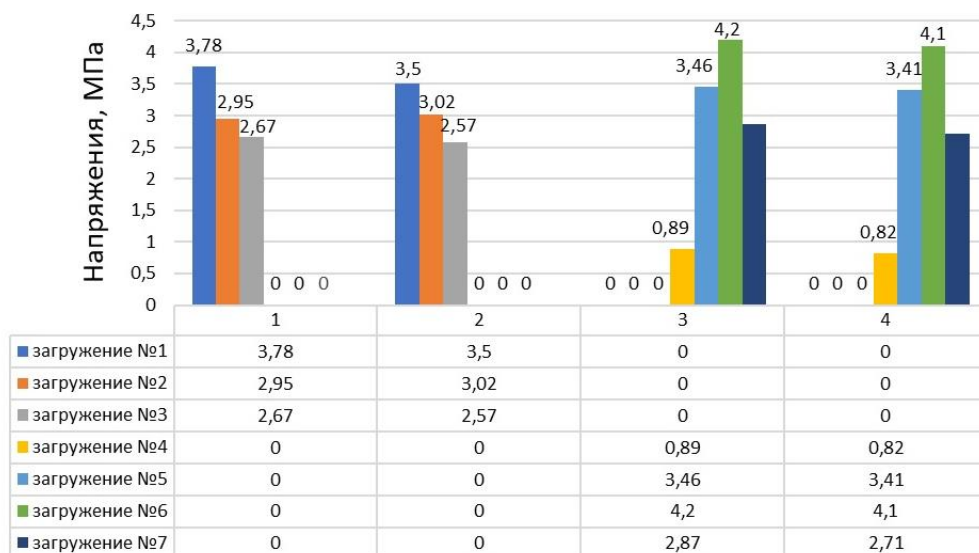


Рис. 6. Напряжения растянутой зоны пролетного строения длиной 16,5 м:
1 и 3 – правый блок; 2 и 4 – левый блок

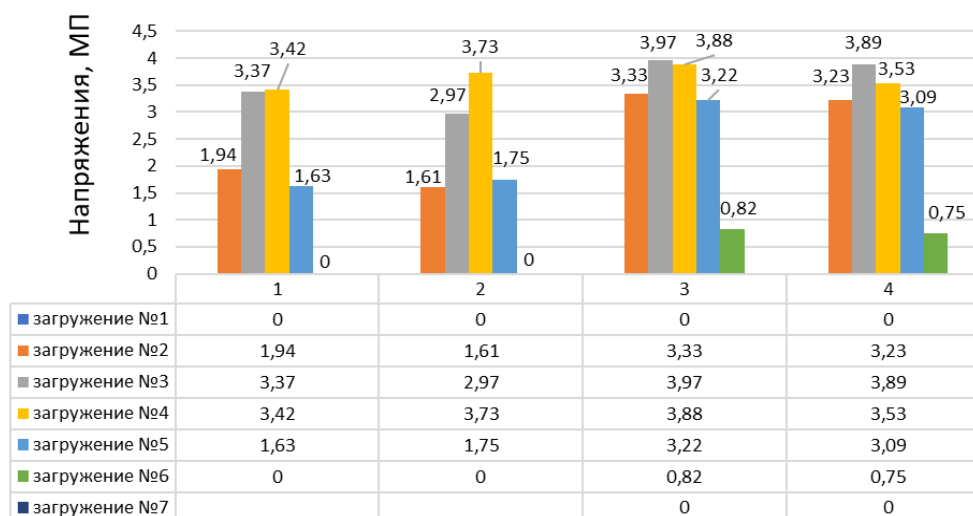


Рис. 7. Напряжения растянутой зоны пролетного строения длиной 23,6 м:
1 и 3 – правый блок; 2 и 4 – левый блок

На рис. 8–10 приведены графики зависимости динамического коэффициента от скорости испытательной нагрузки для балок различной длины, построенные по средним значениям от пяти-семи проходов подвижного состава. На пролетном строении длиной 11,5 м (см. рис. 8) наименьшие значения динамического коэффициента наблюдались при скоростях 10 и 30 км/ч как для левого, так и для правого блоков. Наибольшие значения для правого блока зафиксированы при скорости 40 км/ч, а для левого – при скорости 50 км/ч. На пролетном строении длиной 16,5 м (см. рис. 9) наименьшее значение динамического коэффициента фиксировалось при

скорости 20 км/ч, а наибольшее – при скорости 40 км/ч.

На пролетном строении длиной 23,6 м (см. рис. 10) наименьшие значения динамического коэффициента наблюдались при скоростях 10 и 20 км/ч, а наибольшие – при скоростях 40 и 50 км/ч. Разница в численных значениях динамического коэффициента в левом и правом блоках может возникать от незначительного смещения оси пути относительно оси моста.

В работах российских [4–5] и казахстанских [9, 10] специалистов представлены исследования по экспериментальному определению напряженно-деформированного состояния балочных пролетных строений железнодоро-

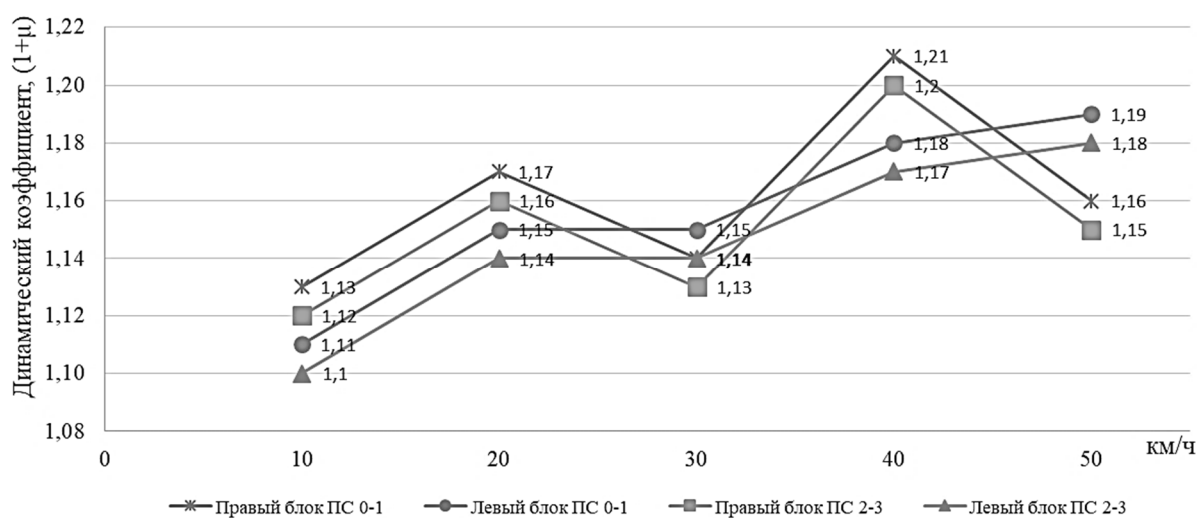


Рис. 8. Зависимость динамического коэффициента от скорости испытательной нагрузки для пролетного строения длиной 11,5 м

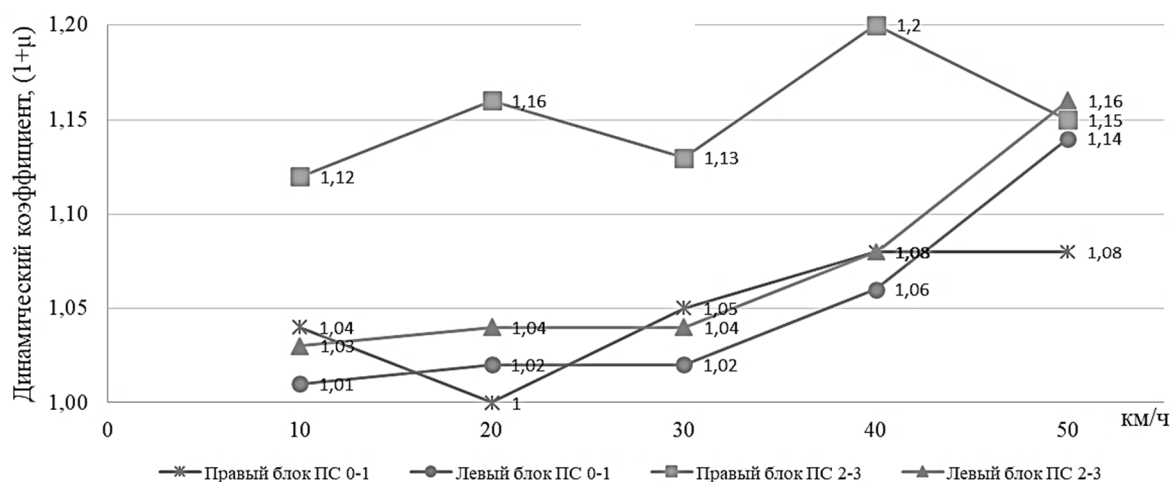


Рис. 9. Зависимость динамического коэффициента от скорости испытательной нагрузки для пролетного строения длиной 16,5 м

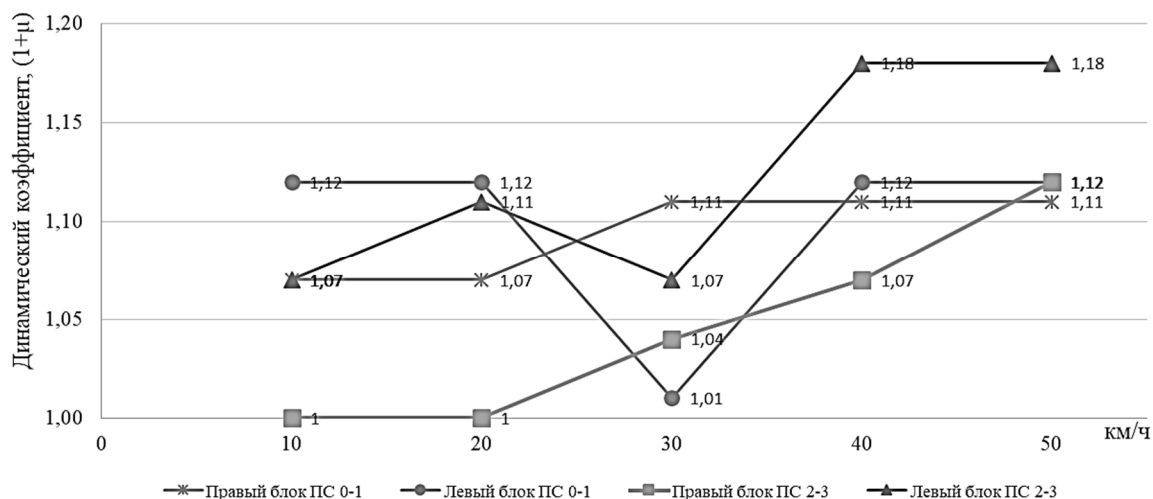


Рис. 10. Зависимость динамического коэффициента от скорости испытательной нагрузки для пролетного строения длиной 23,6 м

рожных мостов, подтверждающие адекватность изложенных в данной статье результатов.

Выводы

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Физическое состояние балок железнодорожных путепроводов удовлетворяет требованиям Правил технической эксплуатации железных дорог Республики Казахстан.
2. Выявленные различия в численных значениях напряжений в элементах конструкций балок могут являться следствием вероятного неравномерного износа конструкций от воздействия климатических факторов.
3. На основании зависимостей динамического коэффициента от скорости испытатель-

ной нагрузки на правом и левом блоках балочных пролетных строений можно сделать вывод о возможном незначительном смещении оси пути относительно оси моста.

Безопасность объектов транспортной инфраструктуры зависит от применения прогрессивных технологий и научных методов осуществления мониторинга для решения технических вопросов на всех стадиях эксплуатации. Использование современных цифровых аппаратно-программных комплексов при испытаниях балочных пролетных строений мостов позволит значительно сократить затраты на текущее содержание искусственных сооружений на железных дорогах Республики Казахстан.

Список источников

1. СП РК 3.03-112-2013. Мосты и трубы / Комитет по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан. Астана, 2015. 717 с.
2. Обследование и испытание железнодорожного путепровода по схеме 16,5 + 23,6 + 16,5 м через автомобильную дорогу II категории на км 56 ПК9+50 железнодорожной линии Кульсары – Тенгиз : технический отчет. Алматы : Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева, 2018. 126 с.
3. Обследование и испытание железнодорожного путепровода по схеме 11,5 + 23,6 + 11,5 м через автомобильную дорогу II категории на км 96 ПК5+20 железнодорожной линии Кульсары – Тенгиз : технический отчет. Алматы : Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2018. 121 с.
4. Бокарев С. А., Прибытков С. С., Яшнов А. Н. Содержание искусственных сооружений с использованием информационных технологий. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. 195 с.
5. Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО / С. А. Бокарев, А. Н. Яшнов, И. И. Снежков, А. В. Слюсарь // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 9. С. 25–26.
6. Бокарев С. А., Соловьев Л. Ю., Рогова Е. В. Методика оценки грузоподъемности сталежелезобетонных железнодорожных пролетных строений // Известия вузов. Строительство. 2009. № 3/4 (603/604). С. 106–114.
7. Яшнов А. Н. Грузоподъемность плиты балластного корыта железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов : специальность 05.23.15 «Мосты и транспортные тоннели» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Яшнов Андрей Николаевич. Новосибирск, 1989. 128 с.

8. Яшнов А. Н., Слюсарь А. В. Совершенствование методики диагностики железобетонных пролетных строений по результатам исследования их динамической работы // Научные труды Общества железобетонщиков Сибири и Урала. Новосибирск : Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 2005. Вып. 8. С. 83–85.

9. Бондарь И. С. Влияние подвижной нагрузки на деформации пролетного строения железнодорожного моста // Инженерные сооружения на транспорте : сборник трудов с международным участием. Москва : Московский государственный университет путей сообщения, 2016. Вып. 7. С. 64–67.

10. Development of safety methods on artificial structures of railway lines / A. Akbayeva, G. Muratbekova, Z. Altayeva [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. No. 6 (120). P. 43–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269964>.

References

1. SSP RK 3.03-112-2013. Bridges and pipes. Committee for Construction, Housing and Utilities and Land Resources Management of the Ministry of National Economy of the Republic of Kazakhstan. Astana; 2015. 717 p. (In Russ.).

2. Inspection and testing of the railway overpass on the scheme of 16.5 + 23.6 + 16.5 m through the automobile road of II category at km 56 PK9+50 of the railway line Kulsary – Tengiz. Technical report. Almaty: Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev; 2018. 126 p. (In Russ.).

3. Inspection and testing of the railway overpass on the scheme of 11.5 + 23.6 + 11.5 m over the automobile road of II category at km 96 PK5+20 of the railway line Kulsary – Tengiz. Technical report. Almaty: Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev; 2018. 121p. (In Russ.).

4. Bokarev S. A., Pribytkov S. S., Yashnov A. N. Maintenance of artificial structures with the use of information technologies. Moscow: Training and Methodical Center for Education on Railway Transport, 2008. 195 p. (In Russ.).

5. Bokarev S. A., Yashnov A. N., Snezhkov I. I., Slyusar A. V. Package-model automated systems for the diagnostics of the artificial structures. *Track and track facilities*. 2007;(9):25–26. (In Russ.).

6. Bokarev S. A., Solovyev L. Yu., Rogova Ye. V. Methodology of Steel-Reinforced Concrete Railroad Spans Load Capacity Estimation. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2009;(603/604):106–114. (In Russ.).

7. Yashnov A. N. Load-carrying capacity of the ballast trough slab of the reinforced concrete spans of the railway bridges. Specialty 05.23.15. Bridges and transport tunnels. Dissertation for the degree of Candidate of Engineering. Novosibirsk; 1989. 128 p. (In Russ.).

8. Yashnov A. N., Slyusar A. V. Improving the methodology of diagnostics of reinforced concrete spanning structures based on the results of their dynamic operation research. *Scientific Proceedings of the Society of reinforced concrete workers of Siberia and the Urals*. Novosibirsk: Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering; 2005. Issue 8. P. 83–85. (In Russ.).

9. Bondar I. S. Influence of moving load on deformations of the railroad bridge spanning structure. *Engineering structures on transport. Proceedings with international participation*. Moscow: Moscow State University of Railway Transport; 2016. Issue. 7. P. 64–67. (In Russ.).

10. Akbayeva A., Muratbekova G., Altayeva Z. [et al.]. Development of safety methods on artificial structures of railway lines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022;(120):43–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269964>.

Информация об авторах

И. С. Бондарь – ассоциированный профессор кафедры «Строительная инженерия» Академии логистики и транспорта, кандидат технических наук.

Н. М. Махметова – профессор кафедры «Строительная инженерия» Академии логистики и транспорта, доктор технических наук.

М. Я. Квашнин – профессор кафедры «Строительная инженерия» Академии логистики и транспорта, кандидат технических наук.

С. С. Хасенов – академический профессор кафедры «Строительная инженерия» Академии логистики и транспорта, доктор технических наук.

Information about the authors

I. S. Bondar – Associate Professor of the Civil Engineering Department, Academy of Logistics and Transport, Candidate of Engineering.

N. M. Makhmetova – Professor of the Civil Engineering Department, Academy of Logistics and Transport, Doctor of Engineering.

M. Ya. Kvashnin – Professor of the Civil Engineering Department, Academy of Logistics and Transport, Candidate of Engineering.

S. S. Khasenov – Academic Professor of the Civil Engineering Department, Academy of Logistics and Transport, Doctor of Engineering.

Статья поступила в редакцию 11.10.2023; одобрена после рецензирования 18.10.2023; принята к публикации 20.10.2023.

The article was submitted 11.10.2023; approved after reviewing 18.10.2023; accepted for publication 20.10.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.21/.8

doi 10.52170/1815-9265_2023_67_101

Некоторые проблемы, возникающие при оценке грузоподъемности автодорожных мостов в процессе натурных исследований

Александр Ильич Васильев^{1✉}, Алексей Александрович Курыпов²,
Александр Алексеевич Лебедев³

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

^{1,2,3} Научно-исследовательский институт мостов и гидротехнических сооружений, Москва, Россия

¹ 655178@mail.ru✉

² alekur2005@mail.ru

³ a.lebedev.nii-migs@yandex.ru

Аннотация. При исследованиях технического состояния эксплуатируемых автодорожных мостов главной и самой трудной задачей является получение правильной оценки фактической грузоподъемности моста. При этом возникают проблемы, которые связаны в основном с недостаточностью или отсутствием технической документации на сооружение, несогласованностью нормативно-методических документов в части оценки грузоподъемности мостов, неопределенностью учета асфальтобетонного покрытия. В оценке фактической грузоподъемности эксплуатируемых мостов в классах нормативной нагрузки имеет место противоречие между различными действующими нормами нагрузок.

Для единого толкования грузоподъемности мостов, как новых, так и построенных ранее по различным нормам, необходимо во всех случаях следовать современным требованиям, зафиксированным в действующем ГОСТ Р 32960–2014. Это положение требует апробации на нормативном уровне. При определении возможности пропуска тяжеловесного транспортного средства по мостовому сооружению встречаются ситуации, когда условие пропуска, определенное теоретическими методами, не выполняется, но дефицит грузоподъемности пролетного строения относительно невелик. В таких случаях выполняются статические испытания сооружения, по результатам которых определяются критерии оценки грузоподъемности пролетного строения, регламентируемые в нормах. Учет влияния толщины покрытия на грузоподъемность моста должен быть обоснован результатами испытаний.

При этом значения коэффициентов надежности по нагрузкам от слоев одежды ездового полотна, учитывающих неравномерность толщины слоев и погрешность измерений, необходимо определять отдельно статистическими методами с принятой для расчетных величин обеспеченностью – «три стандарта». Для учета возможного увеличения толщины асфальтобетонного покрытия в процессе эксплуатации моста целесообразно ввести к нагрузке от покрытия дополнительный коэффициент перспективного возрастания 1,1 или в качестве альтернативы увеличить измеренную толщину асфальтобетонного покрытия на 4–5 см.

Ключевые слова: грузоподъемность, испытания, мост, нагрузка, нормы, покрытие, техническое состояние, транспортное средство

Для цитирования: Васильев А. И., Курыпов А. А., Лебедев А. А. Некоторые проблемы, возникающие при оценке грузоподъемности автодорожных мостов в процессе натурных исследований // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 101–108. DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_101.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Some problems that arise when assessing the load capacity of road bridges in the process of field studies

Alexander I. Vasiliev^{1✉}, Alexey A. Kurypov², Alexander A. Lebedev³

¹ Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia

^{1,2,3} Research Institute of Bridges and Hydraulic Structures, Moscow, Russia

¹ 655178@mail.ru✉

² alekur2005@mail.ru

³ a.lebedev.nii-migs@yandex.ru

Abstract. When studying the technical condition of road bridges in operation, the main and most difficult task is to obtain a correct assessment of the actual load capacity of the bridge. At the same time, problems arise that are mainly related to the insufficiency or lack of technical documentation for the construction, inconsistency of normative and methodological documents in terms of assessing the load capacity of bridges, uncertainty in the accounting of asphalt concrete pavement. In assessing the actual load capacity of the operated bridges in the classes of the standard load of the AK, there is a contradiction between the various existing load standards

For a unified interpretation of the carrying capacity of bridges, both new and previously built according to various standards, it is necessary in all cases to follow the modern requirements fixed in the current GOST R 32960–2014. This provision requires testing at the regulatory level. When determining the possibility of passing a heavy vehicle over a bridge structure, there are situations when the pass condition determined by theoretical methods is not met, but the deficit in the lifting capacity of the superstructure is relatively small. In such cases, static tests of the structure are performed, the results of which determine the criteria for assessing the load capacity of the superstructure, regulated in the norms. Consideration of the effect of the coating thickness on the bridge load capacity should be justified by the test results.

At the same time, the values of the reliability coefficients to the loads from the layers of clothing of the riding cloth, taking into account the unevenness of the thickness of the layers and the measurement error, must be determined separately by statistical methods with the security accepted for the calculated values – “three standards”. To take into account the possible increase in the thickness of the asphalt concrete coating during the operation of the bridge, it is advisable to introduce an additional coefficient of a prospective increase of 1.1 to the load from the coating, or alternatively, increase the measured thickness of the asphalt concrete coating by 4–5 cm.

Keywords: load capacity, tests, bridge, load, norms, coating, technical condition, vehicle

For citation: Vasiliev A. I., Kurypov A. A., Lebedev A. A. Some problems that arise when assessing the load capacity of road bridges in the process of field studies. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):101–108. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_67_101.

Введение

При исследованиях технического состояния эксплуатируемых автодорожных мостов последовательно решаются две задачи. Первая из них заключается в методическом обеспечении обследований и испытаний моста, в том числе в определении объема и средств освидетельствования и измерений, при испытаниях – в назначении мест измерений, подборе и расстановке испытательной нагрузки, корректной обработке результатов. Все эти вопросы подробно освещены в нормативной (например, СП 79.13330), а также в технической литературе [1–6].

Главной и самой трудной задачей является получение правильной оценки фактической грузоподъемности моста. В зависимости от дальнейшего использования оценка грузоподъемности может быть представлена в трех формах [3]:

- в классах схем временной нагрузки АК и НК [7];
- в виде предельных усилий (напряжений) в несущих элементах от эксплуатационных нагрузок;
- в массах конкретных тяжеловесных транспортных средств, пропускаемых по данному мосту.

Институт НИИ МИГС ежегодно проводит обследования и испытания сотен мостовых

сооружений с целью оценки их грузоподъемности и ресурса долговечности, используя в разных случаях все приведенные выше формы оценки. При этом возникают проблемы, которые связаны в основном с недостаточностью или отсутствием технической документации на сооружение, несогласованностью нормативно-методических документов в части оценки грузоподъемности мостов, неопределенностью учета асфальтобетонного покрытия. В настоящей статье предпринята попытка обозначить перечисленные проблемы и по возможности показать их решение.

В оценке фактической грузоподъемности эксплуатируемых мостов в классах нормативной нагрузки АК имеет место противоречие между различными действующими нормами нагрузок.

В 2021 г. введен в действие ГОСТ Р 59618 на обследования и испытания мостов [8], в соответствии с которым поверочные расчеты грузоподъемности следует выполнять в соответствии с ОДМ 218.4.025–2016 [9].

В этом отраслевом дорожном методическом документе приведены схемы временных подвижных нагрузок, правила их установки и расчетные коэффициенты, которые приняты по нормам 1991 г. [10]. При этом сегодня действуют другие нормы, используемые при проектировании (ГОСТ 32960–2014 [11]), в кото-

рых схемы временных нагрузок существенно отличаются от приведенных в [9].

Действительно, согласно СНиП 2.05.03–84* число полос загрузки нагрузкой АК должно равняться числу полос движения, тогда как ГОСТ 32960–2014 предписывает загружать весь габарит проезда полосами шириной 3,0 м. Также имеет место разница в коэффициентах надежности и полосности. В результате возникает несоответствие классов нагрузки АК для старых и новых мостов, отличия могут превышать 30 % (рис. 1).

Для единого толкования грузоподъемности мостов, как новых, так и построенных ранее по различным нормам, необходимо во всех случаях следовать современным требованиям, зафиксированным в действующем ГОСТ Р 32960–2014 [11]. Это положение требует апробации на нормативном уровне.

Методика исследования

При определении возможности пропуска тяжеловесного транспортного средства по мостовому сооружению встречаются ситуации, когда условие пропуска, определенное теоретическими методами, не выполняется, но дефицит грузоподъемности пролетного строения относительно невелик. В таких случаях

специалистами НИИ МИГС выполняются статические испытания сооружения, по результатам которых определяются два критерия оценки грузоподъемности пролетного строения, регламентируемые в [8] (рис. 2).

Первый из этих критериев – конструктивный коэффициент K , вычисляемый по формуле

$$K = \frac{S_e}{S_{cal}}, \quad (1)$$

где S_e – фактор, измеренный под воздействием испытательной нагрузки; S_{cal} – тот же фактор, найденный от испытательной нагрузки расчетным путем с учетом фактического состояния конструкции.

Конструктивные коэффициенты следует определять для наиболее загруженных элементов при каждом положении испытательной нагрузки. Они отражают все запасы грузоподъемности на момент испытаний, в том числе за счет включения в работу балок дорожной одежды, а также за счет отличия фактической пространственной работы конструкций от теоретической по расчетной схеме.

По данным многочисленных испытаний значения коэффициента K для основных несущих конструкций, как правило, составляют 0,6–0,8.

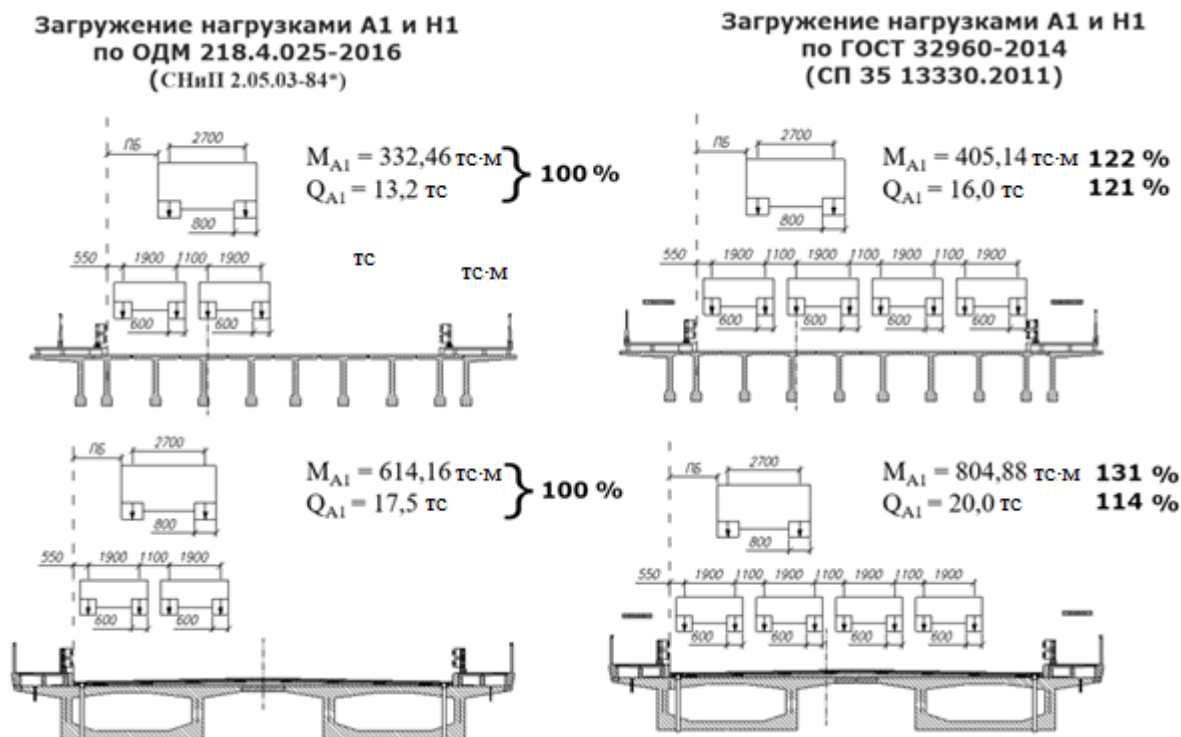


Рис. 1. Сравнение усилий от нагрузки АК (при $K = 1$), приложенной по разным нормам



Рис. 2. Испытательная нагрузка на сооружении

Конструктивный коэффициент как показатель запаса можно использовать при оценке возможности пропуска по мосту нагрузки сразу же после испытаний, но ни в коем случае нельзя по прошествии времени, поскольку степень сцепления дорожной одежды с несущими конструкциями меняется с изменением температуры.

Соответствие фактической пространственной работы пролетного строения теоретическим предпосылкам, использованным в расчетах, оценивается с помощью предложенного канд. техн. наук Ю. М. Егорушкиным коэффициента адекватности K_a :

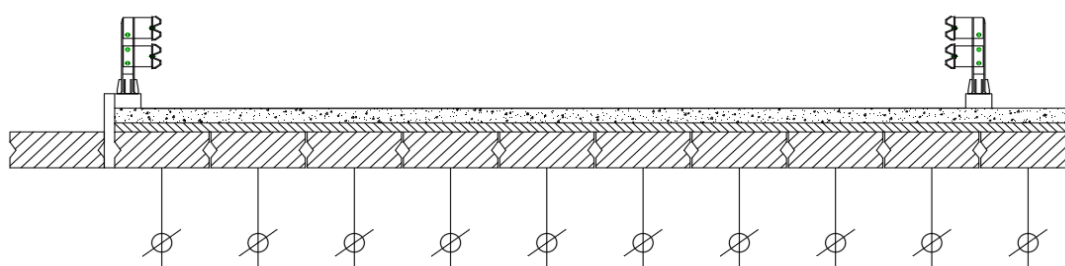
$$K_a = \frac{f_{\max} / \sum_{i=1}^n f_i}{w_{\max} / \sum_{i=1}^n w_i}, \quad (2)$$

где f_{\max} , w_{\max} – максимальные (по абсолютной величине) фактические и теоретические прогибы балки соответственно; n – число балок (ферм, арок) или любых других точек в поперечном сечении пролетного строения, прогибы которых измерялись при испытаниях; f_i , w_i – фактические (измеренные) и теоретические (рассчитанные) прогибы i -й балки соответственно.

Таким образом, исследуется фактическое поперечное распределение усилий от временной нагрузки между балками (рис. 3). Данные исследования показывают, что, как правило, в работу на восприятие временной нагрузки активно включается большее количество балок, чем изначально предполагается расчетом.

В ходе эксперимента требуется измерение прогибов одновременно всех балок или плит в поперечном сечении. Для этого рекомендуется использовать электронные компьютерно-измерительные системы, которые позволяют с достаточной точностью измерить прогибы всех балок (плит) в режиме реального времени. НИИ МИГС использует систему «КИС-М» [12], величины прогибов определяются лазерными дальномерами. Каждый дальномер снабжен автономным радиомодулем. Это позволяет разворачивать необходимое количество дальномеров в очень короткое время, так как не требуется прокладка соединительных кабелей, при установке необходимо просто направить луч дальномера. Далее с заданным периодом получаем данные в виде графиков (рис. 4).

Коэффициент адекватности практически не зависит от толщины и включения в работу



Лазерные дальномеры под плитами П1-П10

Рис. 3. Схема установки измерительных приборов

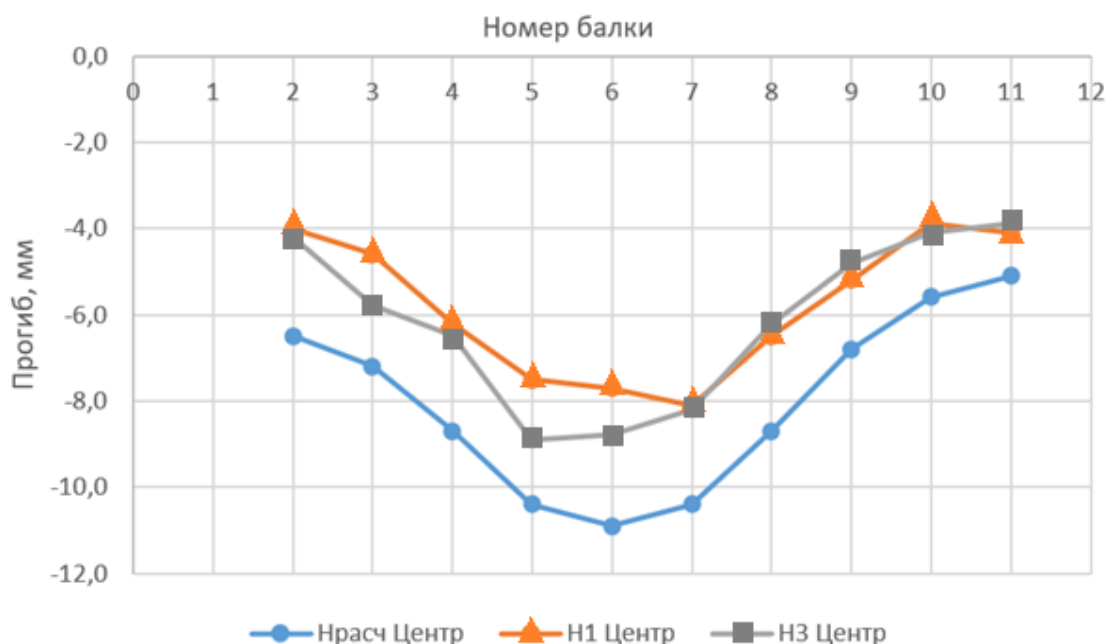


Рис. 4. Диаграммы расчетных и измеренных прогибов плит

несущих элементов дорожной одежды и отражает запасы по отношению к расчетной схеме, заложенные в самой конструкции пролетного строения. Как показывает практика, его значения находятся в диапазоне 0,7–1,0. Если какой-либо из упомянутых коэффициентов превышает 1,0, это требует серьезного анализа и, возможно, усиления моста.

Еще одно интересное замечание. Отношение K_a/K показывает влияние дорожной одежды на грузоподъемность моста на момент испытаний.

Таким образом, методика определения возможности пропуска по мостовому сооружению тяжеловесных транспортных средств включает следующие этапы:

1. Расчетom определяется возможность пропуска по мостовому сооружению конкретного транспортного средства.

2. В случае дефицита грузоподъемности проводятся статические испытания, по результатам которых определяются конструктивный коэффициент и коэффициент адекватности.

3. С использованием конструктивного коэффициента определяется грузоподъемность на момент испытаний.

4. С помощью коэффициента адекватности определяется грузоподъемность без учета влияния дорожной одежды. Для этого поперечное распределение в расчетной модели корректируется по результатам исследований и выявляются запасы грузоподъемности.

Данная методика была неоднократно опробована на различных мостах. Результаты подтверждены экспериментально при сопровождении тяжеловесных и крупногабаритных грузов.

Результаты исследования

Однако в настоящее время в нормативной документации эта методика не закреплена, что создает трудности при согласовании специального проекта пропуска у балансодержателей мостовых сооружений.

Возможность использования указанной методики при периодических обследованиях мостов позволит более точно оценить грузоподъемность пролетных строений существующих мостов. Это даст возможность в ряде случаев смягчить действующие ограничения на мостах с незначительными повреждениями несущих конструкций и ужесточить ограничения в случае обнаружения «клавишного эффекта» ввиду наличия скрытых повреждений (разрушения шпонок плит, повреждения швов омоноличивания балок, разрушения замков диафрагм и т. д.)

В [9] приведен коэффициент надежности к нагрузкам от слоев одежды ездового полотна, равный 1,2. Этот коэффициент включает в себя запас, связанный с погрешностью измерений и неравномерной толщиной слоев, позволяющий увеличить толщину асфальтобетонного покрытия в процессе эксплуатации моста в период до следующего обследования.

При определении фактической грузоподъемности в классах схем АК и НК проблем не возникает. Однако при определении возможности пропуска тяжеловесного транспортного средства требуется определить грузоподъемность на текущий момент времени. С применением коэффициента 1,2 в постоянных нагрузках необоснованно учитывается «перспективный» слой асфальта, которого на момент обследования нет. Текущая грузоподъемность сооружения таким образом искусственно занижается.

Рационально значения коэффициентов надежности к нагрузкам от слоев одежды ездового полотна, учитывающих неравномерность толщины слоев и погрешность измерений, необходимо определять отдельно статистическими методами с принятой для расчетных величин обеспеченностью – «три стандарта».

Для учета возможного увеличения толщины асфальтобетонного покрытия в процессе эксплуатации моста целесообразно ввести к нагрузке от покрытия дополнительный коэффициент перспективного возрастания 1,1

или в качестве альтернативы увеличить измеренную толщину асфальтобетонного покрытия на 4–5 см.

Как отмечалось выше, есть необходимость однозначно определить правила расчета грузоподъемности мостов по результатам натурных исследований. На этот счет получено разъяснение Росавтодора в письме за № 05-29/11353 от 29.03.2023 в адрес ООО «НИИ МИГС»: «При расчетах грузоподъемности необходимо во всех случаях следовать требованиям (схемы, правила установки и расчетные коэффициенты) современных документов ГОСТ 32960–2014 и ГОСТ 33390–2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Мосты. Нагрузки и воздействия» (далее – ГОСТ 33390–2015) применительно к нагрузкам АК и НК».

В настоящее время в отрасли наблюдается тенденция по замене ОДМ на ГОСТы. Следует ожидать отмены [9]. Между тем в этом документе содержится ряд полезных положений, которые следует в каком-либо виде сохранить.

В связи с этим предлагаем, не ожидая отмены [9], разработать новый ГОСТ Р «Определение грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах». В нем отразить следующие разделы:

1. Оценка фактической грузоподъемности эксплуатируемых мостов в классах нормативных нагрузок, прикладываемых по правилам установки, в соответствии с действующими на момент обследования нормами.

2. Методика определения грузоподъемности для оценки возможности пропуска по мостовому сооружению тяжеловесного транспортного средства.

3. Методика уточнения грузоподъемности мостового сооружения по результатам испытаний.

4. Назначение расчетных коэффициентов и коэффициентов сочетания нагрузок для оценки грузоподъемности эксплуатируемых мостов.

Выводы

1. При оценке фактической грузоподъемности эксплуатируемых мостов в классах нормативной нагрузки АК имеет место существенное противоречие между действующими нормами проектных нагрузок (СП 35.13330.2011 и ГОСТ 32960–2014) и ведомственным документом ОДМ 218.4.025–2016, который ориентиру-

ется на устаревшую схему из СНиП 2.05.03–84*. Необходимо во всех случаях использовать схему АК по СП 35.13330.2011 и ГОСТ 32960–2014.

2. Необходимо откорректировать ОДМ 218.4.025–2016, а в случае его отмены разработать новый ГОСТ «Оценка грузоподъемности эксплуатируемых искусственных сооружений на автомобильных дорогах».

3. Для получения уточненной оценки фактической грузоподъемности эксплуатируе-

мых мостов целесообразно проводить статические испытания мостов, которые позволят оценить грузоподъемность на текущий момент и на перспективу. Предложена методика получения такой оценки.

4. Толщину каждого слоя дорожной одежды и асфальтобетонного покрытия необходимо определять отдельно статистическими методами с принятой для расчетных величин обеспеченностью – «три стандарта».

Список источников

1. СП 79.13330.2012. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний : актуализированная редакция СНиП 3.06.07–86* : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30.06.2012 г. № 273 : введен в действие с 1 января 2013 г. Москва : Минрегион России, 2013. 58 с.

2. Быкова Н. М., Баранов Т. М., Толстиков Е. О. Развитие методики оценки грузоподъемности мостов с использованием мобильных автоматизированных систем мониторинга // Транспортные сооружения. 2015. Т. 2, № 4. С. 1–10.

3. Васильев А. И. Грузоподъемность и долговечность мостовых сооружений. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 200 с.

4. Olaszek P., Casas J. R. Practical considerations regarding results from static and dynamic load testing of bridges // Frontiers in built environment. 2019. Vol. 5. Article 11. DOI 10.3389/fbuil.2019.00011.

5. Commander B. Evolution of bridge diagnostic load testing in the USA // Frontiers in built environment. 2019. Vol. 5. Article 57. DOI 10.3389/fbuil.2019.00057.

6. Non-destructive testing of a 100-year-old reinforced concrete flat slab bridge / P. J. Wolert, M. K. Kłodziejczyk, J. M. Stallings, A. S. Nowak // Frontiers in built environment. 2020. Vol. 6. Article 31. DOI 10.3389/fbuil.2020.00031.

7. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы : актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84* : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 28 декабря 2010 г. № 822 : введен в действие с 20 мая 2011 г. Москва : ЦПП, 2011. 340 с.

8. ГОСТ Р 59618–2021. Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила обследований и методы испытаний : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 декабря 2021 г. № 1745-ст : введен впервые. Москва : Российский институт стандартизации, 2022. 54 с.

9. ОДМ 218.4.025–2016. Рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. Общая часть : издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 09.11.2016 N 2322-р / разработан Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет путей сообщения». Москва : Федеральное дорожное агентство, 2016. 55 с.

10. СНиП 2.05.03–84*. Мосты и трубы : утверждены Постановлением Госстроя СССР от 30 ноября 1984 г. № 200. Москва : ЦПП, 1991. 239 с.

11. ГОСТ 32960–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы загрузки : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 сентября 2014 г. № 70-П) : введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июля 2015 г. Москва : Стандартинформ, 2019. 8 с.

12. Хазанов М. Л. Компьютерная измерительная система для испытаний и мониторинга мостовых конструкций // Приборы. 2017. № 10. С. 30–33.

Reference

1. SP 79.13330.2012 Bridges and pipes. Rules for examinations and tests. Updated edition of SNiP 3.06.07–86*. Approved by order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Ministry of Regional Development of Russia) dated June 30, 2012 No. 273. Put into effect on January 1, 2013. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2013. 58 p. (In Russ.).

2. Bykova N. M., Baranov T. M., Tolstikov E. O. Development of a methodology for assessing the load capacity of bridges using mobile automated monitoring systems. *Transport structures*. 2015;2(4):1–10. (In Russ.).
3. Vasiliev A. I. Load capacity and durability of bridge structures. Moscow, Vologda: Infra-Engineering; 2021. 200 p. (In Russ.).
4. Olaszek P., Casas J. R. Practical considerations regarding results from static and dynamic load testing of bridges. *Frontiers in built environment*. 2019;5:11. DOI 10.3389/fbuilt.2019.00011.
5. Commander B. Evolution of bridge diagnostic load testing in the USA. *Frontiers in built environment*. 2019;5:57. DOI 10.3389/fbuilt.2019.00057.
6. Wolert P. J., Kolodziejczyk M. K., Stallings J. M., Nowak A. S. Non-destructive testing of a 100-year-old reinforced concrete flat slab bridge. *Frontiers in built environment*. 2020;6:31. DOI 10.3389/fbuilt.2020.00031.
7. SP 35.13330.2011 Bridges and pipes. Updated version of SNiP 2.05.03–84*. Approved by order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Ministry of Regional Development of Russia) dated December 28, 2010 No. 822. Put into effect on May 20, 2011. Moscow: TsPP; 2011 340 p. (In Russ.).
8. GOST R 59618–2021 Public automobile roads. Bridge structures. Rules for examinations and test methods. Approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 9, 2021 No. 1745-st. Introduced for the first time. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2022. 54 p. (In Russ.).
9. ODM 218.4.025–2016 Recommendations for determining the carrying capacity of operating bridge structures on public roads. General part. Published on the basis of the order of the Federal Road Agency dated November 9, 2016 N 2322-r. Developed by the Siberian Transport University. Moscow: Federal Road Agency; 2016. 55 p. (In Russ.).
10. SNiP 2.05.03-84* Bridges and pipes. Approved by Decree of the USSR State Construction Committee of November 30, 1984 No. 200. Moscow: TsPP; 1991. 239 p. (In Russ.).
11. GOST 32960–2014. Public roads. Standard loads, calculation loading schemes. Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (protocol dated September 30, 2014 No. 70-P). Put into effect as a national standard of the Russian Federation from July 1, 2015. Moscow: Standartinform; 2019. 8 p. (In Russ.).
12. Khazanov M. L. Computer measuring system for testing and monitoring of bridge structures. *Instruments*. 2017;(10):30–33. (In Russ.).

Информация об авторах

А. И. Васильев – профессор кафедры «Мосты, тоннели и строительные конструкции» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), директор по науке Научно-исследовательского института мостов и гидротехнических сооружений, доктор технических наук.

А. А. Курыпов – генеральный директор Научно-исследовательского института мостов и гидротехнических сооружений.

А. А. Лебедев – заместитель начальника отдела обследований и испытаний мостовых сооружений Научно-исследовательского института мостов и гидротехнических сооружений.

Information about the authors

A. I. Vasiliev - Professor of the Bridges, Tunnels and Building Structures Department, Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI), Director of Science, Research Institute of Bridges and Hydraulic Structures, Doctor of Engineering.

A. A. Kuryov – General Director of the Research Institute of Bridges and Hydraulic Structures.

A. A. Lebedev – Deputy Head of the Inspection and Testing of Bridge Structures Department, Research Institute of Bridges and Hydraulic Structures.

Статья поступила в редакцию 30.10.2023; одобрена после рецензирования 17.11.2023; принята к публикации 18.11.2023.

The article was submitted 30.10.2023; approved after reviewing 17.11.2023; accepted for publication 18.11.2023.

Информация для авторов

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

2. Статья предоставляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (гарнитура Times New Roman, кегль 14 pt; поля: верхнее и нижнее – 20, левое – 30, правое – 10 мм). Файл с текстом статьи должен быть назван фамилией автора (например: Иванов.doc).

3. Статья должна содержать:

- тип статьи (например, научная, обзорная, рецензия);
- УДК;
- название статьи;
- фамилию, имя и отчество каждого автора, место его работы/учебы, город, страну, ученую степень, звание, должность;
- аннотацию на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- библиографический список на русском и английском языках.

4. Список источников составляется в порядке упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Список должен содержать не менее 10 источников, из них собственных статей должно быть не более 30 %.

5. Графический материал должен быть выполнен в графических редакторах, поддерживающих векторную и растровую графику. Иллюстрации должны быть четкими, все подписи на рисунке должны хорошо читаться и иметь расшифровку. Если в тексте есть фотография, отсканированный рисунок, то они обязательно должны быть представлены также отдельным файлом в исходном графическом формате (например: jpeg, tiff).

6. Статья для опубликования в журнале и заявка отправляются по адресу: vestniksgups@sibgups.ru.

7. В редакцию предоставляются оригиналы документов: экспертное заключение о возможности опубликования статьи, статья и заявка.

8. Публикация статей в журнале бесплатная.

Более подробную информацию по вопросам опубликования статей и размещения другой информации в журнале можно найти на сайте издания.



www.stu.ru/science



vestniksgups@sibgups.ru



+7 383 328-04-36



630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук,
191, корп. 3, комн. 307



Главный редактор *А. Л. Манаков*
Заместитель главного редактора *А. Д. Абрамов*
Заместитель главного редактора *С. В. Карасев*
Ответственный секретарь *М. С. Галай*
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*
Редакторы: *А. О. Елесина, 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 20.12.2023. Дата выхода в свет 21.12.2023
Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 13,0 уч.-изд. л., 13,75 усл.-печ. л. Заказ № 3860

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
2023. № 4 (67). 1–110