

ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 1 (68). 2024 16+



УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

Галай Марина Сергеевна – канд. техн. наук

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

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)»

№ 1 (68) · 2024 · ЯНВАРЬ – МАРТ · 16+

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

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

<i>Гришкова Д. Ю.</i> Разработка мероприятий по сокращению времени простоя местного вагона на железнодорожной станции	5
<i>Манакон А. Л., Коларж С. А., Саломатов Е. М.</i> Алгоритм корректировки количества и класса пассажирских транспортных средств на основе данных пассажиропотока	13
<i>Числов О. Н., Луганченко Н. М., Хан В. В., Магомедова Н. М.</i> Развитие методики цифрового аксиоматного моделирования объекта транспортной инфраструктуры	22
<i>Эсаулов В. А., Давыдов Б. И., Мединцев Е. В.</i> Рациональное распределение перевозок на основе решения транспортной задачи линейного программирования	33
<i>Величко Д. В., Рыжкова В. А.</i> Оценка зависимости уровня загрязненности балласта от удаленности от мест массовой погрузки угля	41
<i>Богданова Е. С., Неволин Д. Г., Черепанова Л. А., Пургина Д. К.</i> Совершенствование алгоритма работы сортировочной станции на основе оптимизации информационных потоков	49
<i>Ильиных А. С., Войченко А. А.</i> Техничко-экономический анализ применения универсального оборудования для обслуживания рельсовых скреплений	59
<i>Тимофеев Е. Н., Севостьянов А. А., Сокольников А. В.</i> Создание цифровой модели железнодорожного пути с использованием беспилотных летательных аппаратов	73
<i>Разуваев Д. А., Чахлов М. Г.</i> Оценка коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов при промерзании	83

Строительство и архитектура

<i>Шохирев М. В.</i> Экспериментальные исследования несущей способности двухслойного основания	93
<i>Герасимов Е. П.</i> О нормировании надежности раскрытия трещин, нормальных к продольной оси железобетонных изгибаемых элементов, из условия ограничения проницаемости	103
<i>Иванов Е. О.</i> Контролируемые параметры систем мониторинга железнодорожных пролетных строений со сквозными фермами	109

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)"

№ 1 (68) · 2024 · January – March · 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

- D. Yu. Grishkova.* Development of measures to reduce the downtime of a local car at a railway station5
- A. L. Manakov, S. A. Kolarzh, E. M. Salomatov.* Algorithm for adjusting the number and class of passenger vehicles based on passenger traffic data13
- O. N. Chislov, N. M. Luganchenko, V. V. Khan, N. M. Magomedova.* Principles of axiomatic technical and technological modeling of a transport object22
- V. A. Esaulov, B. I. Davydov, E. V. Medintsev.* Increasing the volume of cargo transportation due to rational distribution of volumes among loading stations33
- D. V. Velichko, V. A. Ryzhkova.* Assessment of ballast contamination level dependence on remoteness from coal mass loading sites41
- E. S. Bogdanova, D. G. Nevolin, L. A. Cherepanova, D. K. Purgina.* Improvement of the marshalling yard operation algorithm based on the optimization of information flows49
- A. S. Ilinykh, A. A. Voychenko.* Technical and economic analysis of universal equipment application for servicing rail fastenings59
- E. N. Timofeev, A. A. Sevostyanov, A. V. Sokolnikov.* Prospects for using a digital model of the railway track in the planning and organization of work73
- D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov.* The assessment of the coefficients of permeability of silicified soils during freezing83

Building and Architecture

- M. V. Shokhirev.* Experimental studies of the bearing capacity of a two-layer foundation.....93
- E. P. Gerasimov.* On rationing the reliability of crack opening normal to the longitudinal axis of reinforced concrete bent elements from the condition of permeability limitation.....103
- E. O. Ivanov.* Controlled parameters of monitoring systems for railway bridge superstructures with trusses.....109

TRANSPORT

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 5–12.
The Siberian Transport University Bulletin. 2024. No. 1 (68). P. 5–12.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.212.7
doi 10.52170/1815-9265_2024_68_5

Разработка мероприятий по сокращению времени простоя местного вагона на железнодорожной станции

Диана Юрьевна Гришкова

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

Аннотация. В статье рассмотрена значимость железнодорожного транспорта в организации доставки грузов. В настоящее время участники внешнеэкономической деятельности: экспортеры, импортеры, логисты и экспедиторы – все чаще предпочитают использовать в качестве основного вида транспорта железную дорогу. Она предоставляет достаточно быстрый, предсказуемый и гораздо более дешевый сервис по сравнению с авиа- и автотранспортом. Установлено, что средняя скорость движения контейнерных поездов по российским железным дорогам составляет свыше 1 000 км/сут. Время следования груза на направлении запад – восток в среднем составляет 7,6 сут, что на 0,4 сут опережает показатель, установленный Комплексным планом модернизации и расширения магистральной инфраструктуры. На сегодняшний момент чистое время в пути при доставке грузов авиационным транспортом в разы меньше, чем при доставке железнодорожным. Тем не менее масса времени уходит на наземные операции, в том числе на ожидание борта. Вместимость поезда позволяет одним рейсом доставить количество груза, для перевозки которого необходимо совершить до шести рейсов на самолете, что в итоге увеличивает разницу в стоимости перевозок до 30 раз и неизбежно отражается на конечной стоимости товара. Этим и объясняется высочайший спрос на железнодорожные перевозки с большим плечом доставки, особенно в сообщении со странами Азиатско-Тихоокеанского региона. При организации железнодорожных перевозок в срок доставки грузов входят также операции, выполняемые на железнодорожной станции. В целях сокращения времени нахождения вагонов на железнодорожной станции и, следовательно, улучшения сервиса для клиентов в работе рассмотрены операции, выполняемые на железнодорожной станции К. Детально изучена технология работы при минимальных, максимальных и перспективных объемах переработки местных вагонов. Выявлены непроизводительные простои вагонов в ожидании необходимых операций путем построения суточных планов-графиков. При помощи диаграммы Исикавы определены основные направления улучшения деятельности железнодорожной станции в области сокращения непроизводительных простоев. Предложено мероприятие для сокращения времени нахождения местного вагона на станции, определенное посредством инструмента бережливого производства – воронки оптимизации. Составлен суточный план-график с учетом предлагаемого мероприятия. Определены показатели простоя местного вагона. Выполнены экономические расчеты по существующей технологии организации операционной деятельности и по предлагаемой.

Ключевые слова: срок доставки, простой местного вагона, железнодорожная станция, время ожидания, диаграмма Исикавы, воронка оптимизации

Для цитирования: Гришкова Д. Ю. Разработка мероприятий по сокращению времени простоя местного вагона на железнодорожной станции // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 5–12. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_5.

TRANSPORT

Original article

Development of measures to reduce the downtime of a local car at a railway station

Diana Yu. Grishkova

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

Abstract. The article considers the importance of railway transport in the organization of cargo delivery. Currently, participants in foreign economic activity: exporters, importers, logisticians and freight forwarders – more and more often prefer to use the railway as the main mode of transport. It provides a fairly fast, predictable and much cheaper service compared to air and motor transport. It has been established that the average speed of

container trains on Russian railways is over 1000 km per day. The transit time of the cargo in the West – East direction is on average 7.6 days, which is 0.4 days ahead of the indicator set by the Comprehensive Plan for Modernization and Expansion of the Trunk Infrastructure. At the moment, the net travel time for the delivery of goods by air is several times less than for the delivery by rail. Nevertheless, a lot of time is spent on ground operations, including waiting for the board. The capacity of the train allows one flight to deliver the amount of cargo that requires up to six flights by plane, which ultimately increases the difference in the cost of transportation up to 30 times and inevitably affects the final cost of the goods. This explains the high demand for rail transportation with a large delivery shoulder, especially in communication with the countries of the Asia-Pacific region. When organizing railway transportation, the delivery time of the goods also includes operations performed at the railway station. In order to reduce the time spent by wagons at the railway station and, thus, to improve the service for customers, the work considers the operations performed at the railway station K. The technology of operation with minimum, maximum and prospective volumes of processing of local cars is studied in detail. Unproductive downtime of wagons in anticipation of the necessary operations through the construction of daily schedules has been revealed. With the help of the Ishikawa diagram, the main directions for improving the activities of the railway station in the field of reducing unproductive downtime are determined. The main measures necessary to reduce the time spent by a local car at the station by means of a lean manufacturing tool – optimization funnel are considered. A daily schedule has been drawn up taking into account the proposed activities. The indicators of idle time of the local car are determined. Economic calculations have been carried out according to the existing technology of the organization of operational activities and the proposed one.

Keywords: delivery time, local car downtime, railway station, waiting time, Ishikawa diagram, optimization funnel

For citation: Grishkova D. Yu. Development of measures to reduce the downtime of a local car at a railway station. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):5–12. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_5.

Введение

Железнодорожный транспорт занимает ведущее положение в структуре рыночной экономики страны, является приоритетным звеном на рынке транспортных услуг [1, 2]. Его отличительной чертой является универсальность: возможность обслуживать все отрасли экономики и удовлетворять потребности населения в перевозках практически во всех климатических зонах и в любое время года, высокая провозная способность и эффективность перевозок массовых грузов на большие расстояния, сравнительно большие скорости, надежность и безопасность, низкая себестоимость перевозок, высокая экологическая чистота.

Срок доставки груза является одним из важнейших показателей качества перевозочного процесса. Сокращение срока доставки груза при перевозке железнодорожным транспортом играет немаловажную роль в повышении конкурентоспособности на рынке транспортных услуг [3].

Кроме того, удовлетворение требований грузовладельцев по срокам доставки является немаловажным показателем качественного транспортного обслуживания и выделяется как одна из особенностей организации и технологии перевозочного процесса [4, 5].

Грузовая железнодорожная станция выполняет следующие операции: прием груза,

отправление, взвешивание, хранение, формирование и расформирование, технический и коммерческий осмотры и т. д. На грузовых станциях выполняются начальные и конечные операции перевозочного процесса железнодорожного транспорта общего пользования, зарождаются и погашаются вагонопотоки.

Главной задачей грузовой станции является своевременное выполнение планов погрузки, выгрузки и перевалки грузов в условиях наиболее рационального и эффективного использования технических средств различных видов транспорта с целью исключения задержек грузопотоков при обеспечении сохранной и своевременной доставки грузов получателям [6].

Важное значение имеет определение комплексных методов сокращения простоя вагонов при сложившихся условиях общей организации перевозочного процесса за счет повышения эффективности работы с вагонами путем оптимизации процессов взаимодействия всех звеньев, участвующих в этой работе на станции. В работе основное внимание уделено поиску способов сокращения простоев вагонов с помощью анализа текущей ситуации на станции и внедрения экономически выгодного варианта.

Железнодорожная станция *K* по характеру работы является грузовой, по объему и сложности выполняемых на ней операций относится

к внеклассной. К станции примыкают пути не общего пользования, предназначенные для обслуживания следующих организаций: ОАО «Промышленно-железнодорожный транспорт «ЛТ»»; ОАО «С.элеваторстрой»; ПАО «ТК» и др. Преобладающим по погрузке и выгрузке грузом являются контейнеры.

Материалы и методы исследования

Срок доставки грузов зависит от многих факторов. Немаловажную роль в расчете срока доставки играет нахождение вагона с грузом на станции. В настоящее время фактические нормы простоя местного вагона на станции в среднем на 8,49 ч превышают плановые показатели по причине ожидания операций технического и коммерческого осмотра вагонов, сгущенности подач порожних вагонов. Время нахождения вагонов на станции включает в себя время на выполнение необходимых технологических операций, а также время на их ожидание, иными словами, непроизводительные простои. Ожидание возникает в том случае, если производственный процесс построен неритмично и наблюдается большая загруженность одного производственного участка относительно другого. Железнодорожная станция, как и любой производственный объект, работает неравномерно: существуют определенные периоды с минимальными объемами работы и, наоборот,

с максимальными. Загруженность элементов инфраструктуры, соответственно, будет отличаться. Анализ минимальных, максимальных и перспективных значений прибывающего вагонопотока на железнодорожную станцию К приведен в табл. 1. На основании минимальных, максимальных и перспективных объемов местной работы станции построены суточные планы-графики, отражающие технологию работы станции с местными вагонами (рис. 1) [7].

На примере диаграммы Исикавы (рис. 2) рассмотрим, какие факторы влияют на простой вагонов в ожидании обработки [8]. В среднем простой в ожидании обработки бригадами пункта технического обслуживания вагонов (ПТО) и пункта коммерческого обслуживания вагонов (ПКО) составляет порядка 3,7 ч.

Диаграмма Исикавы предназначена для определения и структурирования причинно-следственных связей между объектом анализа и влияющими на него факторами, что позволяет верно направить усилия для решения проблем или достижения определенных целей.

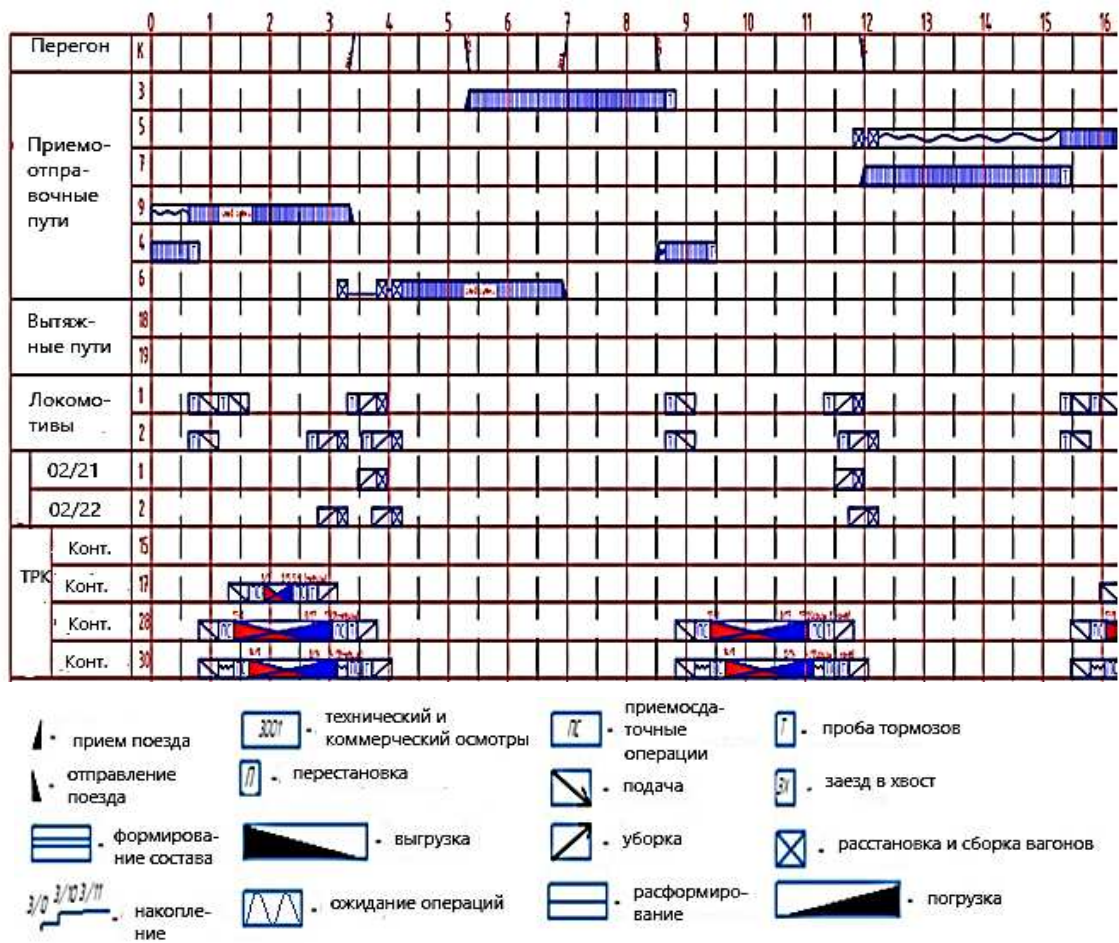
По результатам выполненного анализа причинно-следственных связей, влияющих на простой вагона на станции, рассмотрим возможные мероприятия по сокращению межоперационных простоев по некоторым технологическим операциям.

Таблица 1

Размеры прибытия вагонов на станцию, ваг./сут

Род груза	Максимальные значения	Перспективные значения	Минимальные значения
Бумага	1	1	–
Бумага (порожние)	1	1	–
Грузы в контейнерах	129	146	104
Грузы в контейнерах (порожние)	–	2	18
Зерно	1	1	–
Зерно (порожние)	–	1	–
Каменный уголь	1	1	–
Лом черных металлов (порожние)	2	1	1
Метизы (порожние)	14	–	–
Нефть	4	1	–
Нефть (порожние)	4	1	–
Продовольственные грузы	10	8	2
Продовольственные грузы (порожние)	9	8	2
Прочие	7	3	1
Прочие (порожние)	4	1	–
Сельскохозяйственные машины	2	1	–
Сельскохозяйственные машины (порожние)	2	1	–
Строительные грузы	9	5	4
Строительные грузы (порожние)	5	3	2

а)



б)

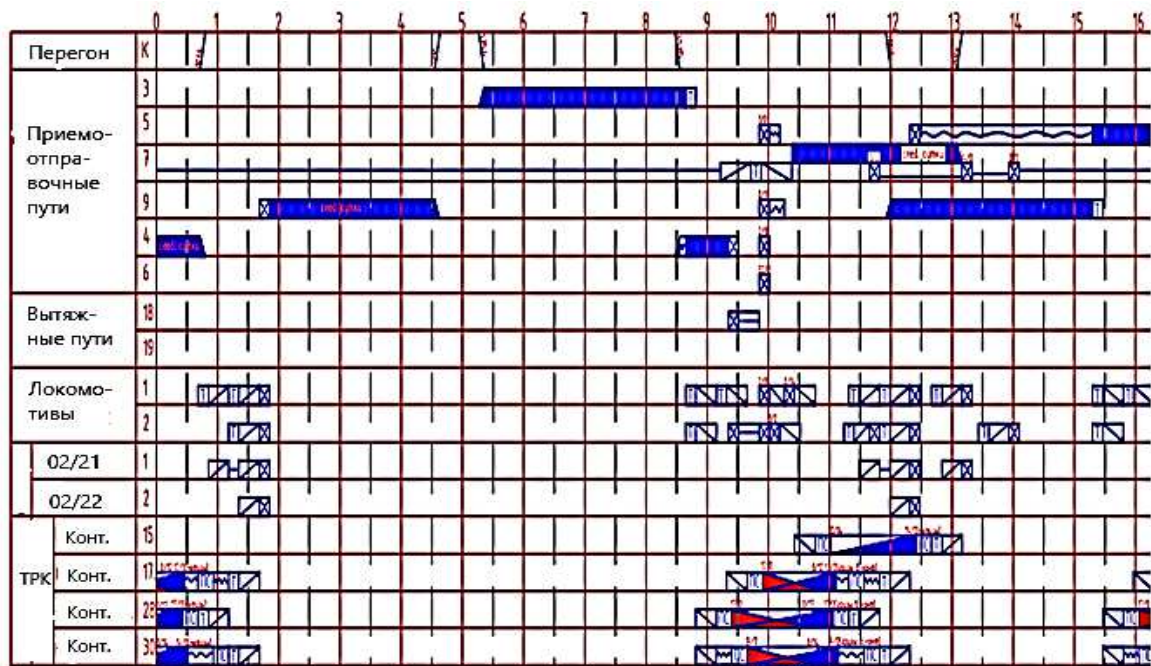


Рис. 1. Фрагмент суточного плана-графика при значениях погрузки и выгрузки (начало):
а – минимальных; б – максимальных

в)

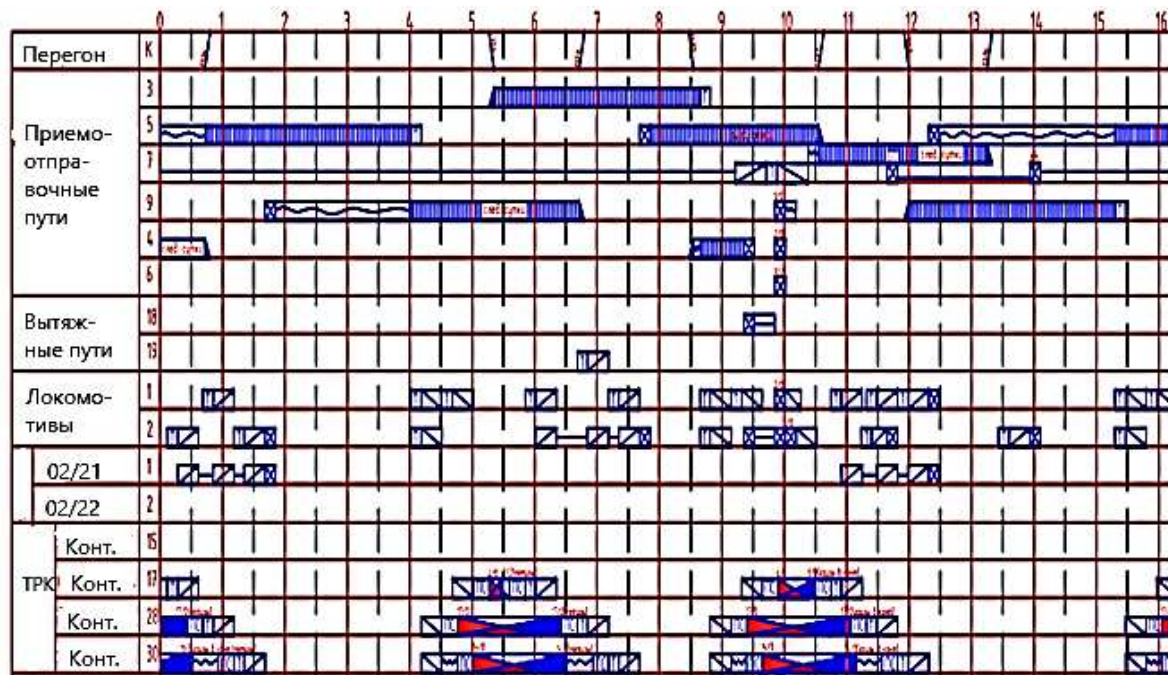


Рис. 1. Фрагмент суточного плана-графика при значениях погрузки и выгрузки (окончание):
в – перспективных (прогнозируемых)



Рис. 2. Факторы, влияющие на простой вагона на станции

С этой целью применим один из инструментов актуальной на сегодняшний день концепции бережливого производства – воронку оптимизации (табл. 2) [9].

Воронка оптимизации – это инструмент, позволяющий трансформировать операции в процессах, делать их более легкими и менее длительными посредством введения комплекса мероприятий на разных этапах.

Результаты исследования

В результате сопоставления диаграммы Исикавы и воронки оптимизации можно сделать вывод, что наиболее целесообразным является вопрос разработки мероприятий по изменению штата работников, участвующих в операционной деятельности станции.

Среднее время ожидания обработки поездов работниками ПТО и ПКО при минимальных

Таблица 2

Воронка оптимизации производственных процессов

Этап	Операция						
	1. Прибытие (осмотр вагонов)	2. Ожидание обработки	3. Расформирование	4. Грузовые операции	5. Формирование	6. Ожидание обработки	7. Отправление (осмотр вагонов)
Исключить операции	Нельзя, угрожает безопасности движения		Нельзя			Нельзя, угрожает безопасности движения	
Упростить	Можно, если добавить работников в смену		Можно, если запроектировать сортировочную горку	Можно, если добавить средства механизации	Можно, если запроектировать сортировочную горку	Можно, если добавить работников в смену	
Объединить	Нельзя		Можно с операциями 4, 5		Можно с операциями 3, 4	Можно с операцией 7	Можно с операцией 6
Автоматизировать	Частично можно, дорого						

объемах работы составляет 3,68 ч (табл. 3), при максимальных – 1,83 ч, при перспективных – 1,58 ч. Меньшее время простоя местного вагона и время ожидания операций при максимальных и перспективных объемах обуславливается увеличением количества вагонов в одной подаче, следующей на пути необщего пользования.

Средний простой местного вагона на станции определяется как

$$t_m^{cp} = \frac{\sum(n_m t_m)}{\sum(n_m)}, \quad (1)$$

где $\sum(n_m t_m)$ – суммарное количество вагоно-часов простоя местного вагона на станции, ваг.-ч; $\sum(n_m)$ – суммарное количество местных вагонов, ваг./сут.

Средний простой местного вагона составляет:

– при минимальных значениях

$$t_m^{cp} = \frac{1\,500,80}{112} = 13,40 \text{ ч;}$$

– при максимальных значениях

$$t_m^{cp} = \frac{3\,025,69}{182} = 16,63 \text{ ч;}$$

– при перспективных значениях

$$t_m^{cp} = \frac{2\,823,64}{183} = 15,43 \text{ ч.}$$

В качестве мероприятия для сокращения непроизводительных простоев местного вагона введем в штат работников дополнительно двух приемосдатчиков и одного осматривщика вагонов [10]. Выполним экономическое сравнение вариантов работы станции с предлагаемым мероприятием и без него. Разница между эксплуатационными затратами, возникающими в результате простоя вагонов в поездах в ожидании операций, и заработной платой работников рассчитывается по формуле

$$\Delta \mathcal{E} = C_{п-ч} - \Phi OT_{год}, \quad (2)$$

где $C_{п-ч}$ – эксплуатационные затраты, возникающие в результате простоя вагонов в поездах в ожидании операций, р./год; $\Phi OT_{год}$ – фонд оплаты труда при введении дополнительных работников, р./год.

Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 3

Суточные затраты вагоно-часов при минимальных объемах работы

Время, ч:мин		Общее время простоя, ч	Количество	
прибытия	отправления		вагонов	вагоно-часов простоя
05:21	18:00	12,65	31	392,15
08:33	21:20	12,78	8	102,24
12:00	03:20	15,33	37	567,21
18:43	06:55	12,20	36	439,20
Итого		–	112	1 500,80

Таблица 4

Экономические расчеты, р./год

Объемы работы	Эксплуатационные затраты при непроизводительных простоях	Затраты на заработанную плату работникам	Разница эксплуатационных затрат
Минимальные	9 780 352,65	853 630,00	8 926 722,65
Максимальные	4 811 369,41	853 630,00	3 957 739,41
Перспективные	7 582 054,55	853 630,00	6 728 424,55

Выводы

Результаты проведенного исследования заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ минимальных, максимальных и перспективных (прогнозируемых) объемов местной работы станции.

2. На изучаемые объемы работ составлены технологические суточные планы-графики, которые наглядно представляют время ожидания технологических операций.

3. При помощи диаграммы Исикавы определены основные причины возникающих ожиданий.

4. Посредством воронки оптимизации, инструмента бережливого производства, назна-

чено мероприятие с целью сокращения простоев местных вагонов – увеличение штата сотрудников.

5. Дано экономическое обоснование предлагаемого мероприятия.

Таким образом, при введении на станцию приемщика поездов и дополнительного осматривателя вагонов в смену расходы, связанные с простоем поездов в ожидании обработки, сократятся, а также будет происходить более тщательный осмотр вагонов в коммерческом отношении, что должно способствовать уменьшению коммерческих неисправностей при погрузке, выгрузке и в пути следования груза.

Список источников

1. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Assessment of transport and storage systems // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1115. P. 570–577.
2. Покровская О. Д. Принципы реализации комплексных транспортно-логистических услуг на железнодорожном транспорте и требования к ним // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2021. Т. 17, № 3. С. 288–303.
3. Кузнецов Д. Д. К вопросу о сроках доставки грузов по договору перевозки // *Просвещение и познание*. 2021. № 1 (1). С. 50–56.
4. Формирование узловых мультимодальных транспортно-логистических центров / С. Э. Ольховиков, Е. А. Петренева, И. Н. Кагадий, О. Б. Шерстобитова // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2023. № 1. С. 106–118. DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_106.
5. Гришкова Д. Ю. Мероприятия по сокращению простоя транзитного вагона с переработкой // *Техник транспорта: образование и практика*. 2020. № 1 (1/2). С. 18–22.
6. Соколова В. Д. Оптимизация работы грузовой станции // *Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта*. 2018. № 14. С. 39–48.
7. Панков С. В. Моделирование и анализ суточного плана-графика станции // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2003. № 2. С. 83–89.
8. Нижегородцев Р. М. Обобщенная диаграмма Исикавы как инструмент факторного анализа // *Дружеский вестник*. 2017. № 6 (20). С. 15–24.
9. Гришкова Д. Ю., Тельнов Н. А. Использование инструментариев и методов бережливого производства в грузовой и коммерческой работе. Опыт внедрения в ОАО «РЖД» и на других видах транспорта // *Вызовы глобализации и развития цифрового общества в условиях новой реальности : сборник трудов VI Международной научно-практической конференции*. Москва : Алф, 2023. С. 59–66.
10. Гришкова Д. Ю., Наперов В. В. Оптимизация выполнения операций на железнодорожной станции // *Передовые инновационные разработки, перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство : сборник научных статей по итогам одиннадцатой научной международной конференции*. Казань : Конверт, 2019. С. 112–113.

References

1. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Assessment of transport and storage systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1115:570–577.
2. Pokrovskaya O. D. Principles of implementation of complex transport and logistics services on railway transport and requirements for them. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2021;17(3):288–303. (In Russ.).
3. Kuznetsov D. D. To the question about the terms of cargo delivery under the carriage contract. *Enlightenment and Cognition*. 2021;(1):50–56. (In Russ.).
4. Olkhovikov S. E., Petreneva E. A., Kagadiy I. N., Sherstobitova O. B. Formation of nodal multimodal transport and logistics centers. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2023;(1):106–118. (In Russ.). DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_106.
5. Grishkova D. Yu. Measures to reduce the downtime of transit vehicles with processing. *Transport Technician: Education and Practice*. 2020;1(1/2):18–22. (In Russ.).
6. Sokolova V. D. Optimization of the work of the freight station. *Modern Problems of Improving the Work of Railway Transport*. 2018;(14):39–48. (In Russ.).
7. Pankov S. V. Modeling and analysis of the daily schedule of the station. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2003;(2):83–89. (In Russ.).
8. Nizhegorodtsev R. M. Generalized Ishikawa diagram as a tool of factor analysis. *Drukerovskij Vestnik*. 2017;(20):15–24. (In Russ.).
9. Grishkova D. Yu., Telnov N. A. The use of lean production tools and methods in cargo and commercial work. Experience of implementation in Russian Railways and other types of transport. Challenges of globalization and development of digital society in the conditions of new reality. *Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference*. Moscow: Alef; 2023. P. 59–66. (In Russ.).
10. Grishkova D. Yu., Naperov V. V. Optimization of operations at a railway station. *Advanced innovative developments, prospects and experience of use, problems of introduction into production. Proceedings of the Scientific Articles on the Results of the Eleventh Scientific International Conference*. Kazan: Convert; 2019. P. 112–113. (In Russ.).

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Статья поступила в редакцию 04.09.2023; одобрена после рецензирования 28.09.2023; принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 04.09.2023; approved after reviewing 28.09.2023; accepted for publication 12.01.2024.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.021.5
doi 10.52170/1815-9265_2024_68_13

Алгоритм корректировки количества и класса пассажирских транспортных средств на основе данных пассажиропотока

Алексей Леонидович Манаков¹, Сергей Александрович Коларж^{2✉},
Егор Максимович Саломатов³

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

¹ manakov005@mail.ru

² kolarzhsa@mail.ru✉

³ salomatow.e@yandex.ru

Аннотация. В современном мире важную социальную и экономическую роль в крупных городах играет общественный транспорт. Качественное предоставление услуги и эффективная работа маршрутной сети способствуют повышению транспортной мобильности горожан, снижению загрязнения окружающей среды, повышению безопасности дорожного движения и улучшению пространственной организации города, что позитивно отражается на качестве жизни населения в крупных городах.

Улично-дорожная сеть в городах России при проектировании и застройке не была адаптирована под массовую автомобилизацию. В результате чего расширение дорожных полос и увеличение количества парковочных мест имеют ограниченные возможности и не позволяют в полной мере устранить негативные последствия, возникающие в ходе роста числа автомобилей. Оптимизация транспортной инфраструктуры в условиях массовой автомобилизации не может устранить возникшую проблему ввиду ограниченности возможности реконструирования улично-дорожной сети. Вследствие чего ключевым решением развития транспортной системы страны является адаптация общественного транспорта к потребностям современного общества.

В статье рассматривается зависимость класса и количества общественного транспорта, работающего на маршрутах, от корреспонденций пассажиров в одном и в другом направлении по маршруту регулярных перевозок. Целью настоящего исследования являлось повышение эффективности работы пассажирского автотранспорта крупных городов путем разработки инструментария для корректировки количества и класса транспортных средств на основании анализа пассажиропотока, фиксируемого на маршруте.

Разработан алгоритм корректировки количества и класса транспортных средств на основе данных о пассажиропотоке. Алгоритм позволяет выявлять неэффективную работу действующих расписаний по маршрутам, неактуальные рейсы для пассажиров, определять требуемый класс и количество транспортных средств для предоставления транспортных услуг, что, в свою очередь, способствует эффективному функционированию маршрутной сети.

Ключевые слова: общественный транспорт, транспортная инфраструктура, оптимизация маршрутной сети, мониторинг пассажиропотока, транспортная система, муниципальное управление

Для цитирования: Манаков А. Л., Коларж С. А., Саломатов Е. М. Алгоритм корректировки количества и класса пассажирских транспортных средств на основе данных пассажиропотока // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 13–21. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_13.

TRANSPORT

Original article

Algorithm for adjusting the number and class of passenger vehicles based on passenger traffic data

Alexey L. Manakov¹, Sergey A. Kolarzh^{2✉}, Egor M. Salomatov³

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

¹ manakov005@mail.ru

² kolarzhsa@mail.ru✉

³ salomatow.e@yandex.ru

Abstract. In the modern world, urban public transport plays an important social and economic role in large cities. High-quality provision of services and efficient operation of the route network contribute to increasing the

transport mobility of citizens, reducing environmental pollution, increasing road safety and improving the spatial organization of the city, which positively affects the quality of life of the population in large cities.

The street and road network in Russian cities was not adapted for mass transportation during design and construction. As a result, the expansion of road lanes and the increase in the number of parking spaces have limited opportunities and do not allow to fully eliminate the negative consequences that arise during the growing number of cars. Optimization of the transport infrastructure for mass motorization will not eliminate the problem that has arisen due to the limited possibility of reconstructing the street and road network. As a result, the key solution for the development of the country's transport system is the adaptation of public transport to the needs of modern society.

The article considers the dependence of the class and quantity of public transport operating on the routes on the correspondence of passengers in one direction and in the other along the route of regular transportation. The purpose of this study was to improve the efficiency of passenger vehicles in large cities based on the analysis of passenger traffic.

An algorithm for adjusting the number and class of vehicles based on passenger traffic data has been developed. The algorithm makes it possible to identify the inefficient operation of existing timetables on the route, irrelevant flights for passengers, to determine the required class and number of vehicles for the provision of transport services, which, in turn, contributes to the effective functioning of the route network.

Keywords: public transport, transport infrastructure, route network optimization, passenger flow monitoring, transport system, municipal management

For citation: Manakov A. L., Kolarzh S. A., Salomatov E. M. Algorithm for adjusting the number and class of passenger vehicles based on passenger traffic data. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):13–21. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_13.

Введение

В современном мире существенная роль в развитии экономической динамики крупных городов (более 1 млн чел.) отводится транспортной инфраструктуре. Транспортная система обеспечивает взаимосвязь между производителями товаров и их потребителями.

За последние 30 лет интенсивное экономическое развитие в Российской Федерации привело к популяризации личного транспортного средства как комфортного и мобильного вида транспорта. В соответствии со статистическими данными в период с 1990 по 2021 г. уровень автомобилизации возрос в 5,5 раза [1].

Улично-дорожная сеть в городах России при проектировании и застройке не была адаптирована под массовую автомобилизацию. В результате чего расширение дорожных полос и увеличение количества парковочных мест имеют ограниченные возможности и не позволяют в полной мере устранить негативные последствия, возникающие в ходе роста числа автомобилей [2].

Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р, в крупных городах развивается интеллектуальная транспортная система, которая представляет собой комплекс средств и технологий, обеспечивающих безопасность и эффективность транспортных средств, а также высокое качество транспорт-

ного обслуживания пассажиров и повышения транспортной мобильности.

Для оптимизации, планирования и повышения эффективности маршрутной сети крупных городов разрабатывается подсистема данной системы, отвечающая за управление маршрутами общественного транспорта. Одним из основных ее параметров является информация о наполняемости транспортных средств за единицу времени. Информация о наполняемости пассажирского автотранспорта позволяет определять спрос на качество предоставляемой услуги и окупаемость пассажирских перевозок, вследствие чего необходимо определять баланс между данными показателями, так как при низких значениях наполняемости маршрут становится нерентабельным, а при высоких – качество транспортной услуги снижается, что может привести к оттоку пассажиропотока. Таким образом, существует необходимость в создании алгоритма, позволяющего корректировать количество и класс транспортных средств на основе данных о пассажиропотоке.

Материалы и методы исследования

Обследование пассажиропотоков позволяет определить характеристики спроса на перевозки, а также выявить потребности пассажиров в дополнительном транспорте, что, в свою очередь, дает возможность скорректировать маршрутную сеть, тем самым повышая эффективность работы пассажирского транспорта в го-

роде. Для определения эффективности инструментария мониторинга пассажиропотока авторами выполнен анализ применяемых в Российской Федерации и зарубежных странах систем.

Практический опыт зарубежных стран в применении систем автоматизированного подсчета пассажиров в автобусах посредством использования датчиков модулированного света и стереокамер указывает на их востребованность в связи с применением данных систем в планировании и оптимизации маршрутной сети, обосновании государственного финансирования и обеспечении финансового контроля [3–9].

Отечественный опыт применения систем мониторинга пассажиропотока свидетельствует о преобладании методов, в основе которых лежит обработка данных с камер видеонаблюдения или стереокамер. Транспортные предприятия, применяющие подобные системы, фиксируют заметный рост выручки [10–13].

В 2020 г. Российской телекоммуникационной компанией совместно с ОАО «РЖД» было проведено исследование в области изучения пассажиропотока между 81 парой городов по всей России посредством применения расчета пространственно-временных моделей на основе больших данных. Данный проект позволил оценить эффективность действующего расписания поездов и произвести его оптимизацию. Впоследствии геоаналитика легла в основу дальнейшего анализа и детального прогноза пассажирских перевозок [14].

Результаты исследования

В целях определения эффективности работы транспортных средств на маршрутах разработан алгоритм обработки данных пассажиропотока. Алгоритм корректировки количества и класса транспортных средств на основе данных о пассажиропотоке, полученных путем применения различного оборудования (стереокамер, инфракрасных датчиков и т. д.), предоставляет специалистам, ответственным за пассажирские перевозки, информацию об эффективности работы транспортных средств на маршруте и рекомендации по ее улучшению.

Основные задачи, решаемые алгоритмом обработки данных пассажиропотока, полученных с технического инструментария:

- определение максимального фактического наполнения за единицу времени;

- расчет требуемого количества подвижного состава на маршруте;

- анализ потребности изменения класса транспортных средств, работающих на маршруте;

- выявление неэффективно работающих рейсов.

Система анализа пассажиропотоков обрабатывает информацию следующим образом:

1. На облачный сервер в режиме реального времени поступают и хранятся там данные с пассажирского автотранспорта, такие как Q – количество перевезенных пассажиров за рейс по каждому транспортному средству (ТС); N – максимальное наполнение за рейс; V – вместимость; t – время прохождения остановочного пункта; n – количество ТС, работающих на обследуемом маршруте.

2. Общественный транспорт осуществляет перевозки с определенным интервалом, соответственно, необходимо учитывать рейс в прямом или в обратном направлении, а также количество выходов на маршрут.

Загрузка общественного транспорта определяется как

$$Z = \frac{N}{V} \cdot 100 \%. \quad (1)$$

Для определения общей загрузки подвижного состава (ПС) на маршруте за рейс применяется следующая формула:

$$Z_q = \frac{Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n}{n}, \quad (2)$$

где Z_n – максимальная загрузка ТС за рейс на определенном выходе на маршрут.

3. На основании того, что в паспорте ТС установлено значение вместимости, соответствующее распорядительной документации [15], общая загрузка ПС за прямой или обратный рейс не должна превышать 100 %, отсюда следует условие

$$Z_q \leq 100 \%. \quad (3)$$

При его невыполнении наполняемость общественного транспорта превышает соответствующие требования к качеству пассажирских перевозок. В связи с чем требуется внести изменения в параметры маршрута, а именно класс или количество ПС.

- 4–6. Если общая загрузка ПС менее 100 %, то алгоритм обрабатывает данные общего количества перевезенных пассажиров, вместимости и класса каждого ТС.

Вместимость определяется классом ТС, тем самым следует ввести параметр p , который осуществит перевод класса ТС в числовое значение. На основании распоряжения Минтранса России от 14.03.2008 № АМ-23-р «О введении в действие методических рекомендаций “Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте”» первой цифрой в автобусах обозначается класс, определяющийся по габаритной длине. Классификация приведена в табл. 1.

Тогда класс ТС может равняться первой цифре индекса из таблицы, т. е. $1 < p < 7$, где p является целым числом.

7. Рассчитывается рентабельное количество пассажиров за рейс:

$$Q_r = S / S_{i(a, \text{тролл, трам})}, \quad (4)$$

где S – затраты на реализацию транспортных услуг за рейс; $S_{i(a, \text{тролл, трам})}$ – себестоимость перевозки одного пассажира за рейс.

Такие параметры, как S и $S_{i(a, \text{тролл, трам})}$, рассчитываются в соответствии с распоряжением Минтранса России от 18.04.2013 № НА-37-р «О введении в действие Методических рекомендаций по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования».

8. Определяется рентабельность каждого рейса в одном направлении по формуле

$$Q_n \geq Q_{r_n}, \quad (5)$$

где Q_{r_n} – рентабельное количество пассажиров за рейс.

9. Если рейс нерентабельный, то система рекомендует изменить расписание.

10. Если рейс является рентабельным, то определяется общая сумма перевезенных пассажиров за рейс в одном направлении по маршруту.

11. Рассматривается выполнение следующего условия:

$$\frac{Q_q}{n} \geq Q_r, \quad (6)$$

где $\frac{Q_q}{n}$ – среднее значение количества перевезенных пассажиров за рейс по маршруту; Q_q – общее количество перевезенных пассажиров за рейс в одном направлении по маршруту.

В целях предотвращения некорректной работы (так как один выход на маршрут может являться эффективным, а другой нет, но работа ТС осуществляется на одном маршруте) система направляет обратно и повторяет процесс до тех пор, пока не произойдут изменения в нерентабельном выходе. Когда условие формулы (6) выполняется, производится проверка на возможность изменения класса ТС.

12. Если общая загрузка ПС более 100 %, то рассматривается количество выходов на маршрут.

13. При работе на маршруте одной единицы техники возможно принятие двух решений: изменение класса ТС или введение дополнительной единицы в зависимости от рентабельности маршрута и загрузки транспортного средства на всем рейсе.

14. В случае если на маршруте осуществляют пассажирские перевозки несколько единиц техники, анализируется совпадение классов ТС.

15, 16. Если класс совпадает, то количество требуемого ПС на маршруте определяется отношением общей фактической максимальной наполняемости к вместимости ТС, работающих на маршруте.

Общая фактическая максимальная наполняемость, чел.:

$$N_q = N_1 + N_2 + \dots + N_n. \quad (7)$$

Количество требуемого ПС, ед.:

$$n_{\text{треб}} = \frac{N_q}{V_{\text{ТС}}}. \quad (8)$$

Таблица 1

Классификация пассажирских транспортных средств

Класс ТС	Первые две цифры индекса	Длина, м	Пассажировместимость V , пасс.
Особо малый	22	До 5,5	До 20
Малый	32	6,0–7,5	20–43
Средний	42	8,5–10,0	43–60
Большой	52	11,0–12,0	60–100
Особо большой	62	Более 12,0	Более 100

При десятичной дроби, в целях улучшения качества транспортного обслуживания, целая часть числа $n_{\text{треб}}$ всегда округляется в большую сторону.

В случае несовпадения классов ТС или высокой рентабельности на маршруте, позволяющей улучшить качество транспортного обслуживания пассажиров, осуществляется проверка на возможность изменения класса ТС.

17–19. Алгоритм обрабатывает данные общего количества перевезенных пассажиров, вместимости и класса каждого ТС.

20. Рассчитывается рентабельное количество пассажиров за рейс, как в формуле (4), с учетом повышения класса ТС на один уровень выше.

21. Определяется возможность изменения класса ТС следующим условием:

$$Q_n \geq Q_{r_n+1}, \quad (9)$$

где Q_n – общее количество перевезенных пассажиров за рейс по каждому ТС; Q_{r_n+1} – рентабельное количество пассажиров за рейс с учетом измененного класса ТС.

22. Если условие (9) не выполняется, то изменение класса ТС не допускается.

23–27. Если условие (9) выполняется, то в целях улучшения транспортного обслуживания пассажиров алгоритм вновь проверяет выполнение условия с учетом повышения класса на два уровня, если класс не является максимально допустимым.

Алгоритм корректировки количества и класса транспортных средств на основе данных о пассажиропотоке представлен на рисунке.

В целях определения экономической эффективности применения разработанного инструментария в совокупности с имеющимся у перевозчиков оборудованием, для регулирования использования пассажирского транспорта проведен анализ выручки за весну 2022 и 2023 гг. по муниципальным маршрутам г. Новосибирска, на которых установлены тематические комплексы обследования пассажиропотока (табл. 2).

Экономический эффект от реализации определяется следующей формулой:

$$\mathcal{E}_{\Phi_1} = \frac{C_{2023} - C_{2022}}{C_{2022}} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где C_{2023} , C_{2022} – выручка по маршруту авто-транспортного предприятия за 2023 и 2022 гг. соответственно.

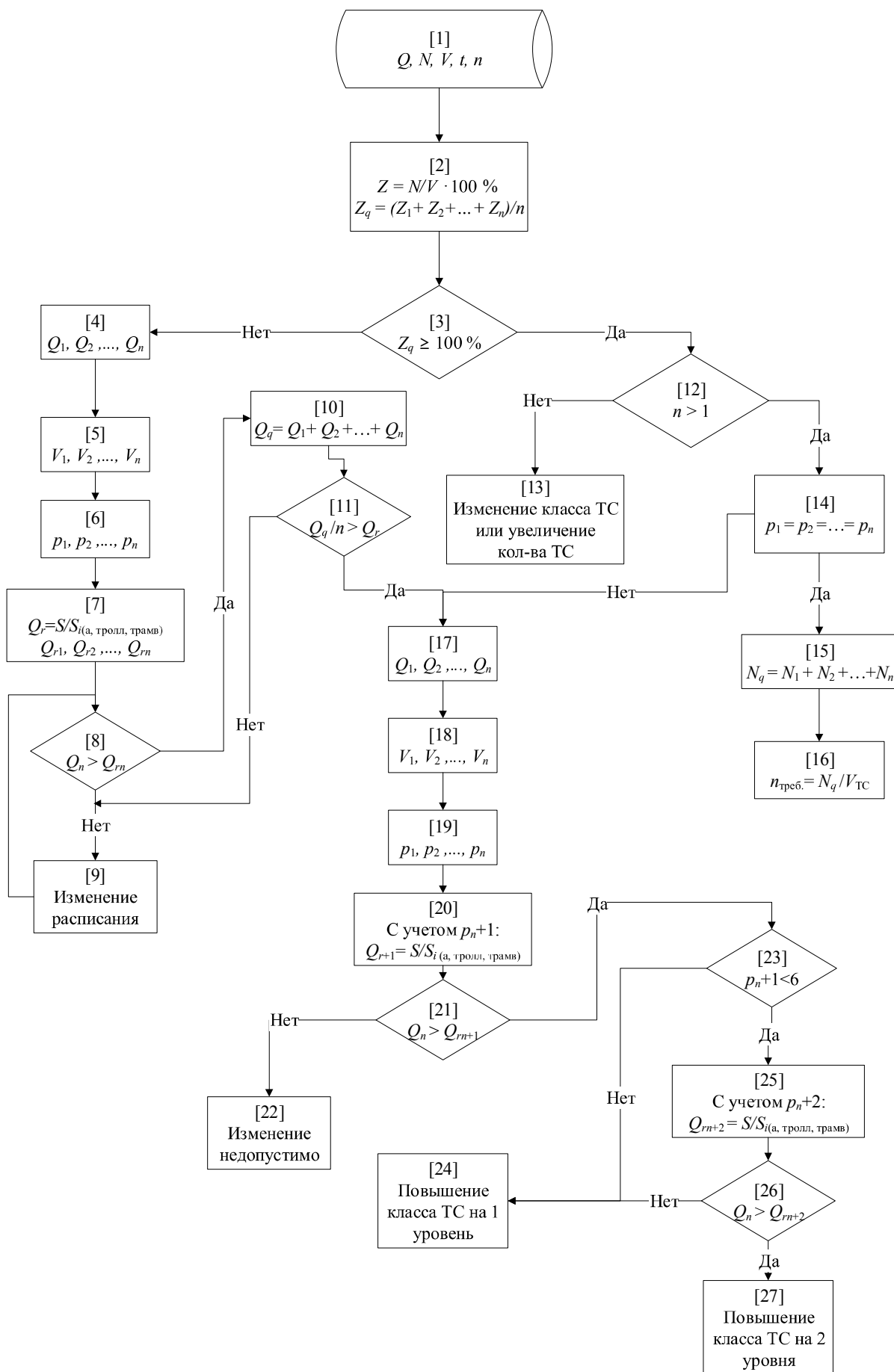
Статистика увеличения выручки за 2023 г. по сравнению с 2022 г. представлена в табл. 3.

Таким образом, применение алгоритма корректировки количества и класса транспортных средств на основе данных о пассажиропотоке позволяет повысить выручку авто-транспортного предприятия в среднем более чем на 34 % без учета индексации цен на транспортные услуги.

Таблица 2

Выручка по муниципальным маршрутам, р.

Номер маршрута	Март	Апрель	Май	Всего
<i>2022 г. (весна)</i>				
21	4 710 308	5 481 372	4 919 553	15 111 233
23	5 250 581	5 544 798	5 757 766	16 553 145
38	893 103	998 728	1 010 664	2 902 495
45	7 412 621	7 448 174	7 791 359	22 652 154
54	7 185 374	7 254 256	7 485 664	21 925 294
72	925 339	902 425	802 965	2 630 729
<i>Итого</i>	26 377 326	27 629 753	27 767 971	81 775 050
<i>2023 г. (весна)</i>				
21	7 496 761	7 260 018	7 183 452	21 940 231
23	8 334 598	8 304 769	8 525 150	25 164 517
38	1 377 947	1 397 261	1 478 410	4 253 618
45	9 147 748	9 069 444	10 106 553	28 323 745
54	8 502 837	8 480 224	8 882 809	25 865 870
72	1 493 323	1 417 017	1 348 536	4 258 876
<i>Итого</i>	36 353 214	35 928 733	37 524 910	109 806 857



Алгоритм корректировки количества и класса транспортных средств

Таблица 3

Сравнение выручки за весну 2023 г. с выручкой весны 2022 г., %

Номер маршрута	Март	Апрель	Май	Всего
21	59	32	46	45
23	59	50	48	52
38	54	40	46	47
45	23	22	30	25
54	18	17	19	18
72	61	57	68	62
<i>Итого</i>	38	30	35	34

В 2022 г. стоимость проезда и провоза багажа на общественном транспорте по г. Новосибирску составляла 26 р. В соответствии с Постановлением мэрии г. Новосибирска от 21.12.2022 г. № 4640 «Об установлении регулируемых тарифов на перевозки пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом по муниципальным маршрутам регулярных перевозок в границах города Новосибирска» стоимость проезда увеличилась на 4 р. и составила 30 р.

Индексация тарифа на проезд в общественном транспорте с 23 декабря 2022 г. равна: $I = \frac{30-26}{26} \cdot 100 \% = 15,4 \%$.

С учетом индексации цен на транспортные услуги экономическая эффективность методики регулирования использования пассажирского транспорта составит: $\mathcal{E}_{\Phi_2} = 34 - 15,4 = 18,6 \%$.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время задача повышения качества транспортного обслуживания крупных городов и агломераций становится ключевой при планировании их социально-экономического развития.

2. Развитие городского пассажирского транспорта с учетом современного уровня технологий тесно связано с расширением применения цифровых интеллектуальных транспортных систем. Однако функционал применяемого в настоящее время оборудования используется не в полной мере, для его полного освоения необходимо обеспечить обобщение данных, фиксируемых им, с внедрением в дальнейшем автоматизированных систем регулирования организации предоставления транспортных услуг населению.

3. Разработанный алгоритм корректировки количества и класса транспортных средств на основе данных о пассажиропотоке позволяет повысить выручку автотранспортного предприятия в среднем на 18,6 %.

Список источников

1. Федеральная служба государственной статистики. Раздел «Транспорт» : [сайт]. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 15.05.2023).
2. Императивы развития транспортных систем городов России : доклады к XXI Апрельской международной научной конференции по проблемам развития экономики и общества (Москва, 2020 г.) / М. Я. Блинкин, Т. В. Кулакова, П. В. Зюзин [и др.] ; под общей редакцией М. Я. Блинкина ; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Москва : Издательский дом Высшей школы экономики, 2020. 44 с.
3. Alekseev N., Lam W. H. K. Estimation of pedestrian flow based on Wi-Fi data and video cameras // Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2019. Vol. 13. P. 93–101.
4. A bus-scheduling method based on multi-sensor data fusion and payment authenticity verification / W. Gong, T. Zeng, H. Song [et al.] // Electronics. 2022. Vol. 11. P. 1522.
5. Grgurević I., Juršić K., Rajić V. Overview of Wi-Fi-based automatic passenger counting solutions in public urban transport // Sustainable Management of Manufacturing Systems in Industry 4.0 / eds. L. Knapcikova, D. Peraković, M. Perisa, M. Balog. Cham : Springer, 2022. P. 181–196.
6. Junio M. P., Medrano R. M., Almeida C. F. UAI-FI: using artificial intelligence for automatic passenger counting through Wi-Fi and GPS data // Transportes. 2022. Vol. 30, No. 2. P. 1–15.

7. The development of bus passenger monitoring system using IoT / N. S. Mohamad, Z. M. Amin, T. S. Zaini, M. K. Saari // *International TVET, Academic and Research Symposium E-proceeding*. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 65–72.
8. Time of Flight : высокоточные результаты с помощью известных во всем мире 3D-датчиков для автоматического подсчета пассажиров // *iris: intelligent sensing* : [сайт]. URL: <https://www.iris-sensing.com/ru/products/time-of-flight-technology/> (дата обращения: 20.05.2023).
9. FootfallCam : [сайт]. URL: <https://www.footfallcam.com/ru/Industries/Transportation> (дата обращения: 20.05.2023).
10. Петрова Д. В. Современные подходы к организации мониторинга пассажиропотоков общественного транспорта городских агломераций // *International Journal of Open Information Technologies*. 2020. No. 1. P. 47–57.
11. Фадеев А. И., Алхуссейни С. Методика определения корреспонденций пассажиров общественным транспортом из операций валидаций электронных проездных билетов // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2022. Т. 19, № 3 (85). С. 370–397.
12. Попова Е. А. Пространственно-временные модели маятниковых трудовых миграций в Московской агломерации // *Проблемы современной урбанизации: преемственность и новации : сборник статей Международной конференции (Москва, 22–23 марта 2022 г.)*. Москва : Географический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, 2022. С. 126–133.
13. Патент № 2785198 С1 Российская Федерация, МПК G07C 9/00, G06V 20/59, B60R 1/29. Счетчик подсчета пассажиров на базе стереозрения : № 2022113252 : заявлен 18.05.2022 : опубликован 05.12.2022 / Журавлев А. И., Усачева В. В., Филоненко М. А., Гаврилов М. Г., Станкевич Д. Б. ; заявитель акционерное общество «Штрих-М».
14. «РЖД» и «Tele2» проанализировали транспортные потоки между 81 российским городом // *ОАО «РЖД»* : [сайт]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=254727>. Дата публикации: 02.09.2020.
15. Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом : распоряжение Минтранса РФ от 31 января 2017 г. № НА-19-р. URL: file:///D:/Downloads/rasp_mt_na_19_31012017.pdf (дата обращения: 20.05.2023).

References

1. Federal State Statistics Service. *Section Transportation*: [site]. (In Russ.). URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport>.
2. Blinkin M. Ya., Kulakova T. V., Zyuzin P. V. [et al.]; Blinkina M. Ya., editorship. Imperatives for the development of transport systems of Russian cities: reports to XXI April International Scientific Conference on the problems of development of the economy and society (Moscow, 2020). National Research University Higher School of Economics. Moscow: Publishing House of the Higher School of Economics; 2020. 44 p. (In Russ.).
3. Alekseev N., Lam W. H. K. Estimation of pedestrian flow based on Wi-Fi data and video cameras. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2019;13:93–101.
4. Gong W., Zeng T., Song H., Su J. [et al.]. A bus-scheduling method based on multi-sensor data fusion and payment authenticity verification. *Electronics*. 2022;11:1522.
5. Grgurević I., Juršić K., Rajić V. Overview of Wi-Fi-based automatic passenger counting solutions in public urban transport. *Sustainable Management of Manufacturing Systems in Industry 4.0*. L. Knapičková, D. Peraković, M. Perisa, M. Balog, eds. Cham: Springer; 2022. P. 181–196.
6. Junio M. P., Medrano R. M., Almeida C. F. UAI-FI: using artificial intelligence for automatic passenger counting through Wi-Fi and GPS data. *Transportes*. 2022;30(2):1–15.
7. Mohamad N. S., Amin Z. M., Zaini T. S., Saari M. K. The development of bus passenger monitoring system using IoT. *International TVET, Academic and Research Symposium E-proceeding*. 2022;2(2):65–72.
8. Time of Flight: highly accurate results with world-renowned 3D sensors for automatic passenger counting. *iris: intelligent sensing*: [site]. (In Russ.). URL: <https://www.iris-sensing.com/ru/products/time-of-flight-technology>.
9. FootfallCam: [site]. URL: <https://www.footfallcam.com/en/Industries/Transportation>.
10. Petrova D. V. Modern approaches to organizing monitoring of public transport passenger flows in urban agglomerations. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020;(1):47–57. (In Russ.).
11. Fadeev A. I., Alhusseini S. Methods for determining the correspondence of passengers by public transport from the operations of validating electronic travel tickets. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(85):370–397. (In Russ.).

12. Popova E. A. Spatio-temporal models of pendulum labor migrations in the Moscow agglomeration. *Problems of modern urbanization: Continuity and Innovations. Collection of articles of the International Conference (Moscow, March 22–23, 2022)*. Moscow: Faculty of Geography of the Moscow State University M. V. Lomonosov; 2022. P. 126–133. (In Russ.).

13. Zhuravlev A. I., Usacheva V. V., Filonenko M. A., Gavrilov M. G., Stankevich D. B. Patent No. 2785198 C1 Russian Federation, IPC G07C 9/00, G06V 20/59, B60R 1/29. Passenger counter based on stereo vision: No. 2022113252. Applied 05.18.2022. Published 05.12.2022. Applicant Joint Stock Company Shtrikh-M. (In Russ.).

14. Russian Railways and the Russian Telecommunication Company analyzed the traffic flows between 81 Russian cities. *Russian Railways: [site]*. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=254727>.

15. On Approval of the Social Standard of Transport Service of the Population in the Carriage of Passengers and Baggage by Automobile and Urban Land Electric Transport: Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. NA-19-r dated January 31, 2017. (In Russ.). URL: file:///D:/Downloads/rasp_mt_na_19r_31012017.pdf.

Информация об авторах

А. Л. Манаков – профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщений, доктор технических наук.

С. А. Коларж – доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщений, кандидат технических наук.

Е. М. Саломатов – аспирант, ассистент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщений.

Information about the authors

A. L. Manakov – Professor of the Technology of Transport Engineering and Operation of Machines Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

S. A. Kolarzh – Associate Professor of the Technology of Transport Engineering and Operation of Machines Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

E. M. Salomatov – Post-graduate Student, Assistant of the Technology of Transport Engineering and Operation of Machines Department, Siberian Transport University,

Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 22.09.2023; принята к публикации 15.12.2023.

The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 22.09.2023; accepted for publication 15.12.2023.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.21+06
doi 10.52170/1815-9265_2024_68_22

Развитие методики цифрового аксиоматного моделирования объекта транспортной инфраструктуры

Олег Николаевич Числов^{1✉}, Никита Максимович Луганченко², Владимир Васильевич Хан³,
Наталья Мусаевна Магомедова⁴

^{1,2,3,4} Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

¹ o_chislov@mail.ru✉

² luganchenko.n@yandex.ru

³ 1010900@mail.ru

⁴ natalya_mm77@mail.ru

Аннотация. В статье проведен обзор отечественных методов цифровизации и интеллектуализации транспортно-технологических процессов. Введено авторское определение терминов «аксиомата» и «аксиоматная модель», формализованы понятия базовой и модернизированной аксиоматной модели транспортного процесса и объекта. Исследованы аспекты развития метода аксиоматного моделирования в части цифрового анализа и повышения эффективности работы железнодорожных инфраструктурных объектов, а также последующей оптимизации их работы на принципах теории нечетких множеств, рекуррентных нейронных сетей, теории активных систем, используемых для расширения математического аппарата аксиоматного моделирования. Построена аксиоматная модель действующего транспортного объекта, исследованы схемы взаимодействия массивов данных объектов транспортной инфраструктуры, приведены логические группы транспортных процессов базовой модели и рекуррентных нейронных сетей графологического формирования вариантов аксиомат транспортно-технологических процессов для условий управления, представлен алгоритм развертки рекуррентных нейронных сетей при формировании вариантов аксиомат транспортно-технологических процессов в виде последовательностей шагов перевода модели из базовой в модернизированную. Выделены уровни сложности модернизированной аксиоматной модели транспортного объекта. Определен подход к выбору вариантов цифровых управленческих решений в транспортном производстве на основе учета транспортных конфликтов. Представлена классификация транспортных конфликтов по вариантам пересечения транспортных потоков в системе. Рассмотрено влияние разнородных транспортных конфликтов на работу аксиоматной модели объекта, и смоделированы транспортные конфликты взаимодействия аксиомат транспортно-технологических процессов. Представлена программная реализация авторского проекта на языке программирования Python в аспектах взаимодействия железнодорожного и водного транспорта, предназначенная для расчета параметров транспортных процессов. Выделены модули модельной схемы инфраструктурных объектов, сформирована базовая модель транспортно-технологических процессов железнодорожной станции. На основе итераций работы программного комплекса сделаны выводы о путях сокращения простоя местного вагона.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, аксиоматика, цифровизация, рекуррентные нейронные сети, теория нечетких множеств, теория активных систем, аксиоматное моделирование, транспортный конфликт

Для цитирования: Развитие методики цифрового аксиоматного моделирования объекта транспортной инфраструктуры / О. Н. Числов, Н. М. Луганченко, В. В. Хан, Н. М. Магомедова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 22–32. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_22.

TRANSPORT

Original article

Principles of axiomatic technical and technological modeling of a transport object

Oleg N. Chislov^{1✉}, Nikita M. Luganchenko², Vladimir V. Khan³, Natalya M. Magomedova⁴

^{1,2,3,4} Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

¹ o_chislov@mail.ru✉

² luganchenko.n@yandex.ru

³ 1010900@mail.ru

⁴ natalya_mm77@mail.ru

Abstract. The article provides a review of domestic methods of digitalization and intellectualization of transport and technological processes. The author's concept of the terms "axiomatic" and "axiomatic model" is introduced, the concepts of the basic and modernized axiomatic model of the transport process and object are formalized. Aspects of the development of the axiomatic modeling method in terms of digital analysis and increasing the efficiency of railway infrastructure facilities, as well as subsequent optimization of their work on the principles of the theory of fuzzy sets, recurrent neural networks, the theory of active systems used to expand the mathematical apparatus of axiomatic modeling. An axiomatic model of an operating transport facility has been constructed, interaction patterns of data arrays of transport infrastructure objects have been studied, logical groups of transport processes of the base model and recurrent neural networks for the graphological formation of axiomatic options of transport technological processes for control conditions are given, a development algorithm is presented recurrent neural networks in the formation of variants of the axiomatic of transport and technological processes in the form of sequences of steps of transferring the model from the basic to the modernized one. The levels of complexity of the modernized axiomatic model of the transport facility are highlighted. An approach has been chosen to select options for digital management solutions in transport production based on taking into account transport conflicts. A classification of transport conflicts according to options for crossing traffic flows in the system is presented. The influence of heterogeneous transport conflicts on the operation of the axiomatic model of the object is considered and transport conflicts of interaction between the axiomatic of transport and technological processes are modeled. A software implementation of the author's project in the Python programming language is presented in the aspects of interaction between railway and water transport, intended for calculating the parameters of transport processes. Modules of the model diagram of infrastructure facilities have been identified, and a basic model of transport and technological processes of a railway station has been formed. Based on iterations of the software package, conclusions were drawn about ways to reduce the downtime of a local car.

Keywords: transport infrastructure, axiomatics, digitalization, recurrent neural networks, fuzzy set theory, active systems theory, axiomatic modeling, transport conflict

For citation: Chislov O. N., Luganchenko N. M., Khan V. V., Magomedova N. M. Principles of axiomatic technical and technological modeling of a transport object. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):22–32. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_22.

Введение

Перед транспортной отраслью нашей страны как никогда остро стоит вопрос эффективного использования существующей транспортной инфраструктуры и оценки качества работы новых инфраструктурных объектов еще на стадиях проектирования. Достижение максимальных показателей эффективности использования транспортной инфраструктуры в условиях обострения экономическо-политических отношений, санкционных воздействий, а также остаточного влияния ограничений периода пандемии коронавирусной инфекции является одной из ключевых задач, поставленных перед учеными-транспортниками [1].

Внедрение принципов комплексной цифровизации транспортной инфраструктуры в условиях взаимодействия участников перевозочного процесса – это непреложное и наиболее перспективное направление развития транспортной отрасли, являющееся эффективным и действенным методом анализа с последующей оптимизацией технологии работы транспортных объектов [2].

Принципы решения данных задач объединены между собой углубленным использованием технологий искусственного интеллекта, теории нечетких множеств, теории активных систем, нейронных сетей, морфологического

анализа, техноценоза и др. Их применение позволяет производить мониторинг транспортного процесса, параллельно осуществляя решение дополнительных задач по оценке переменных параметров транспортного потока в условиях динамично меняющейся ситуации, а также выполнять прогнозирование, построенное на постоянном пополнении цифровых банков данных [3, 4].

Материалы и методы исследования

Методикам исследований, основанных на отечественном научном опыте ученых-транспортников по применению методов цифровизации и интеллектуализации транспортных процессов, посвящены работы В. И. и М. В. Колесниковых, В. Д. Верескуна, Э. А. Мамаева, Е. Н. Розенберга, П. В. Куренкова, О. Д. Покровской, Э. К. Лецкого, Д. В. Ефанова и др. [5–13].

Так, например, в работе [5] рассматривается вопрос развития транспортной отрасли в условиях «логистического шторма» и переориентации логистических цепей, складывающейся в активно изменяющейся обстановке транспортного рынка. Автор утверждает, что подобная ситуация на отечественном транспортном рынке может стать катализатором создания новых альтернативных маршрутов и принципов применения интеллектуальных систем, выполняющих роль ассистентов при принятии управленческих

решений. В работе [6] была произведена оценка текущего состояния цифровой трансформации ОАО «РЖД» на основе анализа сильных и слабых сторон, а также возможностей и угроз применительно к компании.

Современный этап цифровой трансформации отечественных железных дорог, разработка и внедрение эффективных методов организации управления перевозочным процессом требуют создания новых и оптимизации существующих методов моделирования транспортных систем.

В настоящей работе представлено развитие авторской методики аксиоматики транспортно-технологических процессов [14] в части исследования, анализа и последующей оптимизации технологии работы инфраструктурных объектов с применением принципов моделирования базовой (АМТП-Б) и модернизированной (АМТП-М) аксиоматной модели транспортно-технологических процессов (рис. 1).

Аксиоматное моделирование имеет связь с классическим многоуровневым программированием, с применением принципов рекуррентных нейронных сетей (РНС), теории активных систем (ТАС), а также теории нечетких множеств (ТНМ). Аксиоматная модель может формализовать любой процесс, связанный с функционированием объектов транспортной

инфраструктуры, а также составляющие части ее технологии работы (рис. 2).

Аксиомата – алгоритм, представляющий собой набор определенных действий, которые связаны между собой по устойчивой логике последовательности выполнения, и обеспечивающий в результате решение определенной транспортной задачи. Совокупность аксиомат, выполняющих массив транспортных задач, поставленных перед объектом управления, представляет собой аксиоматную модель транспортно-технологических процессов. Модель, не прошедшая обработку средствами ТНМ, РНС, ТАС (см. рис. 2), называется базовой.

В рамках данной научной работы построим базовую аксиоматную модель взаимодействия водного и железнодорожного транспорта, рассмотрев технологическое взаимодействие на примере Новороссийского транспортного узла.

В данной АМТП со стороны железнодорожного транспорта транспортно-технологические процессы осуществляет железнодорожная станция Новороссийск, обслуживающая причалы Новороссийского морского порта. В рамках моделирования взаимодействия водного и железнодорожного видов транспорта и его инфраструктуры выделим обособленные логические группы АМТП ст. Новороссийск

<p style="text-align: center;">Преимущества (S)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Применение новых принципов построения систем поддержки принятия решений на основе нечеткой логики - Повышение уровня эффективности эксплуатации транспортно-технологических систем за счет многовариантности решений - Комплексное повышение степени цифровой трансформации транспортной отрасли 	<p style="text-align: center;">Недостатки (W)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Необходимость повышения уровня цифровой компетенции работников транспорта - Недостаточно полная технологическая и нормативная база транспортных объектов
<p style="text-align: center;">Возможности (O)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Развитие систем автоматизации планирования перевозочного процесса на нейронечетких принципах - Создание универсальной системы интеллектуальной поддержки принятия решений - Конкурентные преимущества по сравнению с другим программным обеспечением 	<p style="text-align: center;">Угрозы (T)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Необходимость учитывать непредвиденные и форс-мажорные ситуации в транспортно-логистической цепи - Меняющаяся конъюнктура транспортного рынка

Рис. 1. SWOT-анализ аксиоматного моделирования АМТП-М

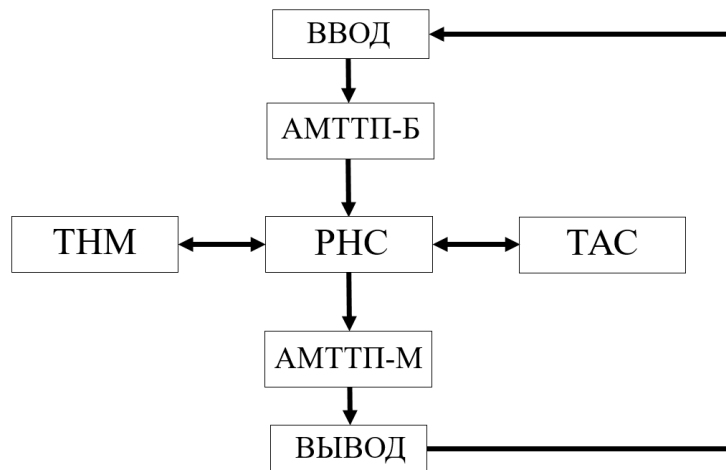


Рис. 2. Схема обработки массивов данных транспортного объекта в системе АМТПП

(порт), предназначенные для осуществления операций перегрузки металлолома через склад порта (рис. 3).

Базовая аксиоматная модель АМТПП-Б разбита на четыре составляющие логические группы: 1) АСТТП – аксиоматы станционных транспортно-технологических передвижений (железнодорожный транспорт); 2) АТПВТ – аксиоматы технологических процессов водного транспорта (водный транспорт); 3) АТСП – аксиоматы транспортно-складских процессов, обеспечивающие связь между двумя логическими группами аксиомат; 4) АПРМ – аксиоматы процессов погрузочно-разгрузочных ма-

шин, задействованных в грузовой работе складов (таблица).

Согласно рис. 2 для осуществления перехода из АМТПП-Б в АМТПП-М необходимо применить методы обработки данных, основанные на принципах рекуррентных нейронных сетей, теории активных систем и теории нечетких множеств. В результате применения одного из вышеперечисленных методов обработки информации транспортного объекта базовая аксиоматная модель становится модернизированной 1-го уровня сложности. При комбинированном применении данных принципов можно получить АМТПП-М 2-го или

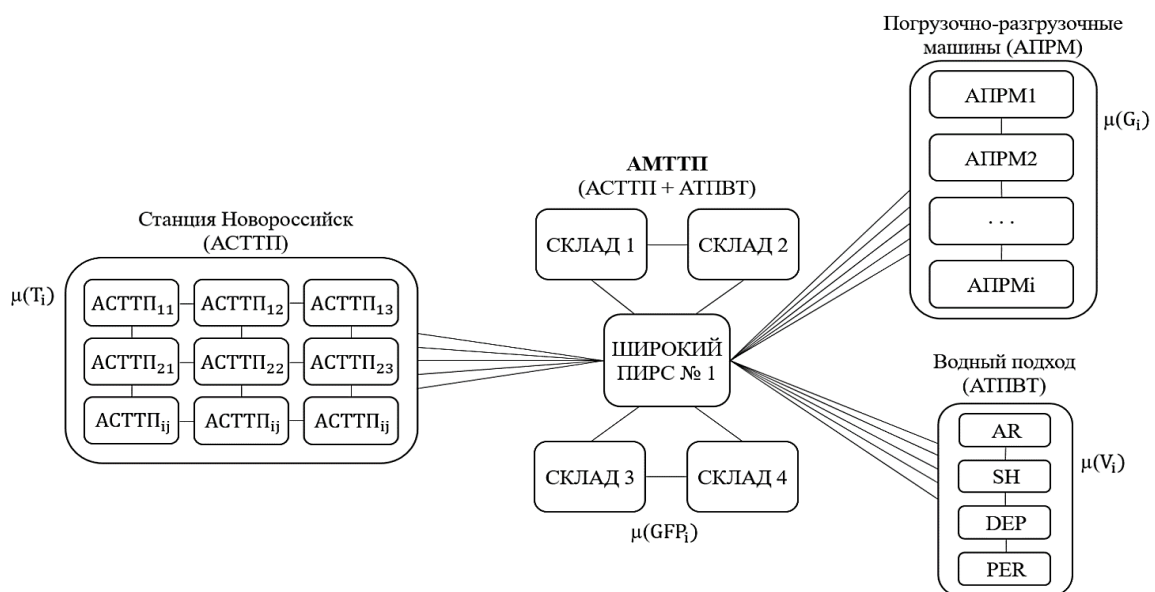


Рис. 3. Логические группы базовой АМТПП:
 $\mu(T_i)$, $\mu(GP_i)$, $\mu(G_i)$, $\mu(V_i)$ – нечеткие множества параметров аксиом модели транспортно-технологических процессов

Логические группы аксиоматной модели

Логическая группа аксиомат	Модельная схема
АСТТП	$\{GL1 \leftrightarrow PG1 \leftrightarrow \theta(SU) \leftrightarrow PS \leftrightarrow GFP1\}$
ТСПВП + АПРМ	$\{\theta(PRM_i) \leftrightarrow DWL \cdot Q_i \leftrightarrow WRH \leftrightarrow \theta(PRM_i)\}$
АТПВТ	$\{PER \leftrightarrow SH \leftrightarrow DEP\}$
АСТТП + ТСПВП + АТПВТ	$\{GL1 \leftrightarrow PG1 \leftrightarrow \theta(SU) \leftrightarrow PS \leftrightarrow GFP1 \leftrightarrow \{\theta(PRM_i) \leftrightarrow DWL \cdot Q_i \leftrightarrow WRH \leftrightarrow \theta(PRM_i) \leftrightarrow PER \leftrightarrow SH \leftrightarrow DEP\}\}$

Примечания. 1. θ – вероятностная вариативность выполнения модуля аксиоматы.

2. Обозначения модулей аксиоматной модели: GL – подход главных путей; PG – грузовой приемо-отправочный парк станции; SU – сортировочное устройство станции; PS – сортировочный приемо-отправочный парк станции; GFP – грузовой фронт порта; PRM – погрузочно-разгрузочные машины; DWL – погрузка/выгрузка погрузочно-разгрузочной машины; Q – перемещаемый груз; WRH – складской инфраструктурный объект; PER – перемещение водного транспорта; SH – водный транспорт; DEP – отправление водного транспорта.

3-го уровня сложности. В рамках данной научной работы с помощью разработанного и сертифицированного программного модуля Axiomatic v. 1 [15] применим принципы формирования РНС, переводя АМТТП-Б в АМТТП-М 1-го уровня сложности (рис. 4).

Алгоритм развертки РНС при формировании АМТТП на примере грузовой станции может быть представлен в виде последовательности шагов:

Шаг 1 (W1) – входные параметры $R(1) = \{\text{схема грузовой станции, ТРА, технологический процесс, показатели работы, пропускная способность, перерабатывающая способность, время занятия и т. п.}\}$, результат = {транспортно-технологическая схема станции, модельная схема станции МСС, (0,1)-матрица связей инфраструктурных объектов-блоков, графологическая модель транспортного процесса $G(X, U|S)$ }, выходные параметры $H(1) = \{\text{блоки МСС по вариантам транспортных процессов } G(X, U|S)\}$.

Шаг 2 (W2) – входные параметры $R(2) = \{\text{инструкция по организации маневровой работы, технологические времена, пропускная способность, очередность обслуживания и т. п.}\}$, результат = {формирование транспортных маршрутов по данным начала и конца из i -блоков МСС для графа $G(X, U|S)$ }, выходные параметры $H(2) = \{\text{продолжительность транспортных процессов по } G(X, U|S)\}$.

Шаг 3 (W3) – входные параметры $R(3) = \{\text{параметры } i\text{-блоков МСС, маневровый маршрут по (0,1)-матрице связей технологических операций и парковых элементов станции, вероятностная матрица связи станционных}$

процессов и модулей путевого развития}, результат = {формирование аксиоматы АМТТП по процедуре $U\{i\text{-блок МСС} | u \in \{AMTTPi\}\}$, выходные параметры $H(3) = \{\text{продолжительность АМТТП1, АМТТП2, ..., АМТТПi}\}$.

Шаг 4 (W4) – входные параметры $R(4) = \{\text{последовательности } i\text{-блоков МСС по варианту транспортной работы, времена занятия}\}$, результат = {варианты использования блоков АМТТП i по условиям $sgn\{i\text{-блок}\} \wedge m\{i\text{-блок}|S\}$, массив значений времен АМТТП i для U4-условий организации транспортной работы}, выходные параметры $H(4) = \{\text{набор всех возможных аксиомат АМТТП1, АМТТП2, ..., АМТТПi для U4-условий организации транспортной работы}\}$.

Шаг 5 (W5) – входные параметры $R(5) = \{\text{вероятности использования } i\text{-блоков, времена занятия}\}$, результат = {анализ графологических связей $G(X, U|S)$ по U5-условиям использования}, выходные параметры $H(5) = \{\text{графологические последовательности АМТТП, массив времен}\}$.

Шаг 6 (W6) – входные параметры $R(6) = \{\text{последовательности } i\text{-блоков МСС по варианту транспортной работы, времена занятия}\}$, результат = {формирование и оценка массива времен $t(Gn)$ (где t – временной параметр модели; n – порядковый номер массива) по АМТТП i для условия использования}, выходные параметры $H(6) = \{\text{степень нечеткости использования для U6-условий организации транспортной работы}\}$.

Шаг 7 (W7) – входные параметры $R(7) = \{\text{нечеткие последовательности АМТТП, времена АМТТП}\}$, результат = {фор-

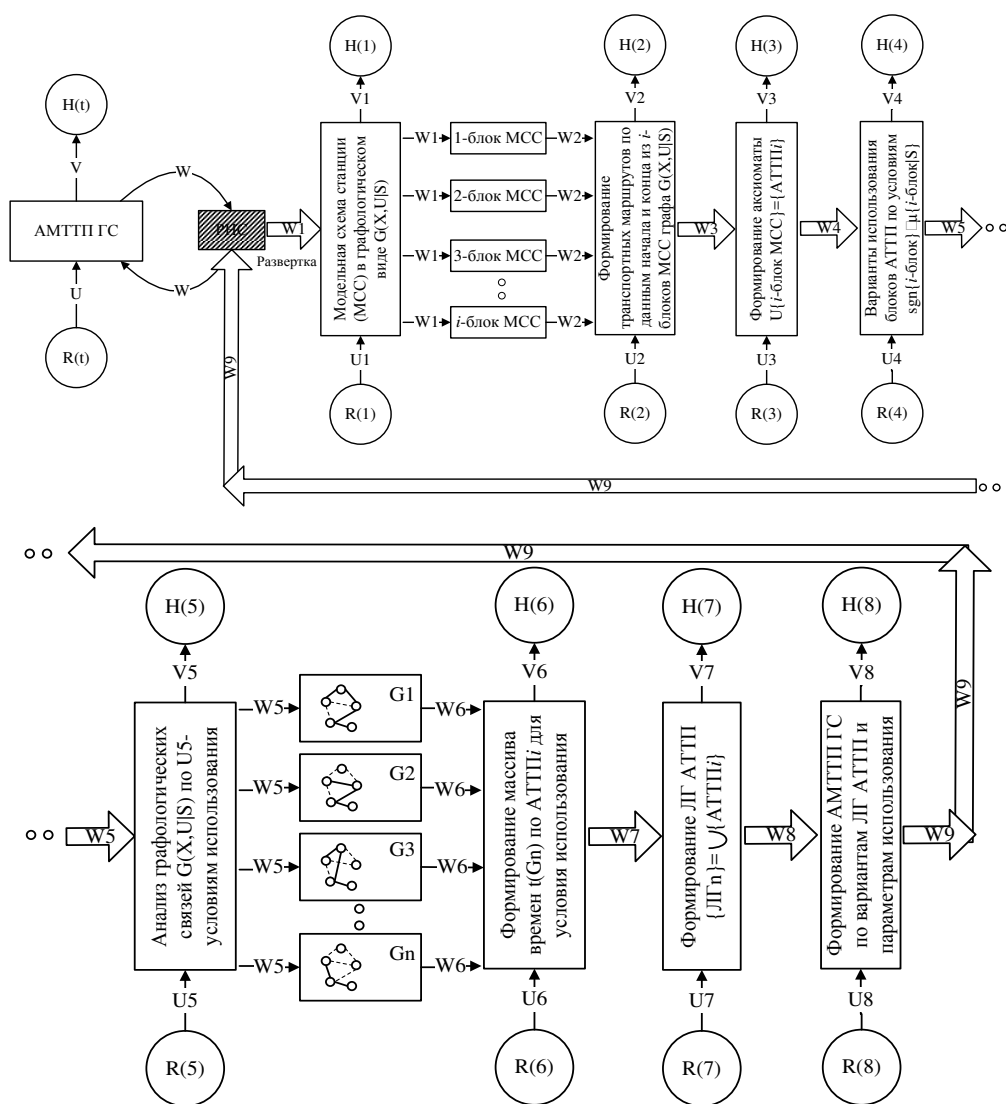


Рис. 4. РНС графологического формирования АМТПП:

$G(X, U|S)$ – графологическая модель транспортного процесса; X – блок модели; $U|S$ – связи блоков модели по S -условиям организации транспортного процесса

мирование ЛГ АМТПП $\{ЛГn\} = \cup \{АМТПPi\}$, выходные параметры $H(7) = \{\text{массив времен ЛГ АМТПП для } U7\text{-условий организации транспортной работы}\}$.

Шаг 8 (W8) – входные параметры $R(8) = \{\text{ЛГ АМТПП, взаимное использование с учетом ТК, времена занятия}\}$, результат = $\{\text{формирование АМТПП ГС по вариантам ЛГ АМТПП и параметрам использования}\}$, выходные параметры $H(8) = \{\text{параметры АМТПП ГС, показатели работы станции для } U8\text{-условий организации транспортной работы}\}$.

Шаг 9 (W9) – входные параметры $R(9) = \{\text{АМТПП ГС}\}$, результат = $\{\text{вариант использования блоков АМТПП ГС, наполнение}$

банка данных временных параметров\}, выходные параметры $H(9) = \{\text{возврат данных, анализ новых условий эксплуатации, обучение РНС посредством отбора рациональных структур АМТПП, ЛГ АМТПП и времен ТТП}\}$.

Также в данной научной работе представлен подход к выбору вариантов аксиоматики транспортно-технологических процессов цифровых управленческих решений в транспортном производстве при моделировании наиболее проблемных случаев – транспортных конфликтов.

Определены транспортные конфликты (ТК) первого рода – состояния, при которых множеству транспортных средств (поездов, подач вагонов) в один и тот же момент времени требуется одна и та же аксиомата транс-

поротно-технологических процессов (АТПП). ТК второго рода – состояние, при котором множество транспортных средств (поездов, подач вагонов) использует множество АТПП, имеющих однотипные участки по маршруту движения и точки (ответственные стрелочные переводы) взаимного одноуровневого пересечения. ТК третьего рода – состояние, представляющее собой смешанный конфликт первого и второго рода. Сформирована модельная схема АМТПП станции (рис. 5).

Рассмотрим моделирование ТК на примере взаимодействия АТПП1 и АТПП2. Данные АТПП выделены на рис. 5 жирными и штриховыми линиями. В результате формируется транспортная ситуация, порождающая одноуровневое пересечение равноправных маршрутов – ТК первого и второго рода ($\overline{\text{кр.}}$), которое можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \{\text{АТПП1}\} &= \{\text{GL}\} \cup \{s5 \subset \overline{\text{кр.}}\} \cup \\ \{\mu_A(\text{FS})_1\} \cap \{\text{АТПП2}\} &= \{\text{GL}\} \cup \{s1\} \cup \{\text{PG}\} \cup \\ \{s2 \subset \overline{\text{кр.}} 1 \subset \overline{\text{кр.}} 5 \subset \overline{\text{кр.}} 4\} \cup \{\mu_A(\text{SU})\} \cup \\ \{s3 \subset \overline{\text{кр.}} 3\} \cup \{\mu_A(\text{PSO})\} \cup \\ \{s4 \subset \overline{\text{кр.}} 2\} \cup \{\mu_A(\text{FS})_1\}. \end{aligned}$$

При этом возможны варианты:

- 1) $\{\text{АТПП1}\} \cap \{\text{АТПП2}\} = \emptyset$, когда по схеме возможно сочетание маршрутов, а согласно технологии управления таких пересечений нет;
- 2) $\{\text{АТПП1}\} \cap \{\text{АТПП2}\} = \text{Пр}_{12}\{\text{АТПП}_1, \text{АТПП}_2, R(t_{12})\}$, когда технология управления предусматривает одноуровневое пересечение, где $R(t_{12})$ – временные параметры АТПП.

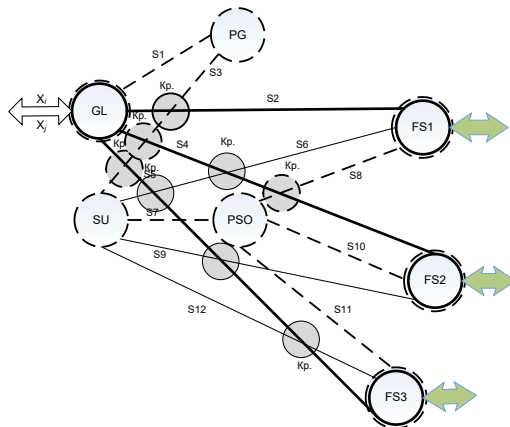


Рис. 5. Схема АМТПП грузовой припортовой станции:

GL – подход главных путей; PG – грузовой приемо-отправочный парк станции; SU – сортировочное устройство станции; PSO – сортировочно-отправочный парк станции; FS – нефтеналивной резервуар станции

Примечание. Устройства $\mu_A(\text{SU})$, $\mu_A(\text{PSO})$, $\mu_A(\text{FS})_k$ характеризуются нечеткими условиями эксплуатации и управления транспортной работой.

Допустимость загрузки $\overline{\text{кр.}}$ соответствует условию $T_{\text{загр}} < 1440$ мин. При неравномерном движении в качестве расчетного периода T_p принимается период наиболее интенсивной работы и проверяется условие $T_{\text{загр}} < T_p$. Вероятности данных событий примут вид: $P(\text{АТПП1}) = \frac{n_1 t_1}{T_p}$, $P(\text{АТПП2}) = \frac{n_2 t_2}{T_p}$. Продолжительность совпадений маршрутов равна $T_{\text{АТПП1-АТПП2}}^{\text{сов}} = \frac{n_1 t_1 n_2 t_2}{T_p} = \frac{10 \cdot 5 \cdot 40 \cdot 5}{1440} \approx 7$ мин.

На основе комбинаторных методов и теории вероятностей рассмотрено моделирование исходов независимых событий АТПП1 и АТПП2. При начальной постановке $P(\text{АТПП1}) = 0,1$; $P(\text{АТПП2}) = 0,4$.

Вероятностная модель условий событий для расчета загрузки пересечения:

$A_0 = \{\text{обе аксиоматы произойдут}\},$

$A_1 = \left\{ \begin{array}{l} \text{хотя бы одна аксиомата} \\ \text{не произойдет} \end{array} \right\},$

$A_2 = \left\{ \begin{array}{l} \text{только одна аксиомата} \\ \text{произойдет} \end{array} \right\}.$

Независимые события примут вид:

$C = \{\text{АТПП1 произойдет}\},$

$D = \{\text{АТПП2 произойдет}\}.$

Так как $A_0 = CD$, то $P(A_0) = P(\text{АТПП1}) \times P(\text{АТПП2}) = 0,1 \cdot 0,4 = 0,04$. Для $A_2 = C\bar{D} + \bar{C}D$, тогда $P(A_2) = P(C\bar{D}) + P(\bar{C}D)$ из условия, что события несовместны. $P(A_2) = P(C)P(\bar{D}) + P(\bar{C})P(D) = 0,1(1 - 0,4) + (1 - 0,1)0,4 = 0,42$. Событие $A_1 = \bar{A}_0$ и $P(A_1) = 1 - P(A_0) = 0,96$.

Варианты АТПП:

$\{\text{АТПП1}\} = \{\text{GL} \overline{\text{кр.}} \mu_A(\text{FS})_k\},$

$\{\text{АТПП2}\} = \{\text{GL} \leftrightarrow \text{PG} \overline{\text{кр.}} \mu_A(\text{SU}) \leftrightarrow \mu_A(\text{PSO}) \overline{\text{кр.}} \mu_A(\text{FS})_k\},$

$\{\text{АТПП3}\} = \{\text{GL} \leftrightarrow \text{PG} \overline{\text{кр.}} \mu_A(\text{SU}) \overline{\text{кр.}} \mu_A(\text{FS})_k\},$

$\{\text{АТПП4}\} = \{\mu_A(\text{FS})_k \overline{\text{кр.}} \mu_A(\text{PSO}) \leftrightarrow \mu_A(\text{SU}) \overline{\text{кр.}} \mu_A(\text{FS})_k\}.$

Для крупных станций задача усложняется, так как АМТПП становится значительно больше и повышается степень конфликтности в вариантах управления.

Результаты исследования

Программная реализация АМТПП-Б взаимодействия железнодорожного и водного транспорта выполнена с помощью программного языка Python (рис. 6). Модельная схема станции имеет свои уникальные модули (объекты инфраструктуры), определяющие специфику работы и ее временные параметры. Символ « θ », который может использоваться в модельной схеме, обозначает вероятностную вариативность выполнения модуля аксиоматы. В стандартном виде постановки задачи начальная вероятность выполнения модуля аксиоматы задается пользователем программного модуля или принимается стандартный начальный вариант отсчета. Временной параметр модулей аксиоматы определяется согласно техпроцессу работы станции.

Для повышения качества аксиоматной модели способы определения моментов появления аксиомат и длительности их выполнения можно рассматривать в качестве случайных величин, которые устанавливаются перед этапом моделирования различными методами (например, статистическим анализом работы реального транспортного объекта, методом экспертной оценки и др.).

Таким образом, была сформирована базовая аксиоматная модель транспортно-технологических процессов ст. Новороссийск.

Авторский программный продукт – Axiomatic v. 1 (рис. 7) предназначен для расчета параметров транспортных процессов в рамках аксиоматного моделирования, а также для логической спецификации транспортных процессов и структур с целью быстрого получения логической модели объекта, демонстрирующей все логически связанные элементы и взаимодействия [15]. Данная программа выполняет расчет временных параметров исследуемого объекта транспортной инфраструктуры с применением логических отношений между ними, правил (аксиом), индуктивно определяющих эти объекты и задающих ограничения на их структуру или поведение.

Продолжительность занятия элемента одноуровневого пересечения транспортной системы из условия моделирования транспортных событий при 100 экспериментах взаимодействия АТПП1 и АТПП2 составила для модели без ТК: АТПП1 – 4,22 ч, АТПП2 – 7,56 ч; для модели с ТК: АТПП1 – до 4,45 ч, АТПП2 – до 7,8 ч. Это позволяет делать выводы о путях сокращения простоя подвижного состава и в перспективе применять рекуррентные нейронные сети прямого распространения при выборе вариантов цифровых управленческих решений в транспортном производстве железнодорожных станций.

```

1  Nvag = int(input("Введите количество вагонов в поезде, прибывающем на станцию Новороссийск"))
2  print()
3  N = int(input("Введите количество экспериментов"))
4  GL1 = float(input("Введите временной параметр прохождения главных путей GL1 станции Новороссийск (часов)"))
5  PG1 = float(input("Введите временной параметр обработки на грузовом дворе PG1 станции Новороссийск (часов)"))
6  SU = float(input("Введите временной параметр прохождения сортировочного устройства SU станции Новороссийск (часов)"))
7  PS = float(input("Введите временной параметр прохождения сортировочного парка PS станции Новороссийск (часов)"))
8  GFP1 = float(input("Введите временной параметр обработки на порту GFP1 станции Новороссийск (часов)"))
9  print()
10 for i in range(N):
11     t1a = GL1 + PG1
12     print("****")
13     print()
14     print("Поезд, состоящий из", Nvag, "вагонов, прибывает на грузовой парк PG через GL1")
15     import random
16     RND_SU = random.randint(0, 100)
17     if RND_SU <= 70:
18         t2a = SU
19         print(Nvag, "вагонов обрабатывают на сортировочном устройстве SU")
20     elif RND_SU > 70:
21         t2a = 0
22     t3a = PS + GFP1
23     print("Вагоны обрабатываются на сортировочном парке PS и обрабатываются в аксиомате порта GFP1")
24     print(" ")
25     print("Аксиомата станции Новороссийск завершена")
26     print(" ")
27     T = t1a + t2a + t3a
28     print("****")
29     Tfull = Tfull + T
30     T1 = Tfull / N
31     print("Среднее значение временного параметра выполнения аксиоматы станции Новороссийск", T1, "часов")

```

Рис. 6. Фрагмент программного кода решения прикладной аксиоматной задачи блока управления работой ст. Новороссийск

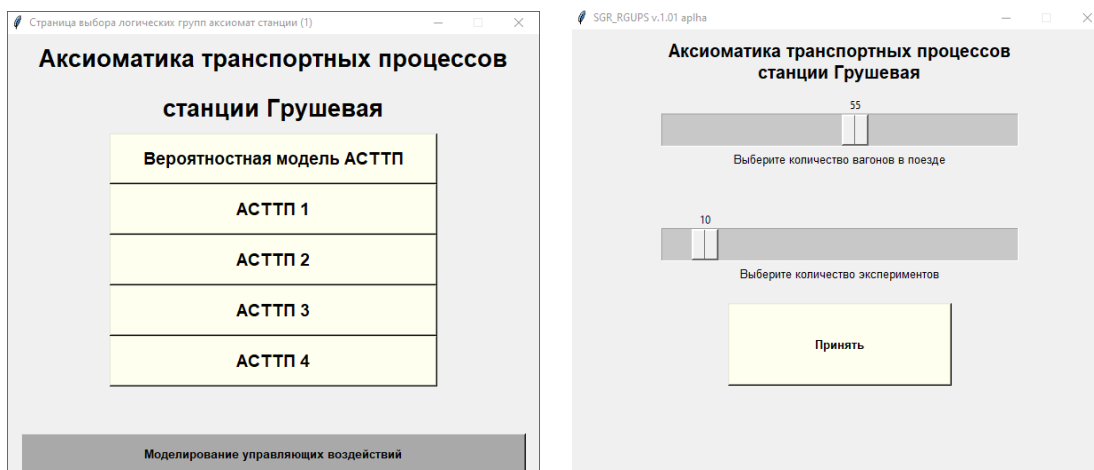


Рис. 7. Окна программы Axiomatic v. 1

Выводы

Таким образом, в статье были исследованы и построены схемы взаимодействия массивов данных объекта транспортной инфраструктуры в системе аксиоматики транспортно-технологических процессов, приведены логические группы базовой аксиоматной модели и РНС графологического формирования АМТПП, представлен алгоритм развертки РНС при формировании АМТПП в виде последовательностей шагов. Определен подход к выбору вариантов цифровых управленческих решений в транспортном производстве на основе принципов транспортных конфликтов.

В данной научной работе было проведено исследование аспектов развития методики АТПП в части исследования и анализа, а также последующей оптимизации технологии работы инфраструктурных объектов транспорта

на принципах аксиоматного моделирования, теории нечетких множеств, рекуррентных нейронных сетей, теории активных систем.

Была определена продолжительность совпадений маршрутов подвижного состава объекта инфраструктуры для двух аксиомат в условиях транспортного конфликта: $T_{\text{АТПП1-АТПП2}}^{\text{сов}} \approx 7$ мин. Построена вероятностная модель условий событий модели, из которой было выявлено, что если при начальной постановке задачи $P(\text{АТПП1}) = 0,1; P(\text{АТПП2}) = 0,4$, то при выполнении условий возникновения транспортных конфликтов: $P(A_0) = 0,04; P(A_1) = 0,96; P(A_2) = 0,42$. Таким образом, была определена продолжительность занятия элемента транспортной системы при одноуровневом пересечении на основе 100 итераций программного комплекса: АТПП1 – до 4,45 ч, АТПП2 – до 7,8 ч.

Список источников

1. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 1. С. 80–94. DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-80-94. EDN YINMKX.
2. Стратегия Цифровой трансформации РЖД // TADVISER : Государство. Бизнес. Технологии : [сайт]. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php>. Дата публикации: 07.08.2023.
3. Fuzzy modelling of the transportation logistics processes / O. Chislov, N. Lyabakh, M. Kolesnikov [et al.] // Journal of Physics. Conference Series. 2021. Vol. 2131. P. 032007. DOI 10.1088/1742-6596/2131/3/032007.
4. О применении искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте / В. Б. Положишников, В. А. Акманов, С. Н. Томащенко, Т. В. Шипунов // Железнодорожный транспорт. 2019. № 3. С. 33–36.
5. Покровская О. Д. Генезис логистических транспортных систем уровня 5-PL в свете новых антироссийских санкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 2. С. 141–163. DOI 10.20295/2223-9987-2022-2-141-163. EDN MNHUYJ.
6. Перспективы исследований транспортно-технологических параметров узловых пунктов концентрации и распределения припортовых вагонопотоков / В. М. Задорожний, О. Н. Числов, М. В. Колесников [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (85). С. 72–81. DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_72. EDN QAPOPR.

7. Розенберг Е. Н. Цифровая железная дорога – путь в будущее // Железнодорожный транспорт. 2017. № 4. С. 36–41. EDN YPTUFB.
8. Efficient and secure logistics transportation system / M. V. Kolesnikov, N. N. Lyabakh, E. A. Mamaev, M. V. Bakalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 8. Novosibirsk, 2020. P. 012031. DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012031. EDN XHPXEZ.
9. Колесников В. И., Ковалев С. М., Иванченко В. Н. Интеллектуализация транспортных процессов на основе гибридных технологий и мультиагентных систем // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2012. № 1 (45). С. 107–113. EDN OYHGWW.
10. Верескун В. Д., Зубков В. Н., Мамаев Э. А. Развитие логистики перевозочного процесса в железнодорожно-морском сообщении на юге России // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2019. № 1. С. 11–20. EDN ZWOJHH.
11. Цифровая оптимизация контейнерных маршрутов / П. В. Куренков, Д. Г. Кахриманова, Н. А. Ковалева [и др.] // Транспорт: наука, техника, управление : научный информационный сборник. 2019. № 9. С. 21–36. DOI 10.36535/0236-1914-2019-09-4. EDN TFEYWM.
12. Лецкий Э. К., Семин А. В. Цифровые сервисы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении грузовыми перевозками на железнодорожном транспорте // Транспорт: наука, техника, управление. 2019. № 9. С. 17–20.
13. Ефанов Д. В., Шиленко А. С. Технологии цифрового моделирования в железнодорожной отрасли // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 2. С. 34–38. DOI 10.34649/AT.2020.2.2.007. EDN XIGZML.
14. Числов О. Н., Безусов Д. С. Принципы теории нечетких множеств в формализации инфраструктурно-технологического взаимодействия припортовой железнодорожной транспортной системы // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18, вып. 4. С. 578–590. DOI 10.20295/1815-588X-2021-4-578-590.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681955 Российская Федерация. Аxiomatic v. 1 – программа расчета параметров транспортных процессов : № 2022681124 : заявлено 07.11.2022 : опубликовано 17.11.2022 / Числов О. Н., Луганченко Н. М., Безусов Д. С. [и др.]. EDN PBZIMB.
16. Luganchenko N. M. Concept of transport-and-technological interaction of railway station and port // Актуальные проблемы транспортной отрасли в России и за рубежом : материалы IV Всероссийской студенческой научно-практической конференции на иностранных языках (Новосибирск, 3 ноября 2022 г.). Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2023. С. 37–42. EDN UZCOFQ.
17. Общие принципы аксиоматики узловых транспортных процессов / Н. М. Луганченко, Е. Е. Мизгирева, А. О. Полунина, Е. В. Дараселия // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (60). С. 53–58. EDN IQYPAP.

References

1. Pokrovskaya O. D. Logistic transport systems in Russia under the new sanctions. *Bulletin of scientific research results*. 2022;(1):80–94. (In Russ.). DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-80-94. ISSN 2223-9987.
2. Strategy for the Digital Transformation of Russian Railways until 2025. *TADVISER: State. Business. Technologies: [site]*. (In Russ.). URL: <https://www.tadviser.ru/index.php>. Publication date: 08/07/2023.
3. Chislov O., Lyabakh N., Kolesnikov M. [et al.]. Fuzzy modelling of the transportation logistics processes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131:032007. DOI 10.1088/1742-6596/2131/3/032007.
4. Polozhishnikov V. B., Akmanov V. A., Tomashchenko S. N., Shipunov T. V. On the use of artificial neural networks in railway transport. *Railway Transport*. 2019;(3):33–36. (In Russ.).
5. Pokrovskaya O. D. Genesis of 5-PL logistics transport systems in the light of new anti-Russian sanctions. *Bulletin of scientific research results*. 2022;(2):141–163. (In Russ.). DOI 10.20295/2223-9987-2022-2-141-163. EDN MHIIYJ.
6. Zadorozhnyi V. M., Chislov O. N., Kolesnikov M. V. [et al.]. Prospects for the study of transport and technological parameters of the key points of concentration and distribution of port car traffic. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2022;(85):72–81. (In Russ.). DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_72. EDN QAPOPR.
7. Rozenberg E. N. Digital railway – the way to the future. *Railway Transport*. 2017;(4):36–41. (In Russ.). EDN YPTUFB.
8. Kolesnikov M. V., Lyabakh N. N., Mamaev E. A., Bakalov M. V. Efficient and secure logistics transportation system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: 8. Novosibirsk; 2020. P. 012031. (In Russ.). DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012031. EDN XHPXEZ.
9. Kolesnikov V. I., Kovalev S. M., Ivanchenko V. N. Intellectualization of transport processes based on hybrid technologies and multi-agent systems. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2012;(45):107–113. (In Russ.). EDN OYHGWW.

10. Vereskun V. D., Zubkov V. N., Mamaev E. A. Development of the logistics of the transportation process in the railway-sea communication in the south of Russia. *Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways*. 2019;(1):11–20. (In Russ.). EDN ZWOJHH.
11. Kurenkov P. V., Kakhrimanova D. G., Kovaleva N. A. [et al.]. Digital optimization of container routes. *Transport: Science, Technology, Management. Scientific Information Collection*. 2019;(9):21–36. (In Russ.). DOI 10.36535/0236-1914-2019-09-4. EDN TFEYWM.
12. Letsky E. K. Semin A. V. Digital services for intelligent decision-making support in the management of freight traffic in railway transport. *Transport: Science, Technology, Management*. 2019;(9):17–20. (In Russ.).
13. Efanov D. V., Shilenko A. S. Digital modeling technologies in the railway industry. *Automation, Communication, Informatics*. 2020;(2):34–38. (In Russ.). DOI 10.34649/AT.2020.2.2.007. EDNXIGZML.
14. Chislov O. N., Bezusov D. S. Principles of the theory of fuzzy sets in the formalization of infrastructure and technological interaction of the port railway transport system. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2021;18(4):578–590. (In Russ.). DOI 10.20295/1815-588X-2021-4-578-590.
15. Chislov O. N., Luganchenko N. M., Bezusov D. S. [et al.]. Certificate of state registration of the computer program No. 2022681955 Russian Federation. Axiomatic v. 1 – program for calculating the parameters of transport processes. No. 2022681124. Applied 11.07.2022. Published 07.15.2023. (In Russ.). EDN PBZIMB.
16. Luganchenko, N. M. Concept of transport-and-technological interaction of railway station and port. *Actual problems of the transport industry in Russia and abroad: Proceedings of the IV All-Russian Student Scientific and Practical Conference in Foreign Languages, Novosibirsk, 03 November 2022*. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2023. P. 37–42. EDN UZCOFQ.
17. Luganchenko N. M., Mizgireva E. E., Polunina A. O., Daraselia E. V. General principles of the axiomatics of nodal transport processes. *Proceedings of the Rostov State Transport University*. 2022;(60):53–58. (In Russ.). EDN IQYPAP.

Информация об авторах

О. Н. Числов – профессор кафедры «Станции и грузовая работа» Ростовского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

Н. М. Луганченко – аспирант кафедры «Станции и грузовая работа» Ростовского государственного университета путей сообщения.

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

Н. М. Магомедова – доцент кафедры «Станции и грузовая работа» Ростовского государственного университета путей сообщения, кандидат экономических наук.

Information about the authors

O. N. Chislov – Professor of the Stations and Freight Work Department, Rostov State Transport University, Doctor of Engineering.

N. M. Luganchenko – Post-graduate Student of the Stations and Freight Work Department, Rostov State Transport University.

V. V. Khan – Associate Professor of the Stations and Freight Work Department, Rostov State Transport University, Candidate of Engineering.

N. M. Magomedova – Associate Professor of the Stations and Freight Work Department, Rostov State Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 14.09.2023; одобрена после рецензирования 11.12.2023; принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 14.09.2023; approved after reviewing 11.12.2023; accepted for publication 12.01.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.225
doi 10.52170/1815-9265_2024_68_33

Рациональное распределение перевозок на основе решения транспортной задачи линейного программирования

Вячеслав Александрович Эсаулов^{1✉}, Борис Израильевич Давыдов²,
Евгений Викторович Мединцев³

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

³ Дальневосточная дирекция управления движением – структурное подразделение Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД», Комсомольск-на-Амуре, Россия

¹ esaulov-87@mail.ru✉

² dbi@rambler.ru

³ medintsev_78@mail.ru

Аннотация. Грузовые перевозки по магистральным железным дорогам служат важной составляющей экономики России. В условиях роста масштаба и интенсивности перевозок усиливается внимание к обеспечению их эффективности. В 2023 г. технические преобразования, оказывающие непосредственное влияние на работу Дальневосточной железной дороги и Восточного полигона ОАО «РЖД», претерпели существенные изменения. Закончены работы по реконструкции ключевых станций, на постоянной основе ведется работа по сокращению межпоездных интервалов посредством виртуального сцепления грузовых поездов, модернизируются локомотивный и вагонный парки.

Вместе с тем стабильность перевозочного процесса и повышение качества операционной деятельности железных дорог России в значительной степени обеспечивается посредством развития цифровых технологий, в частности внедрения динамической модели загрузки инфраструктуры. Цифровая трансформация эксплуатационной деятельности дороги вместе с централизованным управлением погрузкой посредством использования данной модели послужили основой для качественного изменения работы сети дорог ОАО «РЖД».

Несмотря на существенные преобразования работы Дальневосточной магистрали и сети дорог в целом, решение стратегических задач требует изыскания технологических резервов, а также совершенствования моделирования ключевых транспортных процессов.

В статье предложен способ увеличения объема стабильных перевозок на сети дорог посредством согласования маршрутов перевозок на железнодорожных станциях зарождения и погашения потока. Решается оптимизационная задача распределения грузопотоков на основе моделирования маршрутов грузовых поездов, использования алгоритма целочисленного линейного программирования. Предложенный способ позволяет удовлетворить возрастающий спрос на транспортные услуги, повысить доходность от перевозок массовых грузов.

Ключевые слова: железнодорожные грузовые перевозки, организация движения поездов, рациональные графические решения, динамическая модель загрузки инфраструктуры

Благодарности: работа выполнена при поддержке государственной программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Эсаулов В. А., Давыдов Б. И., Мединцев Е. В. Рациональное распределение перевозок на основе решения транспортной задачи линейного программирования // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 33–40. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_33.

TRANSPORT

Original article

Increasing the volume of cargo transportation due to rational distribution of volumes among loading stations

Vyacheslav A. Esaulov^{1✉}, Boris I. Davydov², Evgeniy V. Medintsev³

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

³ Far-Eastern Traffic Control Directorate – structural subdivision of Central Traffic Control Directorate – branch of Russian Railways, Komsomolsk-on-Amur, Russia

¹ esaulov-87@mail.ru✉

² dbi@rambler.ru

³ medintsev_78@mail.ru

Abstract. Freight transportation on main railways is an important component of the Russian economy. With the growing scale and intensity of transportation, attention to ensuring its efficiency is increasing. In 2023, technical changes that have a direct impact on the operation of the Far Eastern Railway and the Eastern training ground of Russian Railways have undergone significant changes. Work on the reconstruction of key stations has been completed, work is ongoing to reduce inter-train intervals through virtual coupling of freight trains, and the locomotive and carriage fleets are being modernized.

At the same time, the stability of the transportation process and improving the quality of operating activities of Russian railways is largely ensured through the development of digital technologies, in particular the introduction of a dynamic model of infrastructure loading. The digital transformation of road operational activities, together with centralized loading management through the use of this model, served as the basis for a qualitative change in the operation of the road network of Russian Railways.

Despite significant transformations in the operation of the Far Eastern Highway and the road network as a whole, solving strategic problems requires finding technological reserves, as well as improving the modeling of key transport processes.

The article proposes a way to increase the volume of stable transportation on a road network by coordinating freight operations at railway stations of the origin and extinction of the flow. The optimization problem of organizing loading is solved based on modeling the flow of freight trains and solving a linear programming problem. The proposed method makes it possible to satisfy the growing demand for transport services and increase profitability from transportation of bulk cargo.

Keywords: railway freight transportation, organization of train traffic, rational scheduling solutions, dynamic model of infrastructure loading

Acknowledgments: the work was supported by the state program of strategic academic leadership Priority-2030.

For citation: Esaulov V. A., Davydov B. I., Medintsev E. V. Increasing the volume of cargo transportation due to rational distribution of volumes among loading stations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):33–40. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_33.

Введение

Грузовые перевозки по магистральным железным дорогам служат важной составляющей экономики России. В условиях роста масштаба и интенсивности перевозок усиливается внимание к обеспечению их эффективности [1–4]. Особую важность вопросы повышения пропускной способности и улучшения экономических показателей приобрели для железных дорог Сибири и Дальнего Востока России, что связано с интенсивно развивающимся взаимодействием со странами АТР. Решение стратегических задач – усиление инфраструктуры и локомотивного комплекса Восточного полигона ОАО «РЖД» – должно сопровождаться своевременным изысканием технологических резервов [5].

Стабильность перевозочного процесса и повышение качества операционной деятельности железных дорог России в значительной степени обеспечивается посредством развития цифровых технологий. Одним из эффективных средств, используемых при планировании грузовых перевозок, является комплекс динамического моделирования загрузки инфраструктуры (ДМЗИ) [6, 7]. Алгоритм работы динамической модели предполагает проверку возможности реализации заявки грузоотправителя с учетом фактической загруженности железных дорог.

В [6] авторами указано, что в качестве входной информации для комплекса задач, решаемых в ДМЗИ, используются следующие данные:

- дислокация вагонов на сети ОАО «РЖД»;
- фактическая выгрузка;
- перерабатывающие и пропускные способности элементов инфраструктуры.

Расчет возможности и срока доставки проводится на основе сводных графиков движения поездов. Очевидно, вероятность отклонения перевозчиком заявки снизится, если предпринять меры для оперативной перестройки графика отправления поездов с однородным грузом. При этом также повысится эффективность использования перевозочных ресурсов – инфраструктуры и подвижного состава.

Отказ от приема груза к перевозке является следствием снижения степени использования пропускной способности (прямой ответственности ОАО «РЖД»). Эти отказы влекут за собой экономические риски промышленных предприятий страны. Масштаб проблемы виден из статистических данных. Так, за семь месяцев 2023 г. только на Дальневосточной железной дороге в графике движения поездов возникло 82 технологических нарушения, приходящихся на 1 млн поездо-км; за-

держано 22 тыс. грузовых поездов на общее время 9,9 тыс. ч.

Алгоритм работы динамической модели загрузки инфраструктуры не включает задачу оптимизации погрузки, следовательно, не выдает предложений грузоотправителю о направлении груза на железнодорожные станции, имеющие текущий дефицит грузовой базы.

В настоящей статье детально рассмотрен вопрос постановки и решения оптимизационной задачи по распределению грузопотоков, связывающих пункты зарождения и погашения во времени. Рациональный график погрузки и движения поездов с указанным грузом выстраивается не только в соответствии с пропускными и перерабатывающими способностями инфраструктуры, но и с учетом ритмичности поступления поездов на станции выгрузки.

Методика организации погрузки на сети дорог

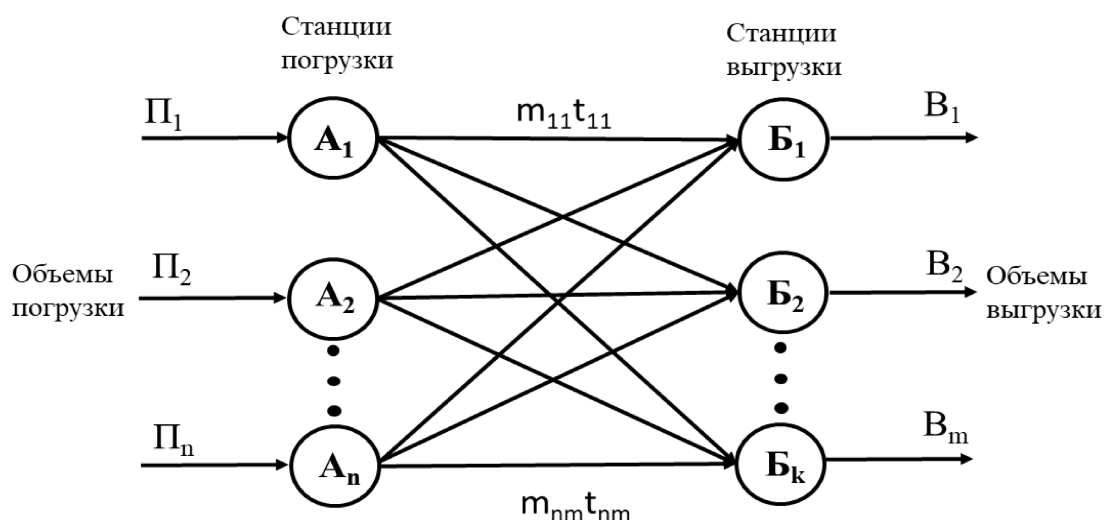
Рассмотрим постановку задачи оптимального распределения маршрутов от станций погрузки сети, используя критерий *минимума суммарных вагоно-часов по плану перевозки*. Данный параметр характеризует нахождение груза на инфраструктуре ОАО «РЖД», и чем он ниже, тем эффективней перевозка с точки зрения оборота вагона, эксплуатационных затрат и ключевых бюджетных показателей. На каждую из конечных станций должен быть доставлен заданный (фиксированный) объем груза. Эту величину задаем как жесткое ограничение в матрице корреспонденций. Эффек-

тивность искомого рационального распределения определяется выбором совокупности моментов отправления и маршрутов следования от пунктов погрузки до пунктов выгрузки. Времена следования по участкам (элементам маршрутов) на момент выполнения расчетов считаются заданными, определяются качеством организации движения поездов и инфраструктурными ограничениями.

Компоненты грузопотока m_i , формируясь на начальных станциях $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$, погашаясь на конечных станциях $B_j (j = 1, 2, \dots, k)$, формируют суммарный поток (рисунок). Часть потока с индексом j прибудет на конечную станцию B_j через T_{ij} суток (T_{ij} – время хода от самой удаленной станции погрузки). Такое требование возникает вследствие необходимости полного завершения доставки всего объема груза, предъявленного отправителем (например, судовой партии).

Интенсивность грузопотока не может превышать перерабатывающую способность станций выгрузки B_j и предельную способность станций погрузки Π_i , а расчетное количество поездов M_{ij} – имеющуюся пропускную способность участков инфраструктуры N_{ij} между станциями погрузки и выгрузки. Сейчас эти факторы являются основными фильтрами при отборе заявок на погрузку, главными причинами отказа в приеме груза к перевозке.

Математическую модель транспортной задачи можно представить в виде полинома,



Граф перевозки на сети дорог

аргументами которого являются объемы m_{ij} в пунктах погрузки i назначением в пункты j .

Целевая функция примет следующий вид:

$$\sum_A \sum_B M_{ij} T_{ij} = m_{1j}t_{1j} + m_{2j}t_{2j} + \dots + m_{nm}t_{nm} \rightarrow \rightarrow \min.$$

Ограничениями, учитываемыми при решении задачи, служат пропускные способности участков и перерабатывающие способности железнодорожных станций: $\sum m_{ij} \leq P_i$, $\sum m_{ij}t_{ij} \leq B_j$, $\sum M_{ij} \leq N_{ij}$.

Коэффициент t_{ij} отражает суммарное время продвижения отправки от станции погрузки до станции выгрузки. Эта величина включает время хода по участкам и интервалы обработки поезда на технических станциях.

Поиск оптимального решения заключается в выборе такой совокупности величин m_{ij} , которая минимизирует грузопоток по критерию минимума суммарных вагоно-часов по плану перевозки. Поиск оптимального распределения маршрутов реализуется по методике, которая применяется при решении транспортной задачи [8, 9]. Решение определяется путем использования алгоритма целочисленного ли-

нейного программирования – симплекс-метода [10].

Условия и ограничения представляются в виде таблиц свободных и базисных компонент, структура которых приведена ниже (табл. 1–3).

В процессе решения практических задач данные, представленные в табл. 2, должны заполняться для всех участков перевозки – от станций погрузки до станции выгрузки.

Пример постановки и решения условной задачи оптимизации распределения маршрутов грузопотока

Рассмотрим применение методики, описанной выше, на частном примере организации погрузки в порты узла Находка с условных станций погрузки (табл. 4).

Для определения соответствия вагонопотока наличной пропускной способности участка необходимо перевести погрузку в вагонах в поездообразование. Для построения модели, исходя из статистических данных работы участка Смоляниново – узел Находка за 2022 г., примем среднюю составность одного грузового поезда, равную 60 ваг. Полученные данные сведены в табл. 5. При построении реальной корреспонденции рекомендуется

Таблица 1

Ограничения, связанные с предельными возможностями станций зарождения и погашения грузопотока, ваг.

Станция погрузки/выгрузки	Выгрузка по станциям			Погрузка	Погрузочные возможности
	1	2	3		
1	m_{11}	m_{12}	...	$\sum m_{1j}$	P_1
2	m_{21}	m_{22}	...	$\sum m_{2j}$	P_2
3	...	...	...	...	...
Общая выгрузка	$\sum m_{i1}$	$\sum m_{i2}$	...	...	–
Перерабатывающая способность	B_1	B_2	...	–	–

Таблица 2

Ограничения, связанные с пропускными способностями участков, поездов/сут

Станция погрузки/выгрузки	Поездообразование			Расчетная пропускная способность	Наличная пропускная способность
	B_1	...	B_j		
A_1	M_{11}	...	M_{1j}	$\sum M_{1j}$	N_{1j}
A_2	M_{21}	...	M_{2j}	$\sum M_{2j}$	N_{2j}
...
A_i	–	–	–	$\sum M_{ij}$	N_{ij}

Таблица 3

Время хода от станций погрузки до станций выгрузки, ч

Станция погрузки/выгрузки	Время хода		
	1	2	3
1	t_{11}	t_{12}	...
2	t_{21}	t_{22}	...
3	...	...	...

использовать составность, установленную графиком движения поездов для отдельных направлений.

Общее количество поездов не должно превышать пропускную способность участка. В данном случае суммарный поездопоток равен 47 поездам. Пропускная способность участка на выбранном отрезке перевозки составляет 62 поезда.

Условное время хода от станций погрузки до станции выгрузки представлено в табл. 6.

В табл. 7 приведены данные по суммарным вагоно-часам, рассчитанным исходя из опорного плана.

В заключение формируется оптимальный план по критерию минимума суммарных вагоно-часов по плану перевозки, требуемых для реализации грузопотока (табл. 8). Оптимальный план предусматривает 247 900 ваг.-ч для осуществления погрузки, что ниже данных опорного плана на 200 ваг.-ч.

Таблица 4

Опорный план погрузки в адрес портов узла Находка, ваг.

Станция погрузки/выгрузки	Выгрузка по станциям									Погрузка, ваг.	Погрузочные возможности
	НВ	Н	МА	К	Р	Т	С	У	Х		
1	450	0	0	0	0	0	0	0	0	450	450
2	350	0	0	0	0	0	0	0	0	350	350
3	400	0	0	0	0	0	0	0	0	400	400
4	60	0	0	0	0	0	0	0	0	60	60
5	100	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100
6	140	260	0	0	0	0	0	0	0	400	400
7	0	30	300	20	0	0	0	0	0	350	350
8	0	0	0	200	0	0	0	0	0	200	200
9	0	0	0	0	80	10	310	30	50	480	500
Общая выгрузка	1 500	290	300	220	80	10	310	30	50	2 790	—
Перерабатывающая способность	1 500	290	300	220	80	10	310	30	50	—	—

Таблица 5

Поездопоток на выгрузочные станции узла Находка

Станция погрузки/выгрузки	Выгрузка по станциям, поезда									Погрузка, поезда	Пропускная способность, поезда/сут
	НВ	Н	МА	К	Р	Т	С	У	Х		
1	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8	62
2	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6	62
3	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7	62
4	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	62
5	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2	62
6	2,3	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7	62
7	0,0	0,5	5,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6	62
8	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3	62
9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,2	5,2	0,5	0,8	8	62
Итого	25	5	5	4	1	0	5	1	1	47	62

Таблица 6

Значения времени хода от станций погрузки до станций выгрузки, ч

Станция погрузки/выгрузки	Время хода от станций погрузки до станций выгрузки								
	НВ	Н	МА	К	Р	Т	С	У	Х
1	74	70	75	74	73	71	64	60	73
2	68	64	69	68	67	65	58	54	67
3	64	60	65	64	63	61	54	50	63
4	98	94	99	98	97	95	88	84	97
5	92	88	93	92	91	89	82	78	91
6	88	84	89	88	87	85	78	74	87
7	122	118	123	122	121	119	112	108	121
8	116	112	117	116	115	113	106	102	115
9	112	108	113	112	111	109	102	98	111

Таблица 7

Расчет параметра вагоно-часов по данным опорного плана

Станции погрузки/выгрузки	Затраты вагоно-часов по станциям									Всего
	НВ	Н	МА	К	Р	Т	С	У	Х	
1	33 300	0	0	0	0	0	0	0	0	33 300
2	23 800	0	0	0	0	0	0	0	0	23 800
3	25 600	0	0	0	0	0	0	0	0	25 600
4	5 880	0	0	0	0	0	0	0	0	5 880
5	9 200	0	0	0	0	0	0	0	0	9 200
6	12 320	21 840	0	0	0	0	0	0	0	34 160
7	0	3 540	36 900	2 440	0	0	0	0	0	42 880
8	0	0	0	23 200	0	0	0	0	0	23 200
9	0	0	0	0	8 880	1 090	31 620	2 940	5 550	5 0080
Итого	110 100	25 380	36 900	25 640	8 880	1 090	31 620	2 940	5 550	248 100

Таблица 8

Оптимальный план организации погрузки на станциях сети в адрес выгрузочных станций узла Находка

Станции погрузки/выгрузки	Затраты вагоно-часов по станциям									Всего
	НВ	Н	МА	К	Р	Т	С	У	Х	
1	0	12 600	7 500	0	5 840	0	2 560	0	3 650	32 150
2	16 320	7040	0	0	0	0	0	0	0	23 360
3	25 600	0	0	0	0	0	0	0	0	25 600
4	5 880	0	0	0	0	0	0	0	0	5 880
5	9 200	0	0	0	0	0	0	0	0	9 200
6	35 200	0	0	0	0	0	0	0	0	35 200
7	36 600	0	0	0	0	0	0	3 240	0	39 840
8	0	0	23 400	0	0	0	0	0	0	23 400
9	0	0	0	24 640	0	1 090	27 540	0	0	53 270
Итого	128 800	19 640	30 900	24 640	5 840	1 090	30 100	3 240	3 650	247 900

Заключение

Предложенные в статье постановка и решение одноэтапной транспортной задачи позволяют усовершенствовать процесс принятия управленческих решений при планировании погрузки, распределении установленных планов по дорогам и решающим станциям. Интеграция предложенного оптимизационного механизма в комплекс динамического моделирования загрузки инфраструктуры предоставит

возможность реализовать новый сервис: предлагать грузоотправителям массовых грузов варианты адресации на железнодорожные станции, имеющие дефицит грузовой базы. Это позволит снизить риск отставления поездов в пути следования, ускорить доставку груза. Раскрытый в статье способ повысит привлекательность железнодорожных перевозок, улучшит экономические показатели работы компании-перевозчика.

Список источников

- Осьминин А. Т., Никифорова О. А. Определение эффективности организации маршрутов с мест погрузки в современных условиях // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2008. № 1 (29). С. 91–100.
- Котов А. С., Сугробов Н. В. Анализ организации и управления погрузкой на железных дорогах // Вестник транспорта. 2012. № 2. С. 17–25.
- Котов А. С., Сугробов Н. В. Моделирование управления и организация погрузки // Вестник транспорта. 2012. № 3. С. 26–35.
- Богданович С. В. Оптимизация простоя вагонов в пунктах взаимодействия при организации погрузки-выгрузки массовых грузов // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. 2011. № 4 (71). С. 14–18.

5. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утверждена распоряжением Правительства Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. URL: file:///D:/Downloads/7enYF2uL5kFZIOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf (дата обращения: 06.09.2023).

6. О возможности применения в управлении железнодорожными транспортными системами и перевозочным процессом искусственного интеллекта / А. Т. Осминин, А. Н. Баушев, И. И. Осминина, А. А. Шатохин // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : сборник трудов научно-практической конференции с международным участием (Москва, 20–21 октября 2021 г.). Москва : Российский университет транспорта, 2022. С. 332–343.

7. Шапкин И. Н., Осминин А. Т. Цифровые технологии приходят на смену прежней идеологии управления перевозками // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : сборник трудов научно-практической конференции с международным участием (Москва, 20–21 октября 2021 г.). Москва : Российский университет транспорта, 2022. С. 413–431.

8. Рахмангулов А. Н. Методы оптимизации транспортных процессов. Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова, 1999. 114 с.

9. Оптимальное распределение средств локомотивной тяги на полигоне со сложным рельефом / Е. В. Мединцев, В. А. Эсаулов, Т. Н. Каликина [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2022. № 10. С. 10–14.

10. Таха Хемди А. Введение в исследование операций / [перевод с английского и редактирование А. А. Минько]. 7-е издание. Москва : Вильямс, 2005. 912 с.

References

1. Osminin A. T., Nikiforova O. A. Determination of the efficiency of the routes organization from the loading places in modern conditions. *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2008;(29): 91–100. (In Russ.).

2. Kotov A. S., Sugrobov N. V. Analysis of organization and management of loading on the railroads. *Transport Messenger*. 2012;(2):17–25. (In Russ.).

3. Kotov A. S., Sugrobov N. V. Modeling of management and loading organization. *Transport Messenger*. 2012;(3):26–35. (In Russ.).

4. Bogdanovich S. V. Optimization of wagon idle time at the points of interaction in the organization of mass cargo loading and unloading. *Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev*. 2011;(71):14–18. (In Russ.).

5. Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast for the period up to 2035: approved by the order of the Government of the Federation from November 27, 2021 № 3363-r. (In Russ.). URL: file:///D:/Downloads/7enYF2uL5kFZIOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf.

6. Osminin A. T., Baushev A. N., Osminina I. I., Shatokhin A. A. On the possibility of application of artificial intelligence in the management of railway transport systems and transportation process. *Innovative Technologies in Railway Transport. Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation (Moscow, October 20–21, 2021)*. Moscow: Russian University of Transport; 2022. P. 332–343. (In Russ.).

7. Shapkin I. N., Osminin A. T. Digital technologies replace the former ideology of transportation management. *Innovative technologies in railway transport. Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation (Moscow, October 20–21, 2021)*. Moscow: Russian University of Transport; 2022. P. 413–431. (In Russ.).

8. Rakhmangulov A. N. Methods of optimization of transport processes. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov; 1999. 114 p. (In Russ.).

9. Medintsev E. V., Esaulov V. A., Kalikina T. N. [et al.] Optimal distribution of locomotive traction means on the polygon with a complex relief. *The Zheleznodorozhny Transport*. 2022;(10):10–14. (In Russ.).

10. Taha Hemdi A. Introduction to operations research. Translated from English and edited by A. A. Minko. 7th edition. Moscow: Williams; 2005. 912 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В. А. Эсаулов – старший преподаватель кафедры «Организация перевозок и безопасность на транспорте» Дальневосточного государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Б. И. Давыдов – доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Дальневосточного государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Е. В. Мединцев – начальник железнодорожной станции Комсомольск-на-Амуре Дальневосточной дирекции управления движением – структурного подразделения Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД».

Information about the authors

V. A. Esaulov – Senior Lecturer of the Transportation Organization and Transport Safety Department, Far Eastern State Transport University, Candidate of Engineering.

B. I. Davydov – Associate Professor of the Automation, Telemechanics and Communications Department, Far Eastern State Transport University, Candidate of Engineering.

E. V. Medintsev – Head of the Komsomolsk-on-Amur railway station of the Far=Eastern Traffic Control Directorate, a structural subdivision of the Central Traffic Control Directorate, a branch of Russian Railways.

Статья поступила в редакцию 05.10.2023; одобрена после рецензирования 14.11.2023; принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 05.10.2023; approved after reviewing 14.11.2023; accepted for publication 12.01.2024.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 625.172
doi 10.52170/1815-9265_2024_68_41

Оценка зависимости уровня загрязненности балласта от удаленности от мест массовой погрузки угля

Дмитрий Валерьевич Величко^{1✉}, Виктория Александровна Рыжкова²

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

¹ vdv.nsk@mail.ru✉

² victoriya01@inbox.ru

Аннотация. В статье выполнен анализ загрязненности (частицами менее 25 и 0,1 мм) щебеночного балласта железнодорожного пути в зависимости от удаленности от Кузбасса по Транссибирской и Средне-сибирской магистралям на 141 опытном участке. Также приводятся усредненные результаты влияния срока службы (пропущенного тоннажа) на уровень загрязненности балласта на участках с одинаковой удаленностью от Кузбасса.

Загрязненность балласта по Транссибирской магистрали с ростом удаленности (от 300 до 1 100 км) от мест массовой погрузки угля (Кузбасс) по I пути: для фракции менее 25 мм при 700–900 млн т в среднем снижается с 37 до 30 %, при 900–1 100 млн т – с 41 до 38 %; для фракции менее 0,1 мм при 700–1 500 млн т – с 5,5 до 3,5 %; по II пути: для фракции менее 25 мм при 900–1 100 млн т – снижается с 36 до 33 %, при 1 100–1 300 млн т – с 36 до 34 %; для фракции менее 0,1 мм при 700–1 300 млн т – находится на уровне 3–5 %.

Уменьшение загрязненности балласта по Среднесибирской магистрали по I пути с ростом удаленности от Кузбасса (от 300 до 900 км): для фракции менее 25 мм при 900–1 100 млн т – с 35 до 32 %; для фракции менее 0,1 мм – с 9 до 6 %.

Ключевые слова: железнодорожный путь, Кузбасс, загрязненность балласта, Транссибирская магистраль, пропущенный тоннаж, верхнее строение пути

Для цитирования: Величко Д. В., Рыжкова В. А. Оценка зависимости уровня загрязненности балласта от удаленности от мест массовой погрузки угля // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 41–48. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_41.

TRANSPORT

Original article

Assessment of ballast contamination level dependence on remoteness from coal mass loading sites

Dmitry V. Velichko^{1✉}, Viktoria A. Ryzhkova²

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

¹ vdv.nsk@mail.ru✉

² victoriya01@inbox.ru

Abstract. The article analyzes the contamination (particles less than 25 and 0.1 mm) of the crushed stone ballast of the railway track depending on the distance from Kuzbass along the Trans-Siberian and Central Siberian Railways in 141 experimental sections. Also, the averaged results of the influence of the service life (missed tonnage), in areas with the same distance from Kuzbass, on the level of ballast pollution are given.

Ballast pollution on Trans-Siberian Railway with increasing remoteness (from 300 to 1 100 km) from places of mass coal loading (Kuzbass) on track I: for fraction less than 25 mm at 700–900 million tons on average decreases from 37 to 30 %, at 900–1 100 million tons – from 41 to 38 %; for fraction less than 0,1 mm at 700–1 500 million tons – from 5.5 to 3.5 %; on track II: For fraction less than 25 mm at 900–1 100 million tons – decreases from 36 to 33 %, at 1 100–1 300 million tons – from 36 to 34 %; for fraction less than 0.1 mm at 700–1 300 million tons – is at levels 3–5 %.

Decrease of ballast pollution along the Central Siberian Railway along the 1st way with increasing distance from Kuzbass (from 300 to 900 km): for fraction less than 25 mm at 900–1 100 million tons – from 35 to 32 %; for fraction less than 0.1 mm – from 9 to 6 %.

Keywords: railway track, Kuzbass, pollution of ballast, Trans-Siberian Railway, missed tonnage, permanent way

Введение

Щебеночный балласт является самым распространенным родом балласта для железных дорог ОАО «РЖД». Для 1-го и 2-го классов железнодорожного пути типовым родом балласта является щебень I и II категорий по ГОСТ 7392–2014 [1] с толщиной слоя не менее 40 см под железобетонными шпалами.

Необходимость очистки щебня, а следовательно и ремонта пути по состоянию балластного слоя [2, 3], обуславливается его загрязнением, которое является причиной потери фильтрационной способности щебеночного слоя и общего расстройтва пути.

По опыту Западно-Сибирской железной дороги (ЗСЖД) распространенной причиной загрязнения щебеночного балласта является просыпание сыпучих грузов. Основной участок погрузки сыпучих грузов (угля) на ЗСЖД – Кузнецкий угольный бассейн. В связи с этим практический интерес представляет оценка влияния удаленности от мест погрузки сыпучих грузов (Кузбасс) на уровень загрязненности балласта на примере участков Транссибирской (Транссиб) и Среднесибирской (Средсиб) магистралей [4–6]. Проведение подобных исследований направлено на оценку современного состояния проблемы роста загрязненности балласта, в том числе с учетом влияния удаленности от мест массовой погрузки угля, что в итоге позволит определить актуальность разработки мероприятий по снижению загрязненности, особенно для участков (вблизи районов с массовой погрузкой угля на ЗСЖД), для которых эта проблема имеет особенно важное организационно-технологическое и экологическое значение.

Материалы и методы исследования

Загрязнение щебня происходит в результате механического износа его зерен под воздействием подвижной нагрузки и шпалоподбивочных механизмов, а также попадания внешних засорителей [7–9]. Основные виды загрязнителей: продукты износа железобетонных шпал; частицы, перемещающиеся вверх из подбалластного гранулированного слоя; частицы, проникающие из земляного полотна;

продукты дробления и истирания балласта; падающие с вагонов частицы перевозимых сыпучих грузов (угля, песка). Наиболее значительно загрязняется балластный слой внешними засорителями.

При проведении натурных экспериментов использовались эмпирические методы исследования, при обработке результатов – методы регрессионного анализа.

Результаты исследования

При капитальных ремонтах, в соответствии с требованием нормативных документов [2, 3, 10], должен укладываться щебеночный балласт фракции 25–60 мм, в связи с чем щебень фракции менее 25 мм является засорителем, а менее 0,1 мм – загрязнителем.

Для оценки степени влияния удаленности от мест массовой погрузки угля (Кузбасс) на уровень загрязненности балласта (фракции менее 25 и 0,1 мм) рассматриваются 107 опытных участков по Транссибу и 34 опытных участка по Средсибу [5, 6], характеристика которых представлена в табл. 1.

Анализируемые данные о загрязненности щебеночного балласта были получены из материалов проектных институтов и полигонных исследований, выполненных СГУПС. Усредненные результаты влияния пропущенного тоннажа и удаленности от мест массовой погрузки угля на уровень загрязненности балласта для Транссибирской магистрали представлены в табл. 2, 3 и на рис. 1, 2, для Среднесибирской магистрали – в табл. 4, 5 и на рис. 3. При этом на рис. 1–3 в верхней их части даны точки и графики загрязненности частицами менее 25 мм, в нижней – менее 0,1 мм.

Зависимость уровня загрязненности балласта от срока службы (800–1 400 млн т) по I пути Транссибирской магистрали:

- для частиц менее 25 мм – при интервале удаленности от Кузбасса увеличивается: 400–600 км – на 22 % (с 35 до 43 %); 600–800 км – на 19 % (с 36 до 43 %);
- для частиц менее 0,1 мм – при различных интервалах удаленности от Кузбасса принимает близкие значения (с 3–4 до 4–6 %), в среднем увеличение составляет 42 %.

Таблица 1

Общая характеристика опытных участков (перегонов)

Параметр	Транссибирская магистраль		Среднесибирская магистраль	
	I	II	I	II
Класс, специализация пути	10	10	10	10
Средняя грузонапряженность, млн т-км бр. / км в год	131	86	135	48
Количество участков, шт., для интервала пропущенного тоннажа, млн т:				
300–500	–	–	2	5
500–700	–	–	2	2
700–900	14	15	3	1
900–1 100	19	10	14	1
1 100–1 300	26	13	3	–
1 300–1 500	9	1	1	–

Таблица 2

Влияние срока службы на уровень загрязненности балласта Транссиба

Интервал удаленности от Кузбасса, км	Количество участков, шт.	Загрязненность щебня, %							
		фракцией менее 25 мм				фракцией менее 0,1 мм			
		Пропущенный тоннаж, млн т							
		800	1 000	1 200	1 400	800	1 000	1 200	1 400
I путь									
200–400	68	39,0	37,6	–	–	5,0	3,0	–	–
400–600		32,7	40,9	39,6	41,2	4,3	2,8	4,5	4,9
600–800		34,0	43,1	36,3	43,7	4,0	3,0	5,1	5,2
800–1 000		33,7	39,4	36,0	26,5	3,6	3,0	4,3	4,4
1 000–1 200		30,0	36,0	31,3	27,2	3,7	–	4,6	3,9
II путь									
200–400	39	31,4	37,9	–	–	4,2	3,6	–	–
400–600		35,0	33,3	36,4	19,0	3,8	3,2	3,1	5,6
600–800		33,5	29,7	33,6	–	2,5	3,0	4,0	–
800–1 000		43,8	35,9	35,6	–	–	4,0	4,2	–
1 000–1 200		40,0	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 3

Влияние удаленности от Кузбасса на загрязненность балласта Транссиба

Пропущенный тоннаж, млн т	Загрязненность щебня, %									
	фракцией менее 25 мм					фракцией менее 0,1 мм				
	Удаленность от мест погрузки, км									
	300	500	700	900	1 100	300	500	700	900	1 100
I путь										
700–900	39,0	32,7	34,0	33,7	30,0	5,0	4,3	4,0	3,6	3,7
900–1 100	37,6	41,8	43,1	39,4	36,0	3,0	2,8	3,0	3,0	–
1 100–1 300	–	39,6	36,3	36,0	31,3	–	4,5	5,1	4,3	4,6
1 300–1 500	–	41,2	43,7	26,5	27,2	–	4,9	5,2	4,4	3,9
II путь										
700–900	31,4	35,0	33,5	43,8	40,0	4,2	3,8	2,5	–	–
900–1 100	37,9	33,3	29,7	35,9	–	3,6	3,2	3,0	4,0	–
1 100–1 300	–	36,4	33,6	35,6	–	–	3,1	4,0	4,2	–
1 300–1 500	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

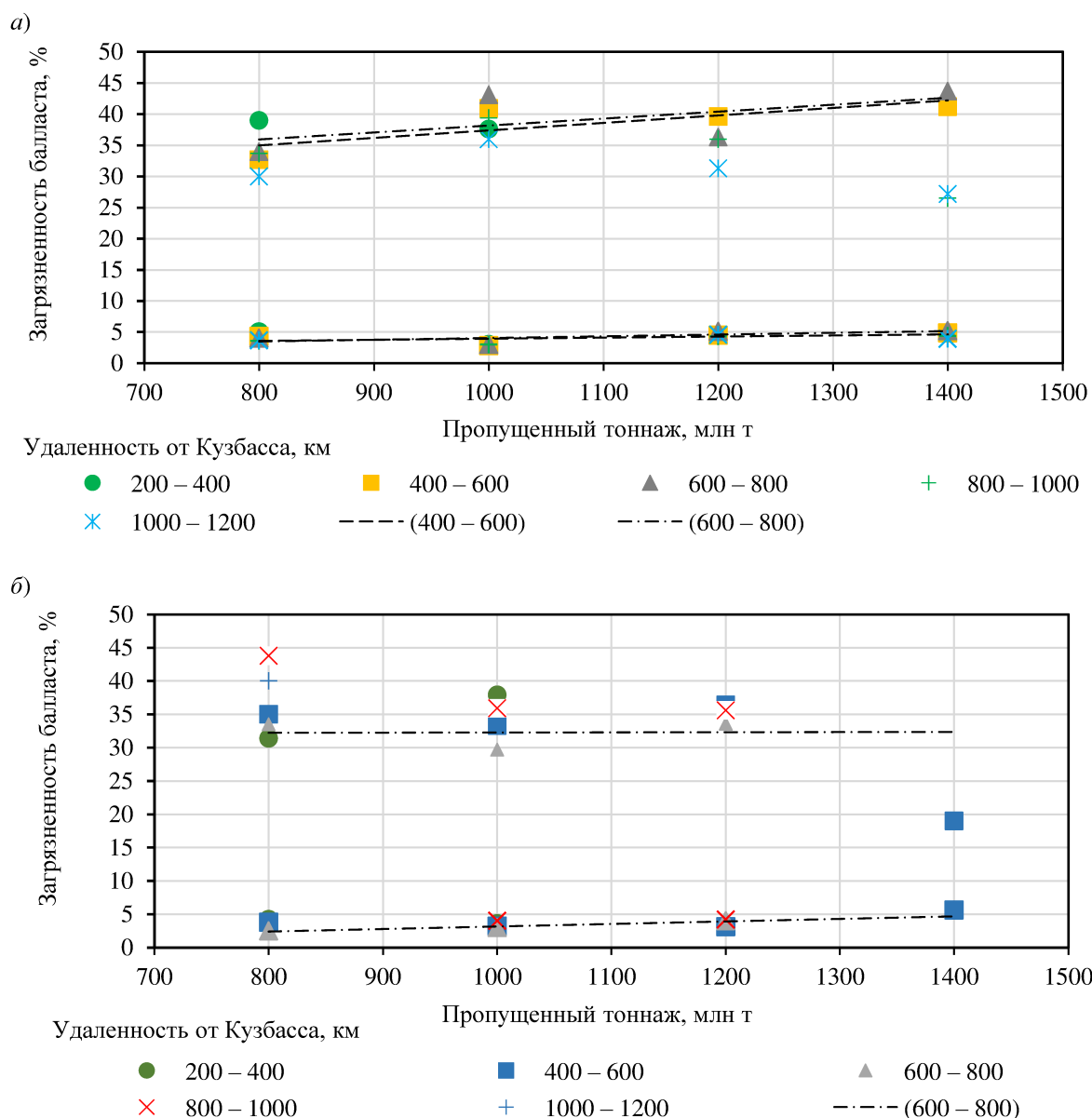


Рис. 1. Зависимость загрязненности балласта (менее 25 и 0,1 мм) от пропущенного тоннажа с учетом интервала удаленности от Кузбасса по Транссибу:
 а – I путь; б – II путь

Зависимость уровня загрязненности балласта от срока службы (800–1 200 млн т) по II пути Транссибирской магистрали:

- для частиц менее 25 мм – при интервале удаленности от Кузбасса 600–800 км выражается в увеличении на 3 % (с 34 до 35 %);
- для частиц менее 0,1 мм – при различных интервалах удаленности от Кузбасса имеет близкие показатели, в среднем увеличение составляет 42 % (с 3–4 до 5 %).

Усредненные результаты влияния удаленности от мест погрузки сыпучих грузов (от Кузбасса) на уровень загрязненности балласта по I и II путям Транссибирской магистрали (в пределах ЗСЖД) приведены на рис. 2.

Зависимость уровня загрязненности балласта от удаленности от Кузбасса (300–1 100 км) по I пути Транссибирской магистрали:

- для частиц менее 25 мм – снижается в интервале тоннажа: 700–900 млн т – на 8 % (с 37 до 30 %); 900–1 100 млн т – на 8 % (с 41 до 38 %); 1 100–1 300 млн т – на 21 % (с 42 до 33 %);
- для частиц менее 0,1 мм – принимает близкие значения, в среднем снижение составляет 63 % (с 5–6 до 3–4 %).

Зависимость уровня загрязненности балласта от удаленности от Кузбасса (300–900 км) по II пути Транссибирской магистрали:

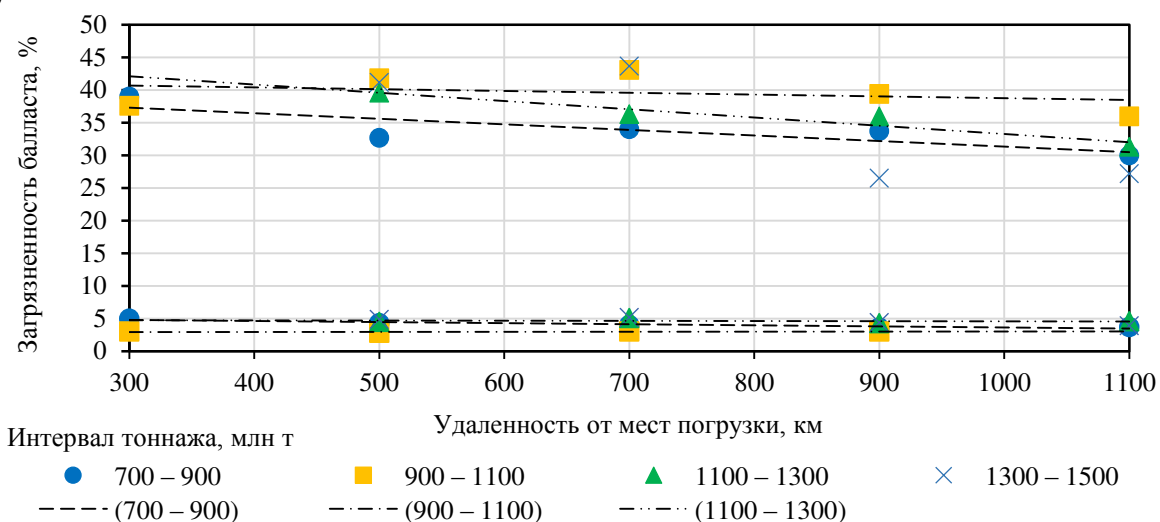
- для частиц менее 25 мм) – снижается в интервале тоннажа: 900–1 100 млн т – на 8 %

(с 36 до 33 %); 1 100–1300 млн т – на 6 % (с 36 до 34 %);

• для частиц менее 0,1 мм – принимает близкие значения: 3–5 %.

Зависимость уровня загрязненности балласта (для частиц менее 25 мм) от срока службы (800–1 400 млн т) по I пути Транссибирской магистрали при интервале удаленности от

а)



б)

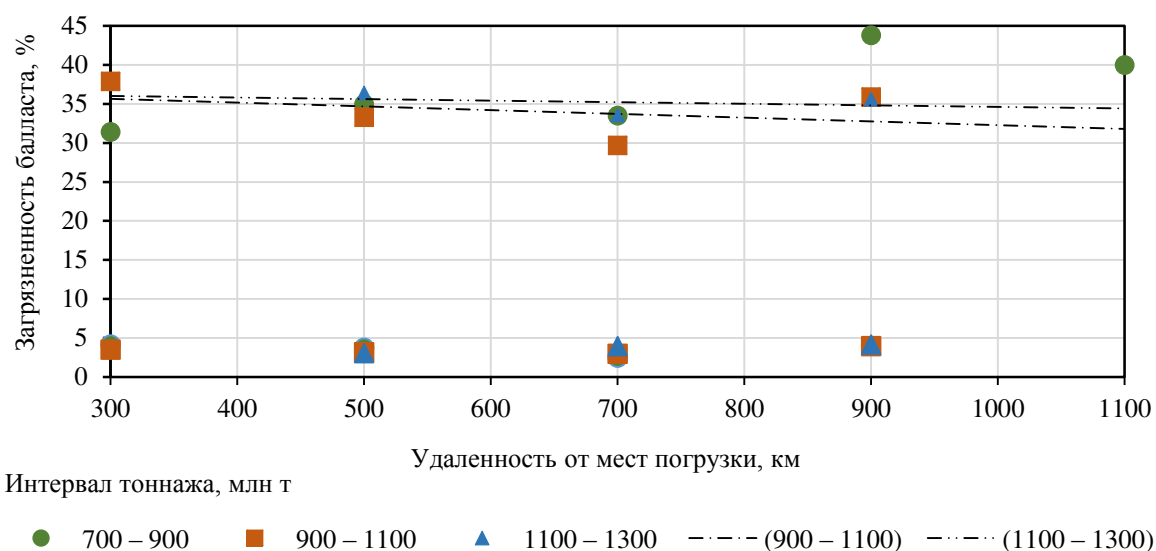


Рис. 2. Зависимость загрязненности балласта (менее 25 и 0,1 мм) от удаленности от Кузбасса по Транссибу с учетом интервала тоннажа:

а – I путь; б – II путь

Таблица 4

Влияние срока службы на уровень загрязненности балласта Средсиба

Интервал удаленности от Кузбасса, км	Количество участков, шт.	Загрязненность щебня, %											
		фракцией менее 25 мм						фракцией менее 0,1 мм					
		Пропущенный тоннаж, млн т											
		400	600	800	1000	1200	1400	400	600	800	1000	1200	1400
I путь													
200–400	25	35,9	–	36,3	35,6	–	–	6,8	–	5,5	8,8	–	–
400–600		–	–	–	32,7	–	–	–	–	–	8,4	–	–
600–800		–	–	40,1	32,3	–	–	–	–	–	5,7	1,9	–
800–1000		–	–	–	32,3	–	48,9	–	–	–	7,0	–	7,0
II путь													
200–400	9	35,0	24,4	34,5	24,0	–	–	5,8	4,0	6,2	2,5	–	–
400–600		–	46,2	–	–	–	–	–	8,4	–	–	–	–

Таблица 5

Влияние удаленности от Кузбасса на загрязненность балласта Средсиба

Пропущенный тоннаж, млн т	Загрязненность щебня, %							
	фракцией менее 25 мм				фракцией менее 0,1 мм			
	Удаленность от мест погрузки, км							
	300	500	700	900	300	500	700	900
I путь								
300–500	35,9	–	–	–	6,8	–	–	–
500–700	–	–	–	–	–	–	–	–
700–900	36,3	–	40,1	–	5,5	–	–	–
900–1100	35,6	32,7	32,3	32,3	8,8	8,4	5,7	7,0
II путь								
300–500	35,0	–	–	–	5,8	–	–	–
500–700	24,4	46,2	–	–	4,0	8,4	–	–
700–900	34,5	–	–	–	6,2	–	–	–
900–1100	24,0	–	–	–	2,5	–	–	–

Кузбасса увеличивается: 400–600 км – на 22 % (с 35 до 43 %); 600–800 км – на 19 % (с 36 до 43 %).

Данные о загрязненности участков по Среднесибирской магистрали представляют собой небольшой по объему массив, по которому сложно определить четкую зависимость по всему спектру пропущенного тоннажа и удаленности от Кузбасса.

Усредненные результаты влияния удаленности от мест погрузки сыпучих грузов (Кузбасс) на уровень загрязненности балласта по Среднесибирской магистрали приведены на рис. 3.

В материалах о загрязненности щебеночного балласта по Среднесибирской магистрали четкие зависимости проявляются только на участках по I пути в интервале тоннажа 900–1 100 млн т (см. рис. 3), где заметно

влияние удаленности от мест массовой погрузки угля (с 300 до 900 км). Для частиц менее 25 мм в среднем отмечено снижение на 9 % (с 35 до 32 %), для частиц менее 0,1 мм – на 33 % (с 9 до 6 %).

Выводы

Проведенное исследование позволило сделать следующие выводы:

1. В результате анализа современных данных о величине загрязненности щебеночного балласта по I и II путям на 107 участках Транссибирской (в пределах ЗСЖД) и на 34 участках Среднесибирской магистралей определено, что при увеличении расстояния от мест массовой погрузки угля (Кузбасс) уменьшается загрязненность балласта в зависимости от срока службы как для фракции щебня менее 25 мм, так и для фракции менее 0,1 мм.

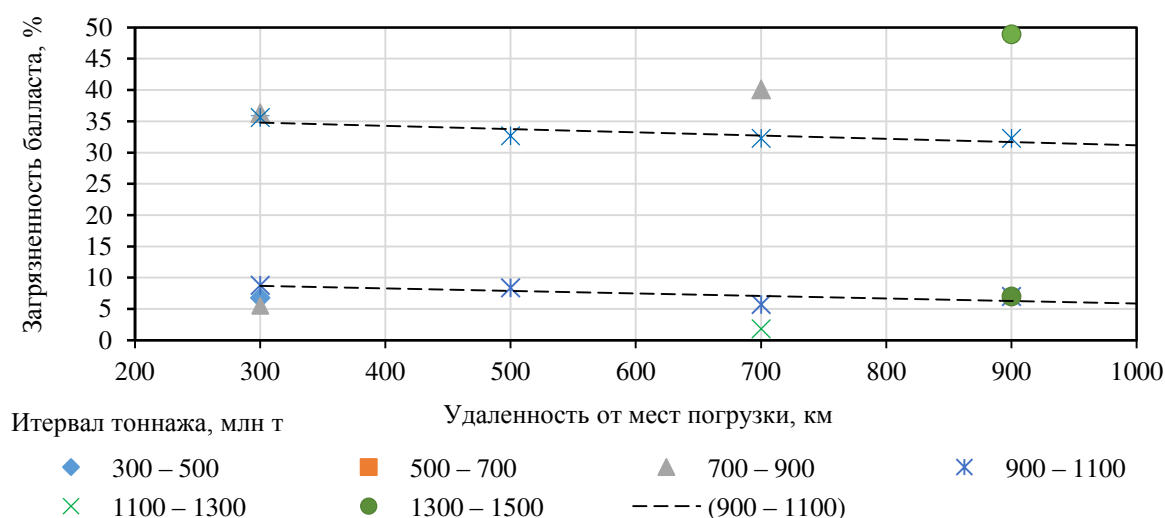


Рис. 3. Зависимость загрязненности балласта (менее 25 и 0,1 мм) от удаленности от Кузбасса с учетом интервала тоннажа по I пути Средсиба

2. Определено увеличение уровня загрязненности балласта Транссибирской магистрали по I и II путям с ростом срока службы (с 800 до 1 400 млн т):

– по I пути загрязненность балласта частицами менее 25 мм увеличивается при интервале удаленности от Кузбасса: 400–600 км – на 22 % (с 35 до 43 %), 600–800 км – на 19 % (с 36 до 43 %); частицами менее 0,1 мм в интервале удаленности 200–1 000 км – в среднем увеличивается на 42 % (с 3–4 до 4–6 %);

– по II пути загрязненность балласта частицами менее 25 мм увеличивается при интервале удаленности от Кузбасса 600–800 км – на 3 % (с 34 до 35 %); частицами менее 0,1 мм в интервале удаленности 200–1 000 км – в среднем увеличивается на 42 % (с 3–4 до 5 %).

3. Определено уменьшение уровня загрязненности балласта по I и II путям Транссибирской магистрали с ростом удаленности от мест массовой погрузки угля от Кузбасса (от 300 до 1 100 км):

– по I пути: для фракции менее 25 мм при 700–900 млн т – в среднем снижается на 8 % (с 37 до 30 %), при 900–1 100 млн т – на 8 % (с 41 до 38 %), при 1 100–1 300 млн т – на 21 %

(с 42 до 33 %); для фракции менее 0,1 мм при 700–1 500 млн т – на 63 % (с 5–6 до 3–4 %);

– по II пути: для фракции менее 25 мм при 900–1 100 млн т – снижается на 8 % (с 36 до 33 %), при 1 100–1 300 млн т – на 6 % (с 36 до 34 %); для фракции менее 0,1 мм при 700–1 300 млн т – находится на близких уровнях: 3–5 %.

4. Уменьшение уровня загрязненности балласта по Среднесибирской магистрали с ростом удаленности от мест массовой погрузки угля из-за небольшого объема данных с опытных участков определено только на участках по I пути в интервале тоннажа 900–1 100 млн т, где заметно влияние удаленности от Кузбасса (с 300 до 900 км): для частиц менее 25 мм – в среднем снижение на 9 % (с 35 до 32 %), менее 0,1 мм – на 33 % (с 9 до 6 %).

5. Для минимизации попадания в щебеночную балластную призму с грузовых полувагонов частиц перевозимого ими угля необходимо развивать комплекс мероприятий по предотвращению попадания на железнодорожный путь этих внешних засорителей, особенно вблизи районов с массовой погрузкой угля.

Список источников

1. ГОСТ 7392–2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 22 декабря 2014 г. № 73-П) : дата введения 2015-12-01. Москва : Стандартинформ, 2015. 32 с.

2. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 2888/р от 17.12.2021 : введены в действие с 29 апреля 2022 г. // Трудовой десант. Железнодорожное строительство : [сайт]. URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/314> (дата обращения: 05.09.2023).

3. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 75р от 18.01.2013 : редакция от 21.01.2015. Москва, 2013. 225 с.

4. Анализ технического состояния бесстыкового пути на Западно-Сибирской железной дороге / Д. В. Величко, Д. Г. Шелемetyев, Е. С. Антерейкин, А. А. Николаенко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3. С. 5–11.

5. Величко Д. В., Толстикова Н. А. Анализ загрязненности щебеночного балласта // Известия Транссиба. 2016. № 3. С. 110–117.

6. Величко Д. В. Особенности эксплуатации бесстыкового пути при превышении нормативного тоннажа // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2010. № 22. С. 49–53.

7. Бодяков А. Н. Анализ засорителей и загрязнителей щебеночного балласта // Образование. Наука. Производство : IX Международный молодежный форум. Белгород : Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова, 2017. С. 931–933.

8. Абдурашитов А. Ю., Сычева А. В., Кузнецова Н. В. Оценка предельного состояния щебеночного балласта на основе оценки его засоряемости // Наука и образование транспорту. 2019. № 2. С. 120–123.

9. Колос А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. № 3. С. 558–575.

10. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2544р от 14.12.2016 : ред. от 19.10.2020. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

References

1. GOST 7392–2014. Crushed stone from dense rocks for the ballast layer of the railway track. Specifications. Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (Minutes of December 22, 2014 № 73-P); date of introduction 2015-12-01. Moscow: Standartinform; 2015. 32 p. (In Russ.).
2. Rules for the appointment of railway track repairs. Approved by order of Russian Railways No. 2888/r dated December 17, 2021. Enacted from April 29, 2022. *Labour landing party. Railroad Construction: [site]*. (In Russ.). URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/314>.
3. Specifications for work on the reconstruction (modernization) and repair of the railway track. Approved by order of Russian Railways No. 75r dated January 18, 2013, edition dated January 21, 2015, Moscow; 2015. 225 p. (In Russ.).
4. Velichko D. V., Shelemetiev D. G., Antereikin E. S., Nikolaenko A. A. Analysis of the technical condition of a seamless track on the West-Siberian Railway. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2017;(3):5–11. (In Russ.).
5. Velichko D. V., Tolstikova N. A. Analysis of the contamination of crushed stone ballast. *Journal of Transsib Railway*. 2016;(3):110–117. (In Russ.).
6. Velichko D. V. Peculiarities of operation of a jointless track when the standard tonnage is exceeded. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2010;(22):49–53. (In Russ.).
7. Bodyakov A. N. Analysis of weeds and pollutants of crushed stone ballast. *Education. Science. Production: IX International Youth Forum*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov; 2017. P. 931–933. (In Russ.).
8. Abdurashitov A. Yu., Sycheva A. V., Kuznetsova N. V. Evaluation of the limiting state of crushed stone ballast based on the assessment of its clogging. *Science and Education for Transport*. 2019;(2):120–123. (In Russ.).
9. Kolos A. F. Clogging and contamination of crushed stone ballast during the operation of the railroad track. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2022;(3):558–575. (In Russ.).
10. Instruction on the device, laying, maintenance and repair of the trackless track. Approved by the order of Russian Railways № 2544r from 14.12.2016 and edited from 19.10.2020. Access from the reference legal system ConsultantPlus. (In Russ.).

Информация об авторах

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

В. А. Рыжкова – студент факультета «Строительство железных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

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

V. A. Ryzhkova – Student of the Railway Construction Faculty, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 05.10.2023; одобрена после рецензирования 21.11.2023; принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 05.10.2023; approved after reviewing 21.11.2023; accepted for publication 12.01.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.22
doi 10.52170/1815-9265_2024_68_49

Совершенствование алгоритма работы сортировочной станции на основе оптимизации информационных потоков

Елена Сергеевна Богданова^{1✉}, Дмитрий Германович Неволин²,
Людмила Анатольевна Черепанова³, Дарья Константиновна Пургина⁴

^{1,2,3} Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

⁴ Екатеринбургский информационно-вычислительный центр – структурное подразделение Главного
вычислительного центра – филиала ОАО «РЖД», Екатеринбург, Россия

¹ esbogdanova@rambler.ru ✉

² innotrans@mail.ru

³ LCherepanova@usurt.ru

⁴ darya_410@mail.ru

Аннотация. Работа сортировочной станции представляет собой сложный процесс, в котором задействовано множество участников. Особая трудность связана с необходимостью получать, воспринимать и обрабатывать большие объемы информации, поступающей от участников сортировочного процесса; от того, насколько полно, достоверно и своевременно будет получена и проанализирована информация, зависит принятие конкретного решения руководящим персоналом сортировочной станции.

Основным предметом исследования в данной статье является автоматизация управления механизмами и производственными процессами сортировочной станции, а также оптимизация технологического процесса работы сортировочной станции на основе совершенствования информационного обмена. Рассмотрены возможные варианты автоматизации технологических процессов при организации работ на примере сортировочной горки. Проведен анализ алгоритма работы сортировочной станции по формированию грузовых составов с помощью оптимального построения информационных связей. Предложены и описаны основные функции модульной автоматизированной системы выработки предварительных решений, учитывающей больший объем данных, получаемых автоматически из соответствующих информационных систем, таких как автоматизированная система контроля технического состояния подвижного состава, автоматизированная система управления сортировочной станцией и др. Составлены требования к разрабатываемому алгоритму автоматической системы управления работой сортировочной станции по формированию грузовых составов.

В работе отмечены преимущества внедрения модульной автоматизированной системы предварительных решений, которая позволит руководящему персоналу каждого участка станции выбирать оптимальные варианты решений из предложенных системой с учетом анализа большого объема обработанной информации.

Ключевые слова: информационные потоки, сортировочная станция, алгоритм работы

Для цитирования: Совершенствование алгоритма работы сортировочной станции на основе оптимизации информационных потоков / Е. С. Богданова, Д. Г. Неволин, Л. А. Черепанова, Д. К. Пургина // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 49–58. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_49.

TRANSPORT

Original article

Improvement of the marshalling yard operation algorithm based on the optimization of information flows

Elena S. Bogdanova^{1✉}, Dmitry G. Nevolin², Ludmila A. Cherepanova³, Darya K. Purgina⁴

^{1,2,3} Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

⁴ Yekaterinburg Information Computing Center - a structural subdivision of the Main Computing Center, a branch of Russian Railways, Ekaterinburg, Russia

¹ esbogdanova@rambler.ru ✉

² innotrans@mail.ru

³ LCherepanova@usurt.ru

⁴ darya_410@mail.ru

Abstract. The operation of a marshalling yard is a complex process in which there are many participants. A particular difficulty is associated with the need to receive, perceive and process large amounts of information coming from participants in the sorting process. It depends on how completely, reliably and timely the information will be received and analyzed. It depends on the adoption of a specific decision by the management staff of the marshalling yard.

The main subject of research in this article is the automated control of mechanisms and production processes of a marshalling yard, also optimization of the technological process of work, based on the improvement of information exchange while optimizing information flows. To achieve the goal of increasing the automation of technological processes of the sorting hump. This article discusses possible options for automating technological processes in the organization of work using the example of a sorting hump. Study of the algorithm of the marshalling yard for the formation of freight trains, through the optimal construction of information links. For this purpose, an analysis of the algorithm of the marshalling yard was carried out. The main functions of a modular automated system for the development of preliminary decisions, taking into account a larger amount of data, are proposed and described automatically received from the relevant information systems, such as the automated system for monitoring the technical condition of the rolling stock of the automated monitoring system of the automated monitoring system of the substation, the automated control system of the marshalling yard and others. The requirements for the developed algorithm of the automatic control system for the work of the marshalling yard for the formation of freight trains have been formed.

The paper notes the advantages of introducing a modular automated system of preliminary decisions, which will allow the management staff of each station section to choose the best solutions from the ones offered by the system, taking into account the analysis of a larger amount of processed information.

Keywords: information flows, marshalling yard, algorithm of work

For citation: Bogdanova E. S., Nevolin D. G., Cherepanova L. A., Purgina D. K. Improvement of the marshalling yard operation algorithm based on the optimization of information flows. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):49–58. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_49.

Введение

Составы поездов формируются из вагонов, каждый из которых имеет свой пункт назначения. Для этого на сети железных дорог в узловых точках располагают сортировочные станции. Основная задача таких станций – расформирование и формирование грузовых составов поездов, эти операции должны выполняться с минимальными экономическими затратами на переработку и минимальными затратами времени на нахождение вагонов на станции. Кроме того, на сортировочных станциях производят: техническое обслуживание и коммерческий осмотр составов грузовых поездов; ремонт вагонов; техническое обслуживание, экипировку и ремонт локомотивов; смену локомотивов и локомотивных бригад [1].

Проблемы автоматизации и интеллектуализации транспортных процессов сортировочных станций исследованы в работах А. О. Шилина, В. Н. Соколова, И. А. Ольгейзера, А. В. Суханова, В. Н. Иванченко, А. М. Лященко, А. Н. Шабельникова, А. Г. Савицкого и др. [2–7].

На сортировочных станциях используются автоматизированные системы [8–14], описанные в таблице.

Анализ автоматизированных систем подтверждает, что остались технологические операции, которые выполняются вручную, а применяемые механизмы имеют недостатки, так как

не позволяют улучшить существующую автоматизацию технологических процессов. В результате этого работники вынуждены непрерывно контролировать технологический процесс, чтобы в случае нештатной ситуации, в условиях ограниченного времени, осуществить переход на ручное управление процессом.

Материалы и методы исследования

Автоматические системы управления механизмами и производственными процессами сортировочной станции обеспечивают снижение доли ручных операций и оптимизацию технологического процесса работы сортировочной станции, повышают эффективность обработки поездов, сокращают время оборота вагонов, не повышая при этом нагрузку на персонал.

Работу сортировочной станции и отдельных участков можно представить в виде алгоритма [15] (рис. 1).

Анализируя актуальный алгоритм работы станции, приведенный на схеме, мы видим, что наиболее «нагруженными» являются блоки принятия решений.

Процесс принятия решений на данный момент не автоматизирован. Получение информации, необходимой для принятия решений, происходит по голосовым каналам (телефонной связи), из информационных систем путем считывания ее с мониторов автоматизированных рабочих мест (АРМ). Такой подход является

Автоматизированные системы сортировочных станций

Автоматизированные системы	Функции	Недостатки
Автоматизированная система контроля инвентарных номеров вагонов (АСКИН, «Пальма»)	Распознавание номеров. Считывание информации о вагонах. Контроль взаимного расположения вагонов в составе	Зависимость распознавания от степени загрязнения
Автоматизированная система контроля технического состояния подвижного состава (АСК ПС)	Диспетчерский контроль технического состояния подвижного состава. Передача информации о состоянии подвижного состава поезвному диспетчеру. Выдача статистических данных о работе устройств контроля	Низкая интеграция с другими системами. Принятие решения человеком
Автоматизированная система управления сортировочной станцией (АСУ СС)	Обработка технологических документов по приему, выпуску, формированию, отправке поездов. Выбор наиболее оптимальных режимов обработки грузовых составов. Предоставление оперативным руководителям сортировочной станции в удобном виде данные, необходимые для планирования работ, принятия решений и формирования управляющих воздействий	Принятие решения человеком
Автоматизированное рабочее место оператора пункта технического обслуживания вагонов (АРМ ПТО)	Ввод данных о смотровых бригадах. Получение информации о поезде в подходах. Ввод информации об обработке составов. Получение данных о поездах и вагонах. Формирование учетных и отчетных форм. Формирование сообщений для других систем (ГИД, АСУ СТ, ГВЦ)	Ручной ввод информации. Принятие решения человеком
Автоматизированная система ведения и анализа графика исполненного движения (ГИД «Урал-ВНИИЖТ»)	Ведение графика исполненного движения. Оперативный контроль поездного положения. Оперативный контроль дислокации и состояния локомотива. Оперативный анализ основных показателей эксплуатационной работы. Анализ веса, длины, скорости поездов. Анализ пропуска поездов по неспециализированным путям	Ручной ввод информации. Принятие решения человеком
Автоматизированная система управления станциями (АСУ СТ)	Реализация нижнего уровня оперативно-диспетчерского управления перевозочным процессом в пределах станций, входящих в район управления. Комплексная автоматизация технологических цепочек операций с объектами перевозочного процесса. Создание полного набора АРМ для работников, принимающих участие в организации перевозочного процесса. Создание отчетной и учетной документации. Текущее планирование поездообразования. Автоматизированное ведение графика работы. Определение оптимальной очередности и уборки вагонов на подъездные пути. Оптимизация формирования многогруппных поездов	Недостаточная автоматизация принятия решений
Комплексная система автоматизации управления сортировочным процессом (КСАУ СП)	Автоматизированное управление процессом расформирования составов. Улучшение условий работы оперативного персонала. Обеспечение заданных параметров технологического процесса на станции	Недостаток исполнительной системы
Автоматизированная система управления тяговыми ресурсами (АСУТ)	Автоматизация функций работников локомотивного депо, ПТОЛ, пунктов оборота бригад. Автоматизация функций работников на уровне служб локомотивного хозяйства дороги и на уровне регионов. Сбор и анализ показателей работы по сети, мониторинг нарушений технологических процессов, статистическая отчетность, прогнозирование	Ручной ввод информации. Принятие решения человеком

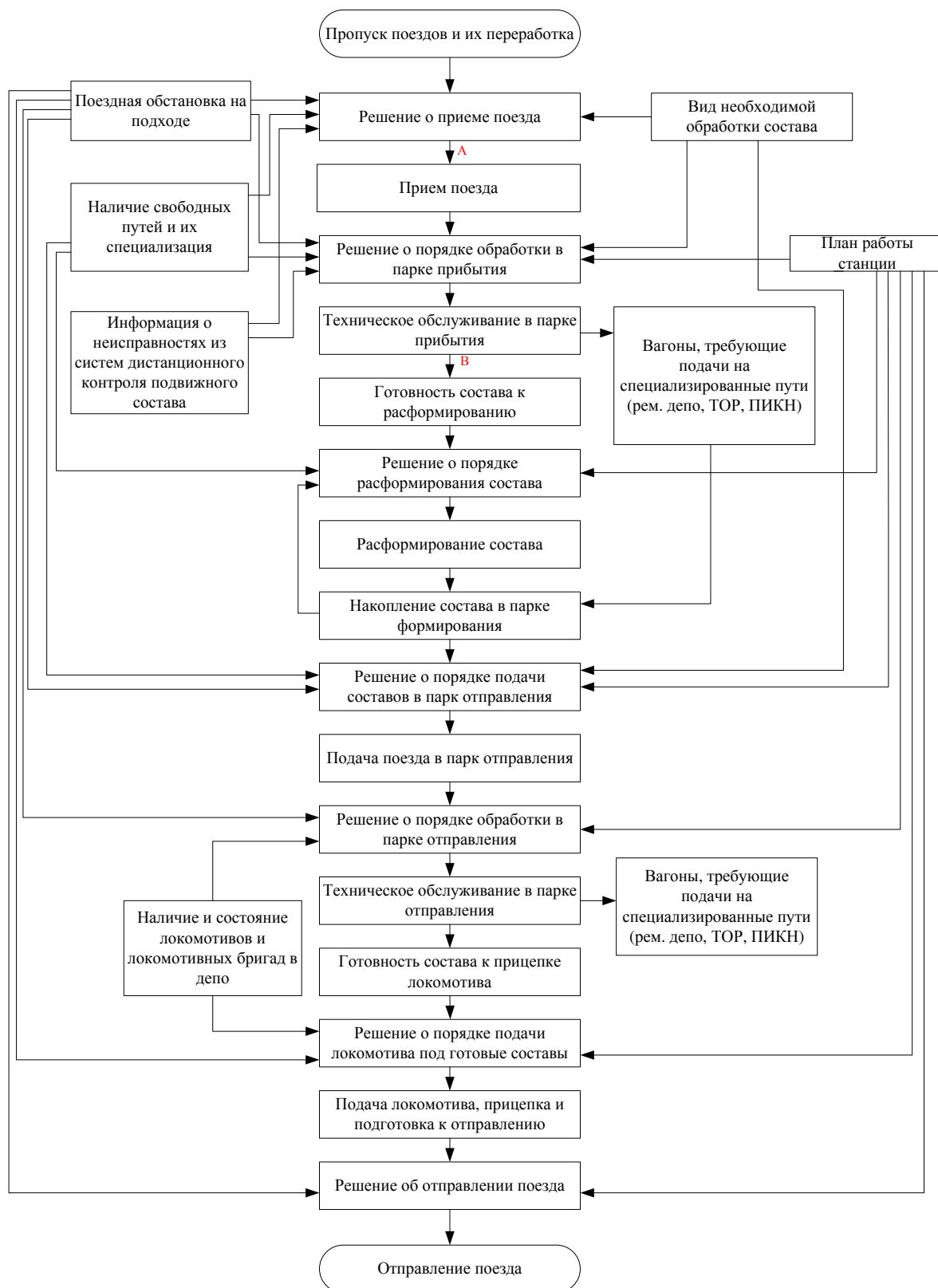


Рис. 1. Схема актуального алгоритма работы сортировочной станции:
ТОР – текущий отцепочный ремонт; ПИКН – пункт исправления коммерческих неисправностей

следствием недостаточной степени автоматизации обработки информации и выработки решений. В настоящий момент существующие информационные и автоматизированные системы, имеющиеся на станции, выполняют справочные функции либо управляют отдельными исполнительными механизмами. Например, выбор порядка обработки составов в парке отправления производится без должного учета текущей готовности локомотивов и бригад, что приводит к неэффективному использованию времени локомотивных бригад, повышению количества бригад с превышением нормативного времени работы, а также к неполному использованию ниток графика движения. В результате снижается эффективность работы станции.

Текущий алгоритм принятия решения представлен на рис. 2.

Это общая проблема для всех участков станции, когда решения принимаются с учетом незначительного количества параметров, являющихся наиболее важными.

Алгоритм, представленный в работе, позволит учитывать большее количество параметров работы станции, производить выработку предварительных решений, прогнозирование работы на ближайшее время, проведение своевременных корректирующих мероприятий, выработку отчетности по каждому участку станции за любой временной период.

Модульность данной системы позволит включать в нее дополнительные элементы в процессе модернизации, а также производить ее настройку под каждый конкретный вид сортировочной станции.

Разработка и внедрение данной системы приведет алгоритм работы сортировочной станции к схеме, представленной на рис. 3 (этапы А–В).

Автоматизированная система выработки предварительных решений состоит из отдельных модулей: модуль диспетчера станции, модуль дежурного парка прибытия, модуль сортировочной горки, модуль парка формирования, модуль парка отправления.

Рассмотрим систему выработки предварительных решений на примере модуля парка отправления, которая представлена на рис. 4.

Информационное взаимодействие модуля с другими модулями системы включает информацию о составах поездов, прибывающих в парк отправления: с модулем парка формирования – о составах поездов в парке формирования со статусом «готов к вытяжке в парк отправления»; с модулем парка прибытия – о наличии в парке прибытия или на обгонных путях станции транзитных поездов без переработки на станции; с системой ГИД «Урал-ВНИИЖТ» – о поездной обстановке на участках примыкания к станции; с АРМ локомотивного диспетчера – о статусе локомотивов на

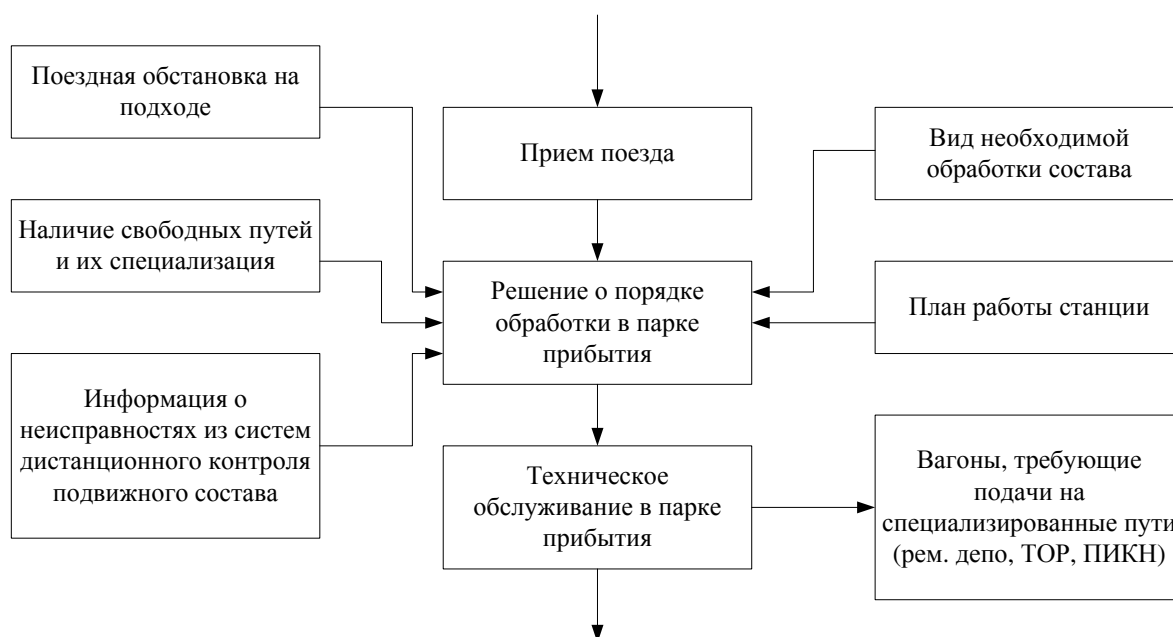


Рис. 2. Текущий алгоритм работы (этапы А–В на рис. 1)



Рис. 3. Оптимизированный алгоритм работы (этапы А–В на рис. 1) после создания автоматизированной системы принятия предварительных решений



Рис. 4. Схема взаимодействия модуля парка отправления с другими модулями

пункте технического обслуживания локомотивов, наряде локомотивных бригад и статусе локомотивных бригад.

Модуль парка отправления в режиме реального времени по информации, полученной от модуля парка формирования, определяет приоритетное для обработки направление главного хода. После этого формирует порядок вытяжки составов или приема транзитных поездов в парк отправления. После закрепления состава ДСП парка отправления присваивает составу статус «готов к обработке».

Далее для каждого состава в парке отправления со статусом «готов к обработке» система рассчитывает плановое время обработки:

$$T_{\text{обр}} = (n_{\text{ваг}} t_{\text{норм.обр}}) / n_{\text{бриг}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{обр}}$ – время обработки без учета превышения на безотцепочный ремонт; $n_{\text{ваг}}$ – количество вагонов в составе; $t_{\text{норм.обр}}$ – норма времени на обработку одного вагона; $n_{\text{бриг}}$ – количество осмотровиков в бригаде, назначенной для обработки.

Производится оценка количества вагонов в составе, требующих безотцепочного ремонта. При количестве данных вагонов более установленного норматива каждый последующий безотцепочный ремонт увеличивает время обработки состава на $t_{\text{опер}}$. Для транзитных составов время превышения обработки рассчитывается как сумма времени на ремонт каждого вагона сверх установленного норматива:

$$t_{\text{прев.обр}} = \sum t_{\text{опер}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{опер}}$ – нормативное время на совершение ремонтной операции.

После определения времени превышения обработки рассчитывается полное плановое время обработки состава:

$$T_{\text{план.обр.полн}} = T_{\text{обр}} + t_{\text{прев.обр}}. \quad (3)$$

Также модуль оценивает количество составов, имеющих статус «под обработкой» ($n_{\text{сост.обр}}$), и сравнивает его с количеством смотровых бригад в парке отправления ($n_{\text{бриг}}$). При $n_{\text{сост.обр}} = n_{\text{бриг}}$ модуль вычисляет время готовности смотровой бригады к обработке следующего состава по формуле

$$T_{\text{гот.бриг}} = T_{\text{расч}} - T_{\text{затр}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{расч}}$ – расчетное время обработки состава; $T_{\text{затр}}$ – время, уже затраченное бригадой на обработку состава.

При $n_{\text{сост.обр}} < n_{\text{бриг}}$ модуль принимает величину $T_{\text{гот.бриг}} = 0$.

Таким образом система рассчитывает полное время технической готовности состава поезда с учетом необходимого времени на обработку состава, выполнения работ по безотцепочному ремонту и занятости смотровых бригад:

$$T_{\text{полн.гот}} = T_{\text{план.обр.полн}} + T_{\text{гот.бриг}}. \quad (5)$$

Далее система рассчитывает примерное время готовности состава к отправлению:

$$T_{\text{гот.отпр}} = T_{\text{полн.гот}} + t_{\text{зах.лок}} + t_{\text{сокр}}, \quad (6)$$

где $t_{\text{зах.лок}}$ – среднее время маневров локомотива для осаживания на соответствующий путь парка отправления, которое определяется как средне-статистическая разность между временем выхода локомотива с контрольного поста $t_{\text{вых.лок}}$ и его фактическим осаживанием на соответствующий путь парка отправления $t_{\text{осаж.лок}}$ за предыдущие сутки; $t_{\text{сокр}}$ – время на сокращенное опробование автотормозов согласно технологическим нормативным картам.

На основании рассчитанного времени готовности состава к отправлению $T_{\text{гот.отпр}}$, данных из системы ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и графика движения определяются свободные нитки движения в направлении главного хода и, следовательно, возможность отправки состава.

Из системы локомотивного депо принимается информация о готовых локомотивах, локомотивов, проходящих обработку, и наряде локомотивных бригад. Для локомотивов, проходящих обработку, также принимается плановое время обработки с учетом времени приема локомотива локомотивной бригадой. На основании полученной информации определяется наличие готовых локомотивов к времени окончания обработки состава $T_{\text{полн.гот}}$ и локомотивной бригады с учетом общего веса состава и направления главного хода.

В случае наличия к времени окончания обработки состава готового локомотива, локомотивной бригады и свободной нитки в направлении главного хода составу устанавливается порядок обработки, начиная с приоритетного направления главного хода.

После определения порядка обработки составов в парке отправления данным составам присваивается статус «в ожидании осмотра», который отображается в АРМ оператора вагонного депо с порядковым номером в очереди на обработку.

На основании рассчитанного порядка обработки составов и назначенных для них ло-

комотивов и бригад система формирует порядок подачи локомотивов с путей пункта технического обслуживания локомотивов на ходовой путь парка отправления и направляет его на рабочие места дежурного парка отправления и локомотивного диспетчера.

В начале обработки оператор вагонного депо проставляет статус «осмотр». В случае выявления в процессе обработки состава в парке отправления вагонов, требующих отцепочного ремонта, система формирует заявку на производство маневровых работ и направляет маневровому диспетчеру. При выделении маневрового локомотива система прибавляет к времени обработки состава время на производство маневровых работ и производит повторные проверки на возможность отправления состава. При необходимости система вносит корректировку в заявку на локомотив и локомотивную бригаду.

В случае корректировки плана отправления составов система оценивает парк локомотивного депо и заявки на направление резервных локомотивов на другие станции. При выявлении локомотива, направление которого не соответствует направлению главного хода первого по порядку отправления состава, система оценивает возможность направления его на другой состав в парке отправления, сравнивая время готовности $T_{\text{полн.гот}}$ и $T_{\text{гот.к отпр}}$ в качестве резервного, при отрицательном результате анализа система оценивает возможность направления его на резервные пути парка отправления.

После окончания обработки состава и получения им статуса «техническая готовность», а также при наличии подходящего локомотива с бригадой на ходовом пути система формирует маршрут для подачи локомотива на необходимый путь парка отправления.

После получения подтверждения о прицепке локомотива оператор вагонного депо проставляет пометку «с локомотивом». Далее система уточняет время готовности состава к отправлению, где $T_{\text{гот.к отпр}} = t_{\text{сокр}}$, для чего повторно запрашивает в системе ГИД «Урал-ВНИИЖТ» наличие свободных ниток графика движения. Далее, исходя из количества бригад сокращенного опробования автотормозов (получаемого из АРМ оператора вагонного депо), формирует для поездов с пометкой «с локомотивом» порядок проведения сокращенного опробования, в котором учитывает наличие свободных «ниток» графика, время явки локо-

мотивной бригады, полученное из системы локомотивного депо (для исключения нарушения режима работы локомотивных бригад), а также возможное время простоя состава после проведения сокращенного опробования автотормозов (30 мин для составов грузовых поездов), после чего выдает данный порядок на рабочие места оператора вагонного депо и ДСП парка отправления.

По окончании проведения сокращенного опробования автотормозов система присваивает составу статус «готов к отправлению», подготавливает маршрут отправления и выдает его на рабочее место ДСП парка отправления. ДСП организует раскрепление состава поезда и подтверждает маршрут. После получения всех соответствующих подтверждений (свободности маршрута отправления, раскрепления состава) система присваивает составу статус «отправление».

Результаты исследования

В работе предложена теоретическая основа для разработки автоматизированной системы выработки предварительных решений, позволяющей прогнозировать работу на ближайшее время, проводить своевременные корректирующие мероприятия, вырабатывать отчетность по каждому участку станции за любой временной период. Приведен алгоритм работы сортировочной станции с учетом применения автоматизированной системы выработки предварительных решений. Для решения задач, специфических для каждой службы сортировочной станции, предложен модульный принцип построения автоматизированной системы выработки предварительных решений, определен основной состав модулей данной системы.

Выводы

Применение предложенной автоматизированной системы выработки предварительных решений позволит упростить алгоритм принятия решений сотрудниками сортировочной станции и улучшить их качество и оперативность благодаря машинной обработке информации. Это обеспечит повышение производительности работы сортировочной станции за счет более эффективного использования технических средств станции, а также ускорит доставку грузов по железной дороге в связи с сокращением времени простоя вагонов на сортировочной станции.

Список источников

1. Седов А. Н. 140 лет со дня открытия первой сортировочной станции в России // Ленгипротранс : [сайт]. URL: <https://lgt.ru/news/novosti-otrasli/140-let-so-dnya-otkrytiya-pervoy-sortirovochnoy-stancii-v-rossii>. Дата публикации: 18.10.2019.
2. Шилин А. О. Внедрение КСАУ СП в рамках концепции цифровой железнодорожной станции // Вопросы науки. 2022. № 3. С. 73–77.
3. Шабельников А. Н., Иванченко В. Н. Зарубежные системы автоматизации сортировочных горок // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 1. С. 30–33.
4. Иванченко В. Н., Лященко А. М. Принципы построения и программно-аппаратная реализация подсистемы интеллектуальной поддержки процессов расформирования поездов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 6 (155). С. 213–219.
5. Соколов В. Н., Ольгейзер И. А., Суханов А. В. Автоматическая система управления процессом надвига состава на сортировочную горку // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 11. С. 31–33.
6. Шабельников А. Н., Ольгейзер И. А., Суханов А. В. Концепция цифровой платформы на сортировочных станциях // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 1 (92). С. 60–73.
7. Савицкий А. Г. Комплексная система автоматизированного управления сортировочным процессом : специальность 05 22.08 «Управление процессами перевозок» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Савицкий Александр Григорьевич. Москва, 2005. 24 с.
8. АСКИН // АЛЬФА-ПРИБОР : [сайт]. URL: <https://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/askin/#:~:text=Автоматизированная%20система%20контроля%20инвентарных%20номеров,данным%20применяемым%20на%20территории%20предприятия> (дата обращения: 21.10.2023).
9. Автоматизированная система контроля подвижного состава (АСК ПС) // Pandia : [сайт]. URL: <https://pandia.ru/text/77/182/5083.php> (дата обращения: 21.10.2023).
10. Автоматизированная система управления работой сортировочной станции (АСУСС) // Poisk-ru.ru : [сайт]. URL: <https://poisk-ru.ru/s16624t23.html> (дата обращения: 21.10.2023).
11. АСУ ПТО // ЦИТ Транс : [сайт]. URL: <https://cittrans.ru/?p=3921> (дата обращения: 21.10.2023).
12. ГИД УРАЛ-ВНИИЖТ: Справочная система. URL: <http://gidural.ru/doku.php> (дата обращения: 21.10.2023).
13. АСУ СТ // ЦИТ Транс : [сайт]. URL: <https://cittrans.ru/?p=3929> (дата обращения: 21.10.2023).
14. Система управления сортировочным процессом КСАУ СП // НИИАС : [сайт]. URL: <https://niias.ru/products-and-services/products/infrastrukturnye-kompleksy/kompleksnaya-sistema-avtomatizatsii-upravleniya-sortirovochnym-protsessom/> (дата обращения: 21.10.2023).
15. Об утверждении Положения о железнодорожной станции : распоряжение ОАО «РЖД» от 31.05.2011 № 1186р : ред. от 08.08.2018. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_115516/ (дата обращения: 18.10.2023).

References

1. Sedov A. N. 140 years since the opening of the first marshalling station in Russia. *Lengiprotrans: [site]*. (In Russ.). URL: <https://lgt.ru/news/novosti-otrasli/140-let-so-dnya-otkrytiya-pervoy-sortirovochnoy-stancii-v-rossii>. Date of publication: 18.10.2019.
2. Shilin A. O. Implementation of CACS SP within the framework of the concept of a digital railway station. *Science Issues*. 2022;(3):73–77. (In Russ.).
3. Shabelnikov A. N., Ivanchenko V. N. Foreign automation systems for hump humps. *Automation, Communications, Information Technology*. 2014;(1):30–33. (In Russ.).
4. Ivanchenko V. N., Lyashchenko A. M. Principles of construction and software and hardware implementation of the subsystem for intellectual support of train disbandment processes. *Izvestiya of the Southern Federal University. Engineering Sciences*. 2014;(155):213–219. (In Russ.).
5. Sokolov V. N., Olgeizer I. A., Sukhanov A. V. Automatic control system for the process of pushing a train onto a hump. *Automation, Communications, Informatics*. 2021;(11):31–33. (In Russ.).
6. Shabelnikov A. N., Olgeizer I. A., Sukhanov A. V. Concept of a digital platform at marshalling yards. *World of Transport*. 2021;19(92):60–73. (In Russ.).
7. Savitsky A. G. Integrated system of automated control of the sorting process. Speciality 05 22.08 Transportation process management. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Engineering. Savitsky Alexander Grigorievich. Moscow; 2005. 24 p. (In Russ.).
8. ASKIN. *ALFA-PRIBOR: [site]*. (In Russ.). URL: <https://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/askin/#:~:text=Автоматизированная%20система%20контроля%20инвентарных%20номеров,данным%20применяемым%20на%20территории%20предприятия>.

9. Automated rolling stock control system (ASK PS). *Pandia: [site]*. (In Russ.). URL: <https://pandia.ru/text/77/182/5083.php>.
10. Automated control system for the marshalling yard (ASUSS). *Poisk-ru.ru: [site]*. (In Russ.). URL: <https://poisk-ru.ru/s16624t23.html>.
11. ASU PTO. *CIT Trans: [site]*. (In Russ.). URL: <https://cittransm.ru/?p=3921>.
12. GID Ural-VNIIZHT: Reference system. (In Russ.). URL <http://gidural.ru/doku.php>.
13. ASU ST. *CIT Trans: [site]*. (In Russ.). URL: <https://cittransm.ru/?p=3929>.
14. Description of application. Integrated automation system for controlling the sorting process KSAU SP. *NIIAS: [site]*. (In Russ.). URL: <https://niias.ru/products-and-services/products/infrastrukturnye-kompleksy/kompleksnaya-sistema-avtomatizatsii-upravleniya-sortirovochnym-protsessom/>.
15. Order of Russian Railways dated 05.31.2011 No. 1186r. On approval of the Regulations on the railway station. As amended on 08.08.2018. (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_115516/.

Информация об авторах

Е. С. Богданова – доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.
Д. Г. Неволин – профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.
Л. А. Черепанова – инженер по автоматизированным системам управления вузом учебно-методического отдела Уральского государственного университета путей сообщения.
Д. К. Пургина – технолог отдела сопровождения информационных систем управления перевозочным процессом Екатеринбургского информационно-вычислительного центра – структурного подразделения Главного вычислительного центра – филиала ОАО «РЖД».

Information about the authors

E. S. Bogdanova – Associate Professor of the Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport, Candidate of Engineering.
D. G. Nevolin – Professor of the Design and Operation of Automobiles Department, Ural State University of Railway Transport, Doctor of Engineering.
L. A. Cherepanova – Engineer for Automated University Management Systems of the Educational and Methodological Department, Ural State University of Railway Transport.
D. K. Purgina – Technologist in the Information System Support Department for Transportation Process Management at the Yekaterinburg Information Computing Center – a structural subdivision of the Main Computing Center, a branch of Russian Railways.

Статья поступила в редакцию 23.10.2023; одобрена после рецензирования 17.11.2023; принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 23.10.2023; approved after reviewing 17.11.2023; accepted for publication 12.01.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 625.144.6
doi 10.52170/1815-9265_2024_68_59

Технико-экономический анализ применения универсального оборудования для обслуживания рельсовых скреплений

Андрей Степанович Ильиных^{1✉}, Александр Александрович Войченко²

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

¹ asi@stu.ru✉

² vojcenkoaleksandr365@gmail.com

Аннотация. Одной из важных эксплуатационных особенностей бесстыкового пути является необходимость в большом объеме работ по переводу промежуточных рельсовых скреплений из рабочего положения в монтажное и наоборот. На данный момент перевод скреплений осуществляется преимущественно вручную или с использованием средств малой механизации, что требует больших трудозатрат монтеров пути и может негативно сказаться на производительности работ в технологическое «окно». Большие объемы работ по укладке, ремонту и содержанию бесстыкового пути и разнообразие применяемых промежуточных скреплений требуют создания и внедрения высокотехнологичных машин, способных работать с различными типами скреплений. Целью данного исследования является оценка возможности применения универсальных механизмов для перевода скреплений различных типов в монтажное положение.

Проанализированы существующие устройства и машины для обслуживания промежуточных рельсовых скреплений, выявлены их преимущества и недостатки. Проведен анализ действующей нормативно-технической документации на сборку, укладку и эксплуатацию пути с различными типами скреплений, на базе которой разработаны схемы переводов по типам скреплений. На основании схожей кинематики перемещений элементов скреплений при их переводе предложен вариант реализации универсального рабочего оборудования для работы со скреплениями различного типа, установленными на едином модуле монтажа/демонтажа скреплений. Произведена оценка экономической эффективности перевода скреплений полностью ручным способом, при частичной автоматизации процесса с помощью путевого моторного гайковерта и при автоматизации процесса с применением предложенного универсального модуля монтажа/демонтажа скреплений по критерию себестоимости единицы работ. Установлено, что экономически целесообразная производительность универсальной машины должна превышать 1,2 км/ч. Путьевой моторный гайковерт целесообразно использовать при фронте работ свыше 3,2 км. При объемах работ ниже 3,2 км на скреплениях типа ЖБР-65 и КБ-65 эффективнее осуществлять перевод с применением механизированного инструмента.

Ключевые слова: железная дорога, промежуточные рельсовые скрепления, бесстыковой путь, монтаж и демонтаж рельсовых скреплений

Для цитирования: Ильиных А. С., Войченко А. А. Технико-экономический анализ применения универсального оборудования для обслуживания рельсовых скреплений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 59–72. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_59.

TRANSPORT

Original article

Technical and economic analysis of universal equipment application for servicing rail fastenings

Andrey S. Ilinykh^{1✉}, Alexander A. Voychenko²

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

¹ asi@stu.ru✉

² vojcenkoaleksandr365@gmail.com

Abstract. One of the important operational peculiarities of the continuously welded rail track is the need for a large amount of work on the transfer of intermediate rail fastenings from the working position to the installation position and vice versa. At the moment the transfer of fastenings is carried out mainly manually or with the use of small mechanization means, which require large labour inputs of track fitters and can negatively affect the productivity of track works. Large volumes of laying, repair and maintenance of the track and variety of used intermediate fastenings require creation and introduction of high-tech machines capable to work with different types

of fastenings. The aim of the research is to evaluate the possibility of using universal mechanisms for transferring intermediate rail fastenings of various types from the working position to the mounting position and vice versa.

The analysis of existing devices and machines for maintenance of intermediate rail fastenings is presented; their advantages and disadvantages are revealed. The current Instructions for assembly, laying and operation of track with different types of fastenings are analyzed, on the basis of which transfer schemes by types of fastenings are developed. On the basis of similar kinematics of movements of fastenings elements during their transfer, a variant of realization of universal working equipment for work with fastenings of different types installed on a single module of fastenings mounting-dismounting is proposed. The economic efficiency of intermediate rail fastenings transfer by fully manual method, partial automation of the process by PMG machine and automation of the process with the proposed module of fastening mounting and dismounting has been evaluated by the criterion of unit cost of work. It has been established that the economically feasible productivity of the module should exceed 1.2 km/h. It is expedient to use PMG when the work front exceeds 3.2 km, and when the scope of work is less than 3.2 km it is more efficient to transfer fastenings with the use of mechanized tools.

Keywords: railway, intermediate rail fastenings, continuously welded rail track, installation and dismantling of rail fastenings

For citation: Ilinykh A. S., Voychenko A. A. Technical and economic analysis of universal equipment application for servicing rail fastenings. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):59–72. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_59.

Введение

На сегодняшний день как в мировой практике, так и в России температурно-напряженный бесстыковой путь признан наиболее прогрессивной конструкцией верхнего строения пути. В текущее время на бесстыковых путях в России применяются различные типы промежуточных рельсовых креплений, наряду с жесткими болтовыми креплениями типа КБ-65 более чем на 40 % протяженности путей используются упругие крепления различных конструкций (рис. 1) [1]. Из них наиболее распространены российские ЖБР-65 (и его модификации), АРС-4 и зарубежные Пандрол-350 (ПФК-350), Фоссло W-30. К тому же в связи с ростом требований к креплениям по надежности и технологичности обслуживания доля упругих креплений, эффективность применения которых обусловлена опытом

эксплуатации и проводимыми научными исследованиями, постоянно увеличивается [2].

При проведении путевых работ по укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути требуется перевод креплений из монтажного положения в рабочее и наоборот. Согласно инструкции [3] к таким работам относятся: замена инвентарных рельсов на сварные плети; ввод плетей в оптимальную температуру; замена плетей; разрядка температурных напряжений. Под рабочим положением крепления следует понимать положение элементов крепления, обеспечивающее фиксацию рельсовой плети к подрельсовому основанию (шпалам). Монтажное положение крепления – положение элементов крепления, при котором возможно беспрепятственное опускание (или подъем) рельсовой плети на подрельсовое основание.

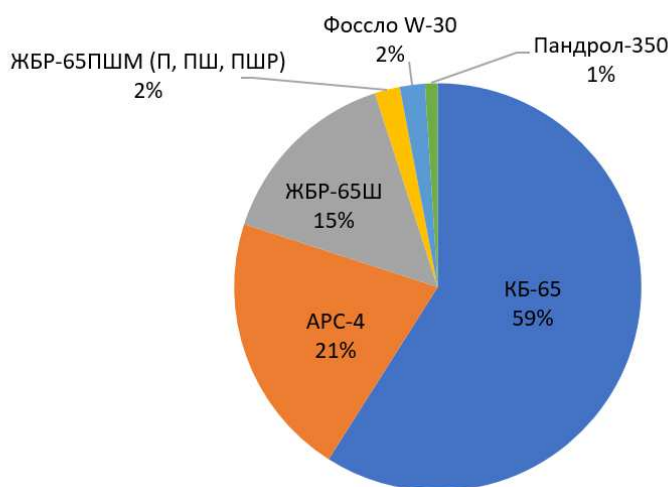


Рис. 1. Протяженность участков с различными типами креплений на бесстыковых путях ОАО «РЖД», %

Одной из наиболее характерных проблем для путевого хозяйства, требующей решения в настоящее время, является создание и внедрение высокотехнологичных машин для выполнения путевых работ. Масштабные объемы укладки, ремонта и текущего содержания пути, а также разнообразие применяемых креплений требуют использования высокоэффективного оборудования, имеющего возможность работы со всеми типами креплений. Целью работы является оценка возможности применения универсальных механизмов при переводе креплений различных типов из рабочего положения в монтажное и наоборот.

При укладке новых или замене изношенных рельсовых плетей значительную часть времени технологического «окна» занимает процесс монтажа и демонтажа рельсовых креплений, а также требует больших трудозатрат. В табл. 1 приведены трудозатраты на операции по монтажу и демонтажу креплений согласно действующим нормам [4] для участка пути протяженностью 1 км с эapurой шпал 1 840 шт./км. На рис. 2 представлено распределение трудозатрат при типовой замене инвентарных рельсов на рельсовые плети с учетом подготовительных, заключительных и основных работ.

Из рис. 2 видно, что более 70 % затрат труда приходится на перевод креплений из рабочего положения в монтажное и наоборот. Высокие трудозатраты на монтаж и демонтаж креплений обусловлены значительной долей ручного труда монтеров пути:

- для закручивания и откручивания шурупов и гаек креплений используется ручной способ (с помощью торцовых ключей), а также механизированный способ (с помощью бензиновых гайковертов КШГ-1Б, ГП 800, Geismar и др.), частичная автоматизация процесса возможна для креплений типа КБ-65 и ЖБР-65 с использованием путевых моторных гайковертов;

- сдвигка клемм упругих креплений осуществляется преимущественно вручную или же с применением ручного инструмента в случае с Пандрол-350;

- установка или снятие монорегулятора крепления АРС производится вручную с использованием удлиненного гаечного рожкового ключа с размером зева 36 мм.

Прибегнув к автоматизации отдельных операций перевода креплений, можно оптимизировать человеческие ресурсы, а также сократить время выполнения операций.

АО «Кубаньжелдормаш» выпускает машины МАРС-4 и ММД (машина монтажно-демонтажная) для механизации работ по обслуживанию креплений АРС-4 и Пандрол-350 соответственно. Конструкция машин состоит из ходовой тележки и установленного на ней рабочего органа, представляющего собой рычажный механизм, приводимый в действие гидроцилиндрами. Работа гидроцилиндров обеспечивается насосной станцией с бензиновым ДВС. Устройства хорошо подходят для локальных работ, однако оснащены одним рабочим органом, что позволяет выполнять работу на одной рельсовой нити с малой производительностью (примерно 0,15 км/ч), а также требуют непосредственного участия человека в процессе работы [5].

Несмотря на существование упомянутых машин, линейные подразделения испытывают нехватку специализированного путевого инструмента, а также средств механизации для монтажа/демонтажа узлов креплений Пандрол-350 и АРС-4 при проведении ремонтно-путевых работ [6].

Путевой моторный гайковерт ПМГ-1М и путевой прицепной гайковерт ПППГ-1М производства ОАО «ТМЗ им. В. В. Воровского» осуществляют автоматизацию процесса откручивания и закручивания гаек клеммных и закладных болтов крепления КБ-65, а также гаек закладных болтов крепления ЖБР-65. В качестве рабочих органов машин выступают четыре блока, каждый из них имеет четыре гайковерта, привод которых осуществляется от двух электродвигателей (по одному на пару гайковертов) через клиноременную передачу. Конструкция блоков обеспечивает работу со креплениями с двух сторон рельса обеих нитей. Поворотная конструкция трехшпиндельных гайковертов с трехлучевым редуктором обеспечивает безостановочное движение машины с рабочей скоростью до 0,7 км/ч [7], однако возможность работы с двумя типами креплений и неполная автоматизация процесса ограничивают применение машин ПМГ-1М и ПППГ-1М.

Таблица 1

Трудозатраты на монтаж и демонтаж креплений

Наименование операции		Измеритель	Кол-во	Кол-во исполнителей	Машины, механизмы	Оперативное время, нормо-мин	
						на измеритель	всего
Перевод в монтажное положение							
ЖБР-65Ш (и модификации), W-30	Отвинчивание шурупов на 3–5 оборотов	Шуруп	7 360	8 м. п.	КШГ	0,066	486
	Сдвигка клемм в монтажное положение	Клемма	7 360	7 м. п.	–	0,054	397
	Закрепление шурупов	Шуруп	7 360	15 м. п.	КШГ	0,120	859
ЖБР-65	Отвинчивание гаек закладных болтов	Метр пути	1 000	3 маш.	ПМГ	0,096	96
		Гайка	7 360	12 м. п.	КШГ	0,094	692
	Сдвигка клемм в монтажное положение	Клемма	7 360	7 м. п.	–	0,054	397
	Закрепление гаек закладных болтов	Гайка	7 360	24 м. п.	Ключ торцовый	0,215	1 582
				18 м. п.	КШГ	0,149	1 097
АРС	Снятие узлов креплений АРС-4	Узел	7 360	43 м. п.	Ключ АРС, лом	0,348	2 561
КБ-65	Отвинчивание гаек клеммных болтов	Метр пути	1 000	3 маш.	ПМГ	0,0136	100
		Гайка	7 360	15 м. п.	КШГ	0,122	898
	Снятие клеммного болта из гнезд подкладок в сборе	Болт	7 360	16 м. п.	Ключ торцовый	0,133	979
ПФК-350	Перевод клемм с прижимными изоляторами в монтажное положение	Клемма	7 360	14 м. п.	Ключ для демонтажа клеммы	0,111	817
Перевод в рабочее положение							
ЖБР-65Ш (и модификации), W-30	Откручивание шурупов	Шуруп	7 360	8 м. п.	КШГ	0,066	486
	Сдвигка клемм в проектное положение	Клемма	7 360	7 м. п.	–	0,054	397
	Завинчивание шурупов	Шуруп	7 360	15 м. п.	КШГ	0,122	898
ЖБР-65	Отвинчивание гаек закладных болтов	Гайка	7 360	24 м. п.	Ключ торцовый	0,17	1 251
				12 м. п.	КШГ	0,094	692
	Сдвигка клемм в проектное положение	Клемма	7 360	7 м. п.	–	0,054	397
	Закрепление гаек закладных болтов	Метр пути	1 000	3 маш.	ПМГ	0,096	96
		Гайка	7 360	18 м. п.	КШГ	0,149	1 097
АРС	Установка узла АРС с креплением монорегулятора	Узел	7 360	60 м. п.	Лом, ключ АРС-4	0,487	3 584
КБ-65	Установка клеммных болтов в сборе	Болт	7 360	15 м. п.	Ключ торцовый	0,120	883
	Закрепление гаек клеммных болтов	Гайка	7 360	3 маш.	ПМГ	0,0136	100,1
				19 м. п.	КШГ	0,157	1 156
ПФК-350	Перевод клемм с прижимными изоляторами в рабочее положение	Клемма	7 360	59 м. п.	Ключ для монтажа клеммы	0,480	3 533

Примечание. Сокращения: м. п. – монтер пути, маш. – машинист, ПМГ – путевой моторный гайковерт, КШГ – ключ шурупогаечный.

В марте 2023 г. представлена машина для работы со креплениями МС-700 АО «Тула-желдормаш». Машина имеет возможность работы со креплениями типа АРС-4, ЖБР-65, ПФК-350, КБ-65, W-30. Для работы с каждым типом креплений предусмотрен отдельный рабочий орган. Унификация ходовой части и остовов рабочего оборудования позволяет заменить

исполнительные механизмы под требуемый тип креплений. Устройство ходовых тележек позволяет продольно перемещать рабочие органы, обеспечивая безостановочное движение машины с заданной рабочей скоростью до 0,7 км/ч [8].

Однако рабочие органы для W-30 и ПФК-350 поставляются в виде отдельных исполнений машины, фактически для обеспечения универ-

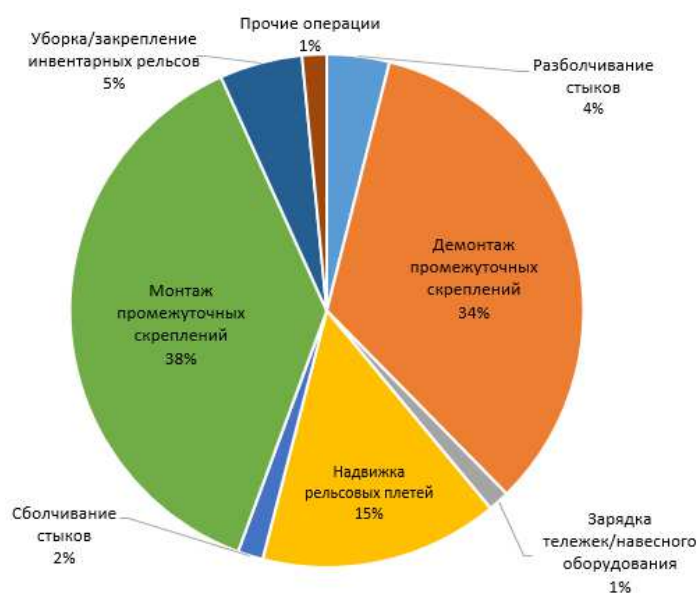


Рис. 2. Трудозатраты в процессе замены инвентарных рельсов рельсовыми плетями, %

сальности необходимы три машины. Также не обеспечивается полная автоматизация процесса перевода для креплений ЖБР-65.

Существуют и различные зарубежные аналоги высокопроизводительных машин [9] (компаний Robel, Geismar, Rosenqvist и др.), но, как правило, они предназначены для работы с одним типом креплений и не имеют исполнений под российскую рельсовую колею.

Произведен анализ действующих на ОАО «РЖД» инструкций на сборку, укладку и экс-

плуатацию пути с различными типами креплений [10–13], на основании которых по каждому типу креплений были разработаны в графической системе «Компас-3D v21» схемы переводов с указанием последовательности и направлений перемещения элементов (рис. 3–7). Графическим методом определены значения перемещений элементов креплений. Полный алгоритм действий при переводе креплений представлен в табл. 2.

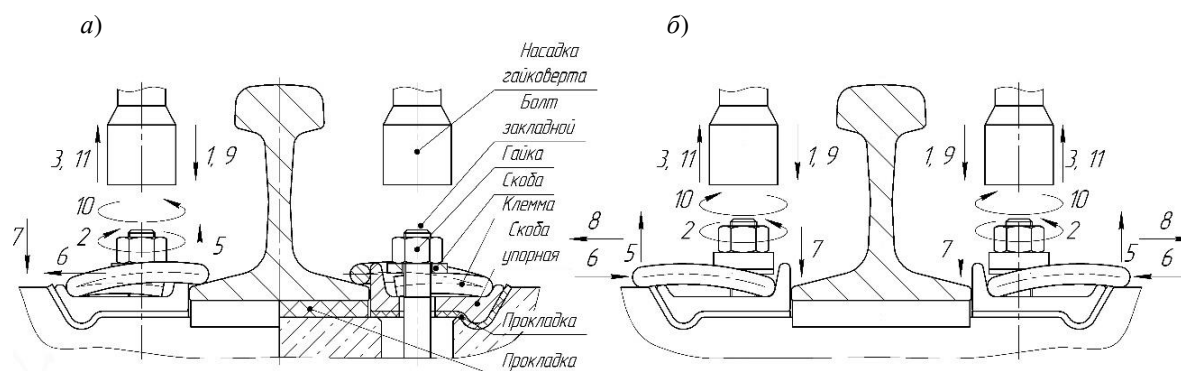


Рис. 3. Схема перевода креплений ЖБР-65, ЖБР-65Ш (и их модификаций):

- а* – в монтажное положение: 1 – подвести гайковерт к гайке закладного болта (шурупу); 2 – открутить гайку (шуруп) на три оборота; 3 – отвести гайковерт; 4 – подвести рабочий орган (на схеме не показан) к клемме; 5 – приподнять клемму; 6 – сдвинуть клемму; 7 – опустить клемму на упорную скобу; 8 – отвести рабочий орган; 9 – подвести гайковерт к гайке закладного болта (шурупу); 10 – закрутить гайку (шуруп); 11 – отвести гайковерт;
- б* – в рабочее положение: 1 – подвести гайковерт к гайке закладного болта (шурупу); 2 – открутить гайку (шуруп) на два-три оборота; 3 – отвести гайковерт; 4 – подвести рабочий орган (на схеме не показан) к клемме; 5 – приподнять клемму; 6 – сдвинуть клемму; 7 – опустить клемму на подошву рельса; 8 – отвести рабочий орган; 9 – подвести гайковерт к гайке закладного болта (шурупу); 10 – закрутить гайку; 11 – отвести гайковерт

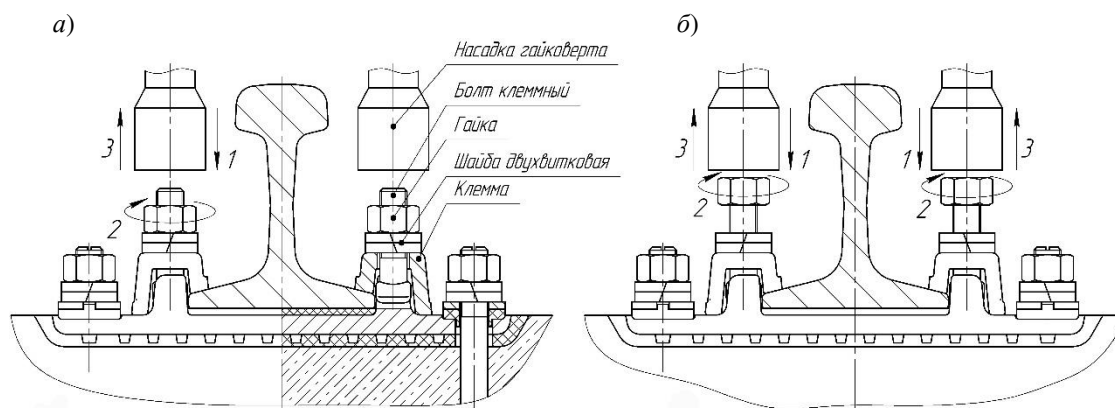


Рис. 4. Схема перевода крепления КБ-65:

- а* – в монтажное положение: 1 – подвести гайковерт к гайке клеммного болта; 2 – открутить гайку; 3 – отвести гайковерт;
- б* – в рабочее положение: 1 – подвести гайковерт к гайке клеммного болта; 2 – закрутить гайку; 3 – отвести гайковерт

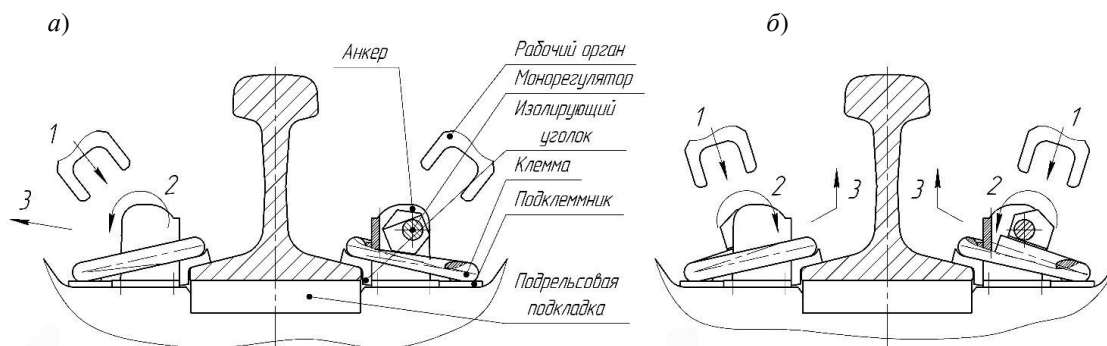


Рис. 5. Схема перевода крепления APC-4:

- а* – в монтажное положение: 1 – подвести рабочий орган к граням монорегулятора; 2 – повернуть монорегулятор в установочное положение; 3 – отвести рабочий орган;
- б* – в рабочее положение: 1 – подвести рабочий орган к граням монорегулятора; 2 – повернуть монорегулятор в третье положение; 3 – отвести рабочий орган

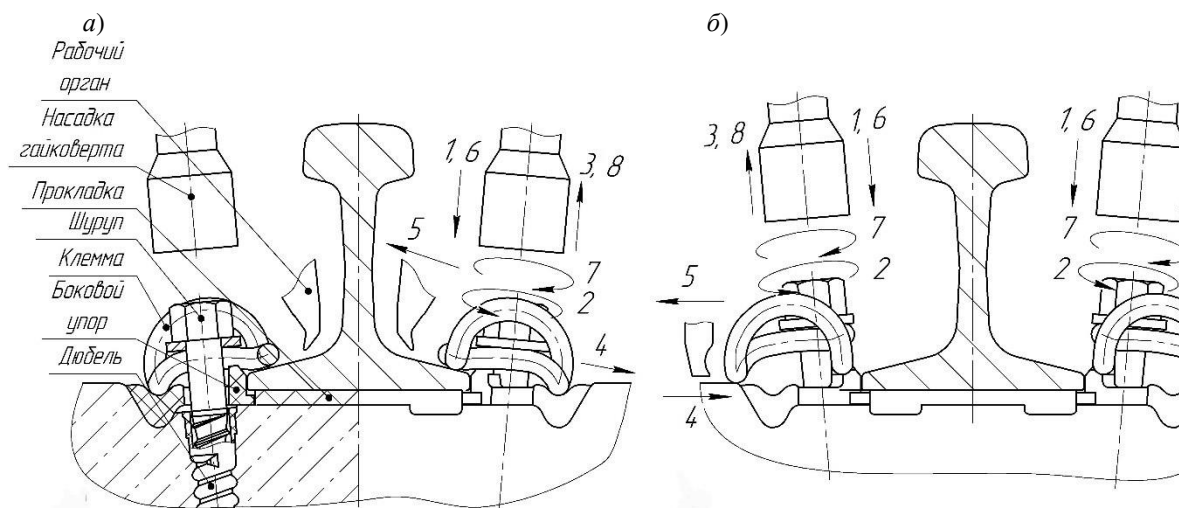


Рис. 6. Схема перевода крепления Фосло W-30:

- а* – в монтажное положение: 1 – подвести гайковерт к шурупу; 2 – открутить шуруп на три оборота; 3 – отвести гайковерт; 4 – сдвинуть клемму с подошвы рельса; 5 – отвести рабочий орган;
- б* – в рабочее положение: 1 – подвести гайковерт к шурупу; 2 – открутить шуруп на три оборота; 3 – отвести гайковерт; 4 – сдвинуть клемму до совпадения с выемкой бокового упора; 5 – отвести рабочий орган; 6 – подвести гайковерт к шурупу; 7 – закрутить шуруп; 8 – отвести гайковерт

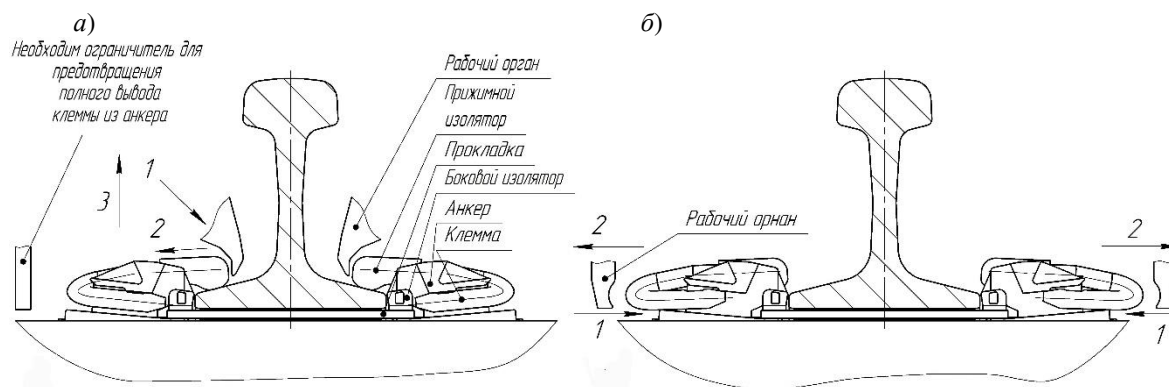


Рис. 7. Схема перевода крепления Пандрол-350:

а – в монтажное положение: 1 – подвести рабочий орган к прижимному изолятору; 2 – сдвинуть клемму с прижимным изолятором в монтажное положение; 3 – отвести рабочий орган;
б – в рабочее положение: 1 – сдвинуть клемму с прижимным изолятором в рабочее положение; 2 – отвести рабочий орган

Таблица 2

Алгоритм монтажа и демонтажа креплений

Тип крепления	Перевод в монтажное положение	Перевод в рабочее положение
ЖБР-65	Откручивание шурупа (или гайки) на три оборота; поднятие клеммы на 25–30 мм, перемещение ее в сторону от продольной оси рельса на 30–35 мм и опускание на упорную скобу; затяжка шурупа (гайки) крутящим моментом 50–100 Н·м	Откручивание шурупа (или гайки) на два-три оборота; поднятие клеммы на 25–30 мм, перемещение ее в сторону рельса на 30–35 мм и опускание на подошву рельса; затяжка шурупа крутящим моментом 200–250 Н·м, гайки – 200–250 Н·м
КБ-65	Полное откручивание гайки клеммного болта на три-четыре оборота для возможности дальнейшего ручного откручивания ее и быстрого снятия клеммы	Затяжка накрученной на несколько оборотов гайки клеммного болта крутящим моментом 250 Н·м
АРС-4	Одновременный поворот монорегуляторов с обеих сторон рельса в нейтральную позицию, при этом направление поворота должно быть в сторону от рельса	Одновременный поворот монорегуляторов, установленных в нейтральной позиции и ориентированных первой позицией к рельсу, в третью позицию, при этом направление поворота должно быть в сторону рельса
W-30	Откручивание шурупа на три оборота; сдвиг клеммы с подошвы рельса на 19 мм; затяжка шурупа крутящим моментом 50–100 Н·м	Откручивание шурупа на три оборота; сдвиг клеммы на подошву рельса на 19 мм; затяжка шурупа крутящим моментом 300–350 Н·м
ПФК-350	Сдвиг клеммы с прижимным изолятором с подошвы рельса на 30 мм	Сдвиг клеммы с прижимным изолятором на подошву рельса на 30 мм

Исходя из схожей кинематики элементов креплений при их переводе, предлагается три блока универсального оборудования для обслуживания креплений: блок гайковертов для работы со креплениями ЖБР-65, ЖБР-65Ш (ПШ, ПШМ, ПШР), КБ-65 и Фоссло W-30, блок перемещения клемм ЖБР-65, Фоссло и Пандрол, а также отдельный блок поворота монорегулятора АРС-4 (табл. 3). Предполагается установка всех трех блоков на еди-

ный модуль монтажа/демонтажа рельсовых креплений (МДС), при этом блоки оборудования имеют возможность наладки под требуемый тип крепления, а также эпюру шпал. Работа модуля осуществляется одновременно с двух сторон рельса обоих рельсовых нитей. Таким образом, благодаря созданию такого модуля можно добиться практически полной автоматизации процесса перевода креплений.

Таблица 3

Распределение воздействий на крепления различных типов

Тип крепления	Обеспечиваемое воздействие на крепление		
	Блок гайковертов	Блок перемещения клемм	Блок поворота монорегуляторов
ЖБР-65, ЖБР-65 Ш (ПШ, ПШМ, ПШР)	Откручивание гайки закладного болта или шурупа и их затяжка с необходимым моментом	Поднятие и сдвиг клеммы в монтажное или рабочее положение	–
КБ-65	Откручивание гайки клеммного болта и ее затяжка с необходимым моментом	–	–
Фоссло W-30	Откручивание шурупа и его затяжка с необходимым моментом	Сдвиг клеммы в монтажное или рабочее положение	–
Пандрол-350	–	Сдвиг клеммы с прижимным изолятором в монтажное или рабочее положение	–
АРС-4	–	–	Поворот монорегулятора из рабочего положения в нейтральное и из нейтрального в нужное положение в зависимости от требуемого усилия прижатия рельса

Методика исследования

С целью определения экономически рациональных границ производительности разрабатываемого модуля произведен расчет себестоимости единицы работ по монтажу/демонтажу креплений существующими методами с использованием известных механизмов.

Согласно методике, описанной в [14], себестоимость работ по монтажу/демонтажу креплений, осуществляемых вручную с применением механизированного инструмента, можно выразить формулой

$$C = \frac{Z_d + Z_{пл} + Z_{ог.с} + Z_{з.п}}{V_0}, \quad (1)$$

где Z_d – затраты на доставку монтеров пути к месту проведения работ и обратно, р.; $Z_{пл}$ – заработная плата монтеров за время работы, а также за время их доставки к месту работ и обратно, р.; $Z_{ог.с}$ – затраты, вызванные ограничением скоростей движения поездов по участку во время проведения подготовительных и заключительных работ, р.; $Z_{з.п}$ – расходы из-за простоя поездов во время работ, р., V_0 – объем работ, км.

Расходы на перевозку монтеров к месту работ и обратно [15]:

$$Z_d = 2A_{м.п}et_d + 2e_1L, \quad (2)$$

где $A_{м.п}$ – численность монтеров пути, выезжающих на место работ; e – часовая ставка монтера пути, р./ч; t_d – время следования рабочего поезда с базы к месту работ и обратно, ч; e_1 – себестоимость пассажиро-километра, р.; L – дальность перевозки монтеров от базы до места работ, км.

$$Z_{ог.с} = n_{пр}(d_1 + d_2), \quad (3)$$

где $n_{пр}$ – число поездов, проследовавших по участку работ за время действия предупреждения; d_1 – затраты из-за энергопотерь поезда во время торможения и разгона, р.; d_2 – затраты, связанные с потерей времени из-за задержки поезда, р.

$$n_{пр} = N_{max}t_{пр}/24, \quad (4)$$

где N_{max} – число пар поездов, проходящих по участку в сутки; $t_{пр}$ – продолжительность действия предупреждения, ч.

$$d_1 = 3,8\xi(P + Q)(v_x^2 - v_{пр}^2)10^{-6}, \quad (5)$$

где ξ – расходная ставка на 1 тыс. т·км механической работы локомотива, р., для электропоезда 40,00 р.; P – масса локомотива, т; Q – масса поезда брутто, т; v_x – скорость хода

поезда, км/ч; $v_{пр}$ – скорость, установленная предупреждением, км/ч.

$$d_2 = C_{п.ч}[(1/v_{пр} - 1/v_x)L_{пр} + \Delta t_T + \Delta t_p], \quad (6)$$

где $C_{п.ч}$ – стоимость часа простоя поезда, р.; $L_{пр}$ – длина участка, на котором действует предупреждение об ограничении скорости, км; $\Delta t_T, \Delta t_p$ – время на торможение и разгон поезда соответственно при изменении установленной скорости, для пассажирского поезда от $v_x = 100$ км/ч до $v_{пр} = 25 - 60$ км/ч – $\Delta t_T + \Delta t_p = 0,0254$ ч, для грузового поезда от $v_x = 65$ км/ч до $v_{пр} = 15 - 40$ км/ч – $\Delta t_T + \Delta t_p = 0,017$ ч.

$$L_{пр} = 2 \cdot 0,05 + L_o + L_{п}, \quad (7)$$

где 0,05 – расстояние от конца фронта работ до сигнала остановки, км; L_o – фронт работ, км; $L_{п}$ – длина поезда, км.

$$Z_{з.п} = П \cdot C_{п.ч}, \quad (8)$$

где $П$ – потери поезда-часов во время проведения работ.

При использовании свободного от ремонта пути для двухстороннего движения поездов на двухпутном участке потери поезда-часов выражаются формулой [15]

$$П = \left(\frac{t_o^2}{T_{пер}^2} \right) (T_{пер} - J_p) \times [1 + (T_{пер} - J_p)(J_p - J)], \quad (9)$$

где t_o – длительность работ, ч; $T_{пер}$ – период графика на временно двухпутном перегоне при двустороннем движении; J_p – расчетный интервал между поездами, ч; J – наименьший интервал между поездами, ч (при автоблокировке равен 0,167 ч).

$$J_p = 24 / N_{max}. \quad (10)$$

Себестоимость путевых работ, выполняемых с помощью специального подвижного состава, определяется зависимостью [13]

$$C_{ед} = \frac{\mathcal{E}}{H_v} + \frac{\Gamma}{T_{ч.н}H_v} + \frac{E}{V_o}, \quad (11)$$

где \mathcal{E} – текущие эксплуатационные затраты, р./маш.-ч; H_v – норма выработки, км/маш.-ч; Γ – годовые затраты (амортизационные отчисления), р./год; $T_{ч.н}$ – производительное время работы машины в течение года, маш.-ч/год; E – единовременные затраты, включающие затраты на перебазировку машины к месту работ, р.

$$\mathcal{E} = Z_{ГСМ} + Z_{пл.м} + Z_{ТО} + Z_{НР}, \quad (12)$$

где $Z_{ГСМ}$ – затраты на горюче-смазочные материалы за 1 маш.-ч работы машины, р./маш.-ч;

$Z_{пл.м}$ – заработная плата экипажа железнодорожно-строительной машины за 1 маш.-ч работы, р./маш.-ч; $Z_{ТО}$ – затраты на техническое обслуживание и ремонты, кроме капитального, включая заработную плату ремонтников и затраты на ремонтные материалы, р./маш.-ч; $Z_{НР}$ – накладные расходы в составе себестоимости, р./маш.-ч.

$$\Gamma = \frac{C_6 a}{100 T_{ч.н}}, \quad (13)$$

где C_6 – балансовая стоимость железнодорожно-строительной машины, р.; a – норма амортизации на полное восстановление, %.

$$E = Z_{пл.м}^{пер} + Z_{ГСМ}^{пер} + Z_{з.п}, \quad (14)$$

где $Z_{пл.м}^{пер}$ – заработная плата экипажа за время перебазировки, р.; $Z_{ГСМ}^{пер}$ – затраты на горюче-смазочные материалы за время перебазировки, р.

Так как ПМГ выполняет только откручивание или закручивание гаек креплений, а снятие или сдвигка клемм производится вручную, необходимо учесть затраты на выполнение работ монтерами пути. Тогда себестоимость работ с применением путевых моторных гайковертов можно рассчитать следующим образом:

$$C = \frac{\mathcal{E}}{H_v} + \frac{\Gamma}{T_{ч.н}H_v} + \frac{E + Z_d + Z_{пл}}{V_o}. \quad (15)$$

Для проведения расчетов были приняты следующие исходные данные:

- средняя дальность перебазировки техники к месту работ – 30 км;
- количество пар поездов, обращающихся по участку, – 40 пар поездов в сутки;
- балансовая стоимость разрабатываемого модуля МДС – 80 млн р.;
- производительное время работ модуля МДС – 500 маш.-ч/год;
- персонал модуля МДС – один машинист, два помощника машиниста;
- объем работ – от 1 до 10 км пути;
- участок пути – прямой двухпутный, эпюра шпал – 1 840 шп./км.

Результаты исследования

Расчет себестоимости работ для модуля МДС производился с неизменными технико-экономическими параметрами, но с изменением значений производительности. Графики зависимости себестоимости единицы работ по монтажу и демонтажу креплений модулем МДС представлены на рис. 8. Сопоставив результаты

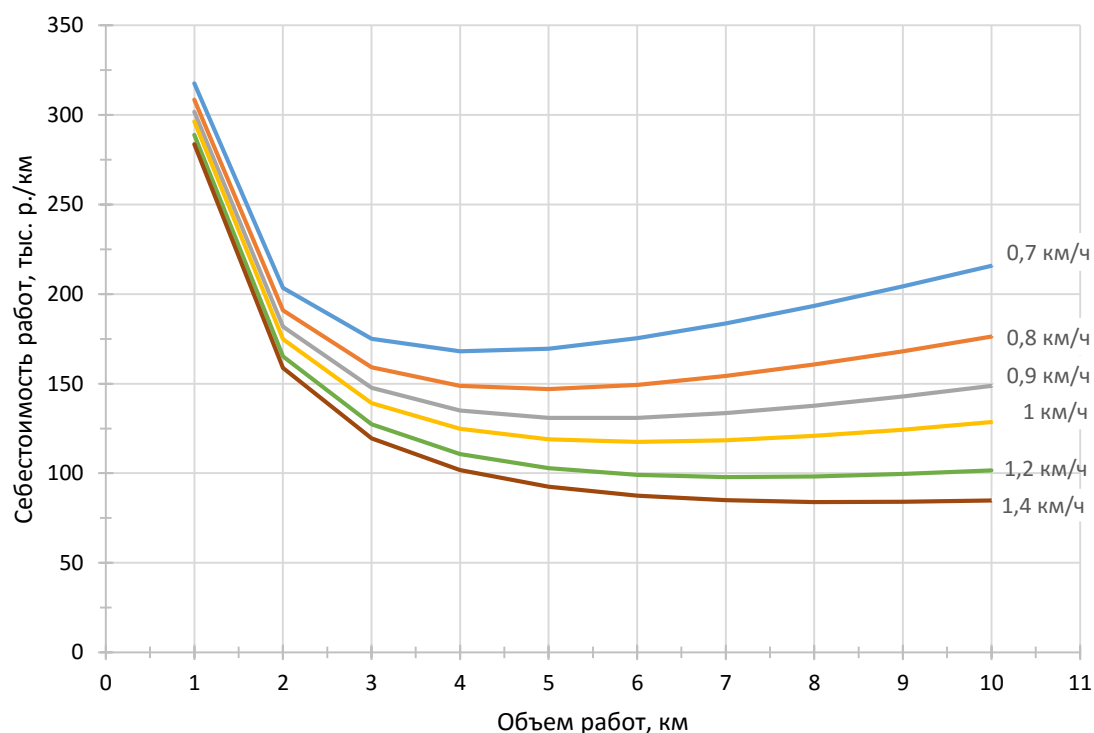


Рис. 8. Себестоимость выполнения единицы работ по переводу при различной производительности модуля МДС

расчетов для модуля МДС при разной производительности с результатами расчетов для применяемых машин и механизмов для перевода скреплений, можно выявить рациональную производительность предлагаемого модуля. Расчеты для ручных методов перевода производились с учетом раскрепления (закрепления) каждой второй шпалы при подготовительных работах до «окна» и заключительных работах после «окна». Расчет механизированного способа велся с учетом использования двух машин ПМГ: одна машина – для откручивания гаек скреплений, вторая – для закручивания. На рис. 9 показаны графики зависимости себестоимости технологий перевода скреплений типа ЖБР-65 и КБ-65 с использованием ручного инструмента и средств малой механизации (ручной перевод), машины ПМГ (частично механизированный перевод) и предлагаемого модуля МДС (полностью механизированный перевод). На рис. 10 представлены графики зависимости себестоимости перевода скреплений типа W-30, ЖБР-65Ш (и его модификаций), ПФК-350 и АРС-4 ручным способом и полностью механизированным способом с использованием модуля МДС.

Анализ представленных зависимостей показывает, что для заданных условий перевод скреплений типа КБ-65 и ЖБР-65 на участке пути протяженностью до 3,2 км целесообразнее выполнять вручную, свыше данного фронта работ экономически выгоднее применять ПМГ для откручивания гаек скреплений. Значительный рост себестоимости единицы работ при ручном способе перевода вызван прежде всего затратами на ограничение скорости поездов и затратами на предоставление «окна», которые в свою очередь объясняются низкой производительностью ручного труда.

Более высокая себестоимость работ по переводу скреплений типа АРС-4 и ПФК-350 продиктована изначально более высокими трудовыми затратами на их перевод, так как требуется большое количество монтеров пути и, следовательно, большие расходы на их заработную плату и доставку к месту работ.

Из рис. 8 видно, что с увеличением производительности модуля МДС график становится более пологим, т. е. прирост затрат к себестоимости 1 км работ с увеличением фронта работ уменьшается. Из сопоставления результатов

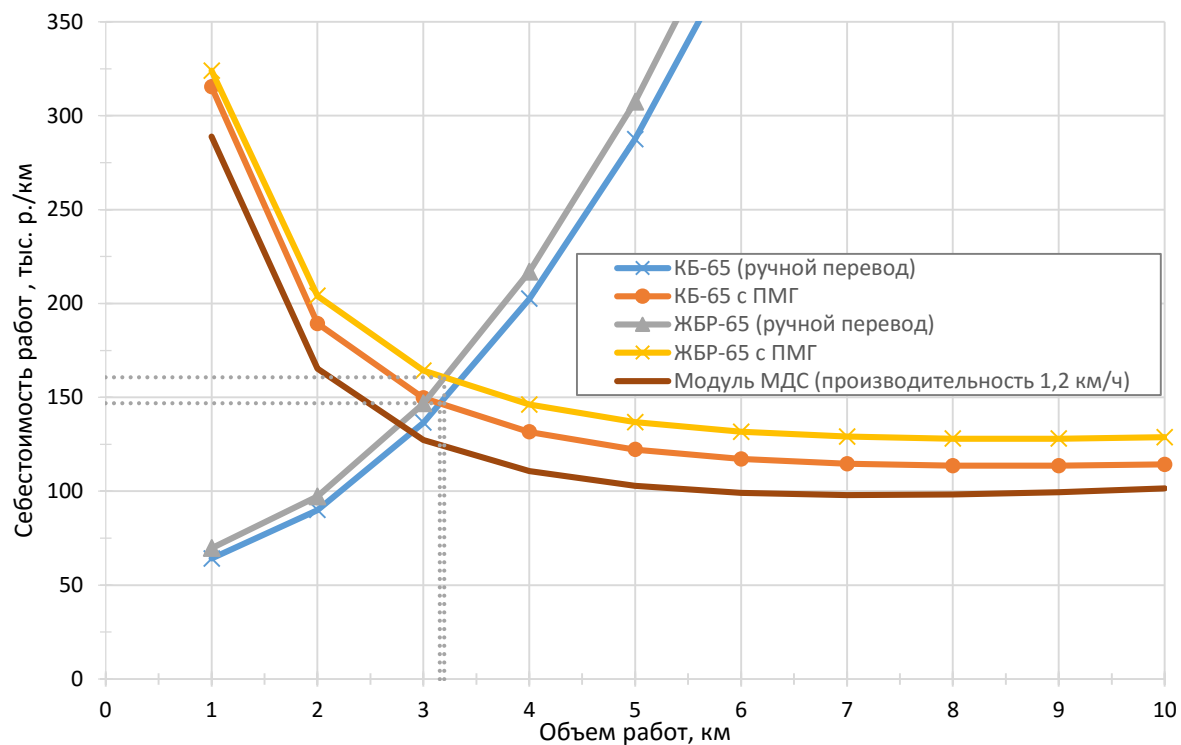


Рис. 9. Зависимость себестоимости единицы работ по переводу скреплений ЖБР-65 и КБ-65 от объема работ

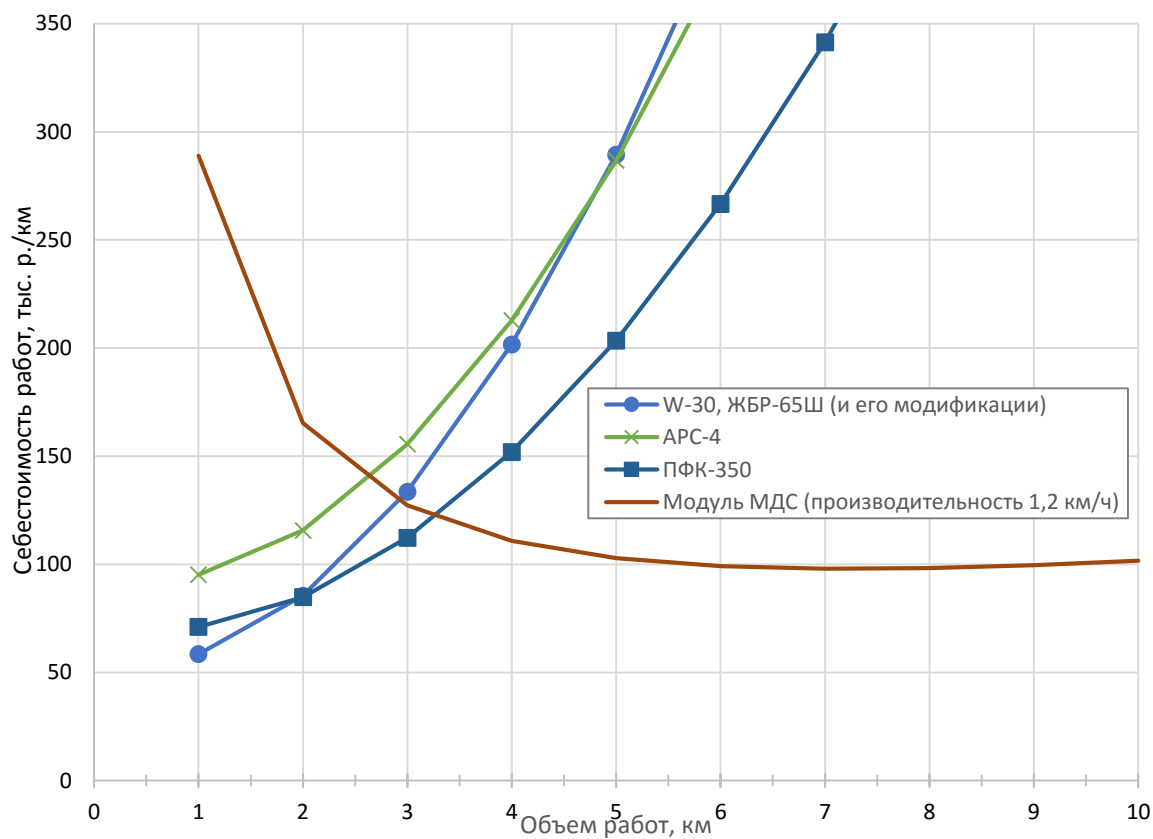


Рис. 10. Зависимость себестоимости единицы работ по переводу скреплений W-30, ЖБР-65Ш (и его модификаций), АРС-4 и ПФК-350 от объема работ

расчетов себестоимости единицы работ, выполняемых существующими методами и механизмами и выполняемых модулем МДС при разной производительности, можно сделать вывод, что экономически рациональная производительность должна превышать 1,2 км/ч.

Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Монтаж и демонтаж промежуточных рельсовых креплений представляют собой самые трудоемкие операции в текущих технологических процессах работ по укладке, ремонту и текущему содержанию бесстыкового пути, требующие значительного объема ручного труда.

2. Постоянно растущие объемы путевых работ на бесстыковом пути, разнообразие промежуточных креплений на нем, а также современные тенденции укладки сверхдлинных плетей обосновывают актуальность создания универсальной высокопроизводительной машины для обслуживания креплений. Существующие машины и механизмы для обслуживания креплений имеют малую производи-

тельность и, как правило, требуют непосредственного участия монтеров пути в процессе монтажа/демонтажа креплений.

3. По каждому типу креплений разработаны схемы перевода в монтажное/рабочее положение с указанием требуемых перемещений элементов. Предложен вариант реализации универсальных механизмов, позволяющих автоматизировать операции по переводу креплений различных типов.

4. Автоматизация операций процесса перевода креплений позволит минимизировать ручной труд монтеров пути, а повышенная производительность модуля МДС – снизить себестоимость работ. Результаты расчетов показывают, что с экономической точки зрения производительность такой машины должна быть не менее 1,2 км/ч.

5. Анализ эффективности текущих методов перевода показал, что путевой моторный гайковерт целесообразно использовать при фронте работ свыше 3,2 км, при объеме работ ниже 3,2 км на креплениях типа ЖБР-65 и КБ-65 эффективнее осуществлять перевод вручную с применением механизированного инструмента.

Список источников

1. Кузнецова Н. В., Сидорова Е. А. Особенности влияния промежуточных рельсовых креплений на эксплуатационную стойкость рельсов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80, № 4. С. 201–208.
2. Карпущенко Н. И., Труханов П. С. Оценка надежности и рациональные сферы применения основных типов промежуточных рельсовых креплений для железобетонных шпал // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 1. С. 557–562.
3. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р. Москва, 2016. 176 с.
4. Типовые отраслевые нормы времени на работы, выполняемые специализированными строительными и ремонтными организациями на железнодорожных путях общего и необщего пользования : утверждены приказом Минтранса России от 10.08.2021 № 268. Москва : Минтранс России, 2021. 1786 с.
5. Шубин А. А., Витчук П. В., Ромашов В. В. Комплекс для работ с железнодорожными анкерными рельсовыми креплениями «Пандрол» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 7. С. 84–93.
6. Прокопенко О. С. Эксплуатация рельсовых креплений на сети и новые разработки // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 2. С. 12–16.
7. Теклин В. Г., Рисиик Н. Б., Деревенец А. Н. Путевой моторный гайковерт : учебное пособие. Москва : Учебно-методический кабинет по образованию на железнодорожном транспорте МПС РФ, 1996. 314 с.
8. Машины для смены рельсовых плетей // Группа ПТК : [сайт]. URL: <https://tulazdm.ru/ms-700t> (дата обращения: 21.07.2023).
9. Лебедев А. В., Петров А. В. Средства механизации и автоматизации работ по сборке, укладке и эксплуатации рельсошпальной решетки с анкерным рельсовым креплением Пандрол-350 // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство : материалы 6-й научно-практической конференции с международным участием. Москва : Агентство интеллектуальной собственности на транспорте, 2013. С. 35–39.

10. Инструкция на сборку, укладку и эксплуатацию пути с анкерным рельсовым скреплением ПАНДРОЛ-350 на железобетонных шпалах : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 12.11.2012 № 2270р. Москва, 2012. 12 с.
11. Инструкция на сборку, укладку и эксплуатацию пути с промежуточным рельсовым скреплением типа W 30 на железобетонных шпалах : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 31.01.2014 № 225р. Москва, 2014. 14 с.
12. Инструкция на сборку, укладку и эксплуатацию пути с различными модификациями рельсового скрепления ЖБР на железобетонных шпалах : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 23.08.2013 № 1815р. Москва, 2013. 38 с.
13. Инструкция на сборку, укладку, эксплуатацию и ремонт пути с бесподкладочным рельсовым скреплением АРС на железобетонных шпалах : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 31.12.2013 № 2986р. Москва, 2013. 13 с.
14. Ильиных А. С., Ядрошникова Г. Г., Галай М. С. Оценка эффективности применения инновационной путевой техники при ремонте и содержании железнодорожного пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3 (42). С. 19–25.
15. Волков Б. А., Шульга В. Я., Кокин М. В. Экономика железнодорожного строительства и путевого хозяйства : учебник / под общей редакцией Б. А. Волкова, В. Я. Шульги. Москва : Маршрут, 2003. 632 с.

References

1. Kuznetsova N. V., Sidorova E. A. Features of the influence of intermediate rail fastenings on the operational durability of rails. *Bulletin of the Research Institute of Railway Transport*. 2021;80(4):201–208. (In Russ.).
2. Karpushchenko N. I., Trukhanov P. S. Reliability assessment and rational application areas of the main types of intermediate rail fastenings for reinforced concrete sleepers. *Transport Infrastructure of Siberian Region*. 2019;1:557–562. (In Russ.).
3. Instructions for the device, laying, maintenance and repair of a continuously welded rail track. Approved by Russian Railways No. 2544r dated December 14, 2016. Moscow; 2016. 176 p. (In Russ.).
4. Typical industry norms of time for work performed by specialized construction and repair organizations on public and non-public railway tracks. Approved by order of Ministry of Transport of Russia No. 268 dated August 10, 2021. Moscow: Ministry of Transport of Russia; 2021. 1786 p. (In Russ.).
5. Shubin A. A., Vitchuk P. V., Romashov V. V. Complex for works with railway anchor rail fastenings Pandrol. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2019;(7):84–93. (In Russ.).
6. Prokopenko O. S. Operation of rail fastenings on the network and new developments. *Track and Track Facilities*. 2023;(2):12–16. (In Russ.).
7. Teklin V. G., Risiik N. B., Derevenets A. N. Track motor wrench: textbook. Moscow: Training and Methodical Cabinet for Education on Railway Transport of the Ministry of Railway Transport of the Russian Federation; 1996. 314 p. (In Russ.).
8. Machines for changing of rail spurs. *PTK Group: [site]*. (In Russ.). URL: <https://tulazdm.ru/ms-700t>.
9. Lebedev A. V., Petrov A. V. Means of mechanization and automation of works on assembly, laying and operation of a rail-tie with anchor rail fastening Pandrol-350. Implementation of modern designs and advanced technologies in track facilities. *Proceedings of the 6th Scientific and Practical Conference with International Participation*. Moscow: Agency of intellectual property on transport; 2013. P. 35–39. (In Russ.).
10. Instruction for assembly, laying and operation of track with anchor rail fastening PANDROL-350 on reinforced concrete sleepers. Approved by order of Russian Railways No. 2270r dated November 12, 2012. Moscow; 2012. 12 p. (In Russ.).
11. Instruction for the assembly, laying and operation of track with intermediate rail fasteners type W 30 on reinforced concrete sleepers. Approved by order of Russian Railways No. 225r dated January 31, 2014. Moscow; 2014. 14 p. (In Russ.).
12. Instruction for the assembly, laying and operation of track with various modifications of the ZBR rail fastening on reinforced concrete sleepers. Approved by order of Russian Railways No. 1815r dated August 23, 2013. Moscow; 2013. 38 p. (In Russ.).
13. Instruction for the assembly, laying, operation and repair of the track with ARS non-lining rail fastening on reinforced concrete sleepers. Approved by order of Russian Railways No. 2986r dated December 31, 2013. Moscow; 2013. 13 p. (In Russ.).
14. Ilinykh A. S., Yadroshnikova G. G., Galay M. S. The Application of the Innovative Track Equipment Effectiveness Evaluation in the Railway Track Repair and Maintenance. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2017;(42):19–25. (In Russ.).

15. Volkov B. A., Shulga V. Ya., Kokin M. V. Economics of railway construction and track facilities: textbook. Under the general editorship of B. A. Volkov, V. Ya. Shulga. Moscow: Marshrut; 2003. 632 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

А. А. Войченко – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. S. Ilinykh – Professor of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

A. A. Voychenko – Post-graduate Student of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 28.10.2023; одобрена после рецензирования 14.11.2023; принята к публикации 19.01.2024.

The article was submitted 28.10.2023; approved after reviewing 14.11.2023; accepted for publication 19.01.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 625.17:528.48
doi 10.52170/1815-9265_2024_68_73

Создание цифровой модели железнодорожного пути с использованием беспилотных летательных аппаратов

Егор Николаевич Тимофеев^{1✉}, Александр Александрович Севостьянов²,
Алексей Валерьевич Сокольников³

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

³ Центр диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры – структурное подразделение Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры – филиал ОАО «РЖД», Новосибирск, Россия

¹ egtini@vk.com ✉

² seva2233@yandex.ru

³ rcdm_sokolnikovav@wsr.ru

Аннотация. Основные задачи, поставленные Правительством РФ в области устойчивого развития России до 2030 года, требуют амбициозных и согласованных действий на национальном, региональном и глобальном уровнях. Например, можно отметить стратегию холдинга ОАО «РЖД» в рамках цифровой трансформации, разработанную на основе национальной программы «Цифровая экономика». Сегодня компания представляет несколько инициативных платформ, которые должны перевести весь холдинг на новый цифровой уровень. Одной из главных составляющих цифровизации железнодорожного транспорта является цифровая модель железной дороги. В данной работе рассмотрен один из вариантов создания цифровой модели железнодорожного пути с применением беспилотного летательного аппарата, который был использован при выполнении дипломного проекта по заказу Новосибирского центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры. В статье обоснована актуальность использования беспилотных летательных аппаратов и описаны основные способы построения цифровой модели с точки зрения геодезического обеспечения. Также рассмотрены основные программные продукты для обработки результатов съемки. Для систематизации процесса создания цифровой модели железнодорожного пути разработан алгоритм, который определяет порядок действий работников на этапах съемки местности, обработки полученных материалов, а также наполнения базы данных цифровой модели. В заключение указаны дальнейшие перспективы работы с цифровой моделью в части ее наполнения данными из информационных систем, которые используются в структурных подразделениях дирекции инфраструктуры, а также при решении задач по техническому обслуживанию железнодорожного пути.

Ключевые слова: цифровая модель железной дороги, проверка состояния инфраструктуры, беспилотный летательный аппарат, капитальный ремонт, расширение спектра исходной информации

Для цитирования: Тимофеев Е. Н., Севостьянов А. А., Сокольников А. В. Создание цифровой модели железнодорожного пути с использованием беспилотных летательных аппаратов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 73–82. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_73.

TRANSPORT

Original article

Prospects for using a digital model of the railway track in the planning and organization of work

Egor N. Timofeev^{1✉}, Alexander A. Sevostyanov², Alexey V. Sokolnikov³

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

³ Centre for Diagnostics and Monitoring of Infrastructure Devices, Structural Subdivision of the West Siberian Infrastructure Directorate – Branch of Russian Railways, Novosibirsk, Russia

¹ egtini@vk.com ✉

² seva2233@yandex.ru

³ rcdm_sokolnikovav@wsr.ru

Abstract. The main objectives set by the Russian government for Russia's sustainable development until 2030 now require ambitious and concerted action at the national, regional and global levels. For example, we can mention the strategy of the Russian Railways holding company within the framework of the Digital Transformation developed

on the basis of the national Digital Economy programme. Today, the company is presenting several initiative platforms that should take the entire holding company to the new digital level. One of the main components of the direction of digitalization of railway transport is the digital railway model. This paper considers one of the options for creating a digital model of the railway track using an unmanned aerial vehicle, which was used in a graduation project commissioned by the Novosibirsk Centre for Diagnostics and Monitoring of Infrastructure Devices. The article describes the relevance of using unmanned aerial vehicles and the main ways of building a digital model in terms of geodetic support. The main software products for processing of survey results are also considered. In order to systematize the process of creation of digital model of railway track the algorithm has been worked out which defines the order of activities during the stage of terrain survey, processing of the received data and filling the data base of digital model. The conclusion shows the future prospects of work with the digital model in terms of its filling with information from information systems that are used in the structural subdivisions of the Infrastructure Directorate and the prospects of using the digital model in solving tasks of railway track maintenance.

Keywords: digital railway model, infrastructure verification, unmanned aerial vehicle, overhaul, broadening the range of baseline information

For citation: Timofeev E. N., Sevostyanov A. A., Sokolnikov A. V. Prospects for using a digital model of the railway track in the planning and organization of work. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):73–82. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_73.

Введение

Активное развитие цифровых систем в науке и технике позволяет улучшать качество и эффективность производства. В сфере железнодорожного транспорта основные разработки направлены на выявление и сокращение узких мест в работе железнодорожной сети, вводится новая система для сбора, обработки и хранения координатной информации об объектах инфраструктуры и подвижном составе железнодорожного транспорта. В рамках этой системы реализуется высокоточная база пространственных данных и цифровых моделей пути. Своевременное обновление данных о фактическом состоянии объектов инфраструктуры железнодорожного пути позволяет предупреждать отказы технических средств, а накопление базы данных дает возможность осуществлять предиктивный анализ, что обеспечит переход технического обслуживания на новый уровень.

В настоящее время в области путевого хозяйства ведутся активные исследования по применению цифровых инструментов для повышения эффективности технического обслуживания пути как в части планирования [1, 2], так и в части организации технологических процессов [3, 4].

В свою очередь, стоит отметить, что создание цифровых моделей в рамках железнодорожного транспорта – достаточно сложная и многоуровневая задача, требующая междисциплинарного подхода. В настоящее время одним из доступных методов создания цифровой модели является использование результатов топографической съемки высокой детализации, дополненной актуальными данными из информационных

систем. Такой подход позволяет получить высококачественные данные для создания цифровой модели, что обеспечивает адекватность и достоверность информации.

Коммерческое использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в последние годы набирает популярность благодаря их эффективности как за счет оперативности съемки и (при наличии достаточного технического оснащения) исполнения камеральной обработки, так и за счет развития программного обеспечения. Помимо этого, стоит отметить активный рост использования применения БПЛА во всех сферах деятельности. В части решения производственных задач эффективность применения БПЛА в равной степени зависит как от профессиональных компетенций оператора, так и от технических, организационных, правовых факторов.

В данной статье представлены результаты работы по созданию цифровой модели железнодорожного пути с использованием БПЛА совместно с Новосибирским центром диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры в рамках выполнения дипломного проекта (гранта Западно-Сибирской железной дороги).

Материалы и методы исследования

Технология лазерного сканирования хорошо известна как надежный и точный метод создания облаков точек с высоким разрешением, но она имеет ограничения при получении спектральных характеристик объектов, а также требует использования дорогостоящего оборудования. В свою очередь, фотограмметрические методы создания облаков точек очень экономичны, облака могут создаваться и обрабатываться

с использованием различных типов камер и программного обеспечения. Однако для достижения трехмерных данных нужны вычислительные процессы, снижающие их автоматизацию. Также проблематично применение в тенистых и темных местах. Сегодня использование БПЛА является одним из методов, принятых экспертами для получения точных, качественных и быстрых картографических данных. В последние годы данный инструмент находит применение в отраслях газовой и нефтяной промышленности с целью мониторинга и создания цифровой модели сетей трубопроводов, фотограмметрические облака точек используются в различных приложениях для моделирования и реконструкции. Данная технология позволяет управлять проектами картографирования железных дорог из-за пределов железнодорожной зоны, что не влияет на график движения поездов.

Геодезическое обеспечение БПЛА играет важную роль в решении различных задач, связанных с изучением и мониторингом земной поверхности [5]. Оно обеспечивает точность и надежность навигации и ориентации БПЛА, что позволяет получать высококачественные данные для анализа и принятия решений.

Результатом обработки данных съемки с помощью БПЛА являются цифровые модели местности (ЦММ), по которым на железных дорогах получают информацию о положении рельсовых путей и междупутном расстоянии, определяют габариты приближения строений, выполняют построение продольных и поперечных профилей.

Для того чтобы получить ЦММ с высокой точностью, необходимо использовать опорные и контрольные точки, равномерно распределенные вдоль участка работ. Для этого могут использоваться точки оси пути, измеряемые в процессе движения аппаратно-программного комплекса (АПК) «Профиль-М» [6]. Для внешнего ориентирования ЦММ используются точки оси железнодорожного пути, расположенные напротив характерных объектов: светофоров, пикетных и километровых столбов, изостыков рельсов, опорных сооружений. Ориентирование выполняется в два этапа:

1. Выбор опорных точек: сначала нужно выбрать опорные точки, которые будут использоваться при съемке. Опорные точки

должны быть четко видны на карте или на местности и иметь ярко выраженные контуры.

2. Привязка к опорным точкам: после съемки нужно обработать данные и привязать изображения к опорным точкам. Для этого используются специальные программы, которые учитывают геодезические координаты и ориентацию БПЛА в пространстве.

При данном способе возможны значительные ошибки внешнего ориентирования точечной модели по сравнению с размерами пикселя ортофотоплана. Это связано с тем, что положение характерных опорных и контрольных точек на оси выбирается глазомерным способом как в процессе полевых измерений с помощью АПК «Профиль-М» (точка пересечения перпендикуляра, опущенного от характерного объекта до оси пути), так и по цифровым снимкам в ПК PhotoScan.

Следующий способ построения цифровой модели местности основан на использовании РТК (кинематика реального времени), при котором осуществляется определение координат в режиме реального времени с высокой точностью. Для этого используется специальное оборудование, которое состоит из приемника GPS (глобальной системы позиционирования) и передатчика. Приемник получает сигналы от спутников и вычисляет текущее местоположение. Передатчик отправляет эту информацию на базовую станцию, которая проводит обработку данных и отправляет информацию на рабочие приемники. Они получают информацию от базовой станции и мгновенно определяют свое местоположение с высокой точностью, принципиальная схема устройства представлена на рис. 1.

РТК и привязка к опорным точкам – это два основных способа получения координат точек на земной поверхности. Но есть важное отличие между ними: РТК позволяет получать координаты точек в режиме реального времени, что делает этот метод особенно полезным для широкого круга сфер деятельности. При этом достигается высокая точность измерений – до нескольких миллиметров. А при использовании метода привязки к опорным точкам необходимо предварительно знать координаты опорных точек.

В результате съемки БПЛА с привязкой к опорным точкам получается точное и высококачественное изображение местности. Стоит

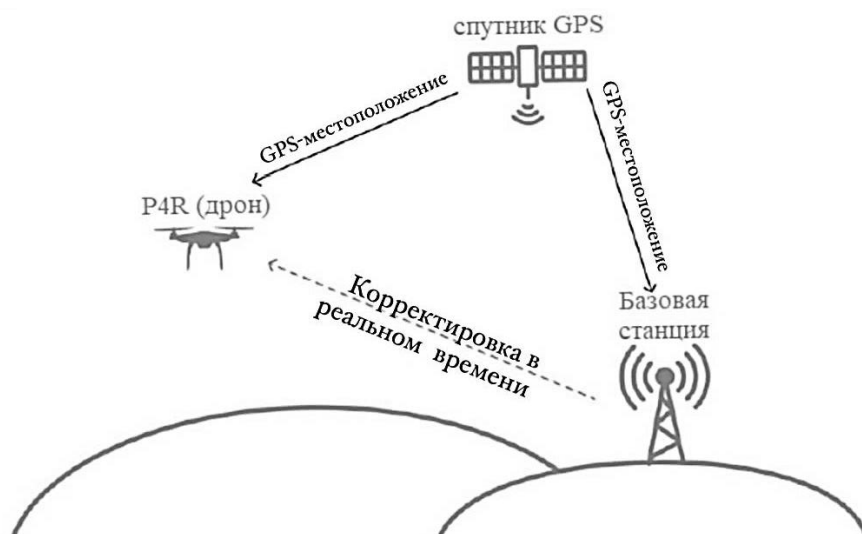


Рис. 1. Принципиальная схема RTK

отметить, что сегодня существует множество программ для создания трехмерной фотограмметрии, а именно: DroneDeploy, Pix4Dmapper, Maps Made Easy, RECAP, Phtomod, Agisoft PhotoScan и др. Каждая программа обладает уникальным спектром инструментов и возможностей, включая особенности сопряжения с программным обеспечением БПЛА.

Прогнозы роста рынка БПЛА указывают на огромный потенциал их применения в железнодорожной отрасли [7]. Кроме того, разработка автономных БПЛА, оснащенных технологией искусственного интеллекта, предоставит значительные возможности для сокращения обслуживающего персонала, затрат, времени и рисков. Сегодня у БПЛА есть и другие преимущества [8], которые делают их эффективными в использовании, в том числе для удаленного сбора данных, снижения влияния человеческого фактора, обеспечения высокой скорости осмотра.

В рамках исследований по созданию цифровой модели железной дороги разработан патент [9], в котором раскрыт способ построения трехмерной модели местности вдоль полотна железнодорожного пути одновременно с плановой аэрофотосъемкой и воздушным лазерным сканированием для получения цифровых аэрофотоснимков и дальнейшей коррекции массива точек.

Целью настоящего исследования является съемка и моделирование железнодорожного

пути в границах полосы отвода с использованием цветного облака точек, полученного фотограмметрическим методом [10]. Благодаря возможности захвата изображений с большим перекрытием и на значительных высотах БПЛА позволяют создавать плотные облака точек высокого разрешения при использовании алгоритма структуры их движения [11]. Этот алгоритм идентифицирует и сопоставляет ключевые точки в области перекрытия в каждой паре изображений, полученных из области исследования. Затем с помощью итеративного алгоритма уравнивания пучков вычисляются параметры взаимной ориентации камер, после чего создается разреженное облако точек.

Для участка исследования был выбран километр железнодорожного пути в направлении И–Ж. Съемка была выполнена совместно с квалифицированным оператором Новосибирского центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктур, заранее был определен период наиболее оптимального выполнения съемки, а именно при уменьшенном влиянии атмосферных факторов, и определен сезон – после выпадения первого снега. С технической точки зрения съемка выполнялась с помощью беспилотного дрона DJI Phantom 4 с применением приемника RTK, позволяющего уменьшать нарушения, связанные с шумом от атмосферной неоднородности или движущихся объектов. Высота полета составляла 50 м. Проекция расстояния съемки на плоскость изображений для

сгенерированного облака точек составляет около 15 м. Сначала ключевые точки идентифицируются и сопоставляются с использованием оператора масштабно-инвариантного преобразования признаков в перекрывающихся частях изображений, затем выполняется относительная ориентация изображений. Эти шаги выполняются с помощью программного пакета Agisoft PhotoScan.

Анализируя тестовый участок, удалось установить идентификацию поперечного профиля железнодорожного пути. На исследуемом участке есть три отдельных вида профиля: выемка, насыпь с устроенным банкетом и нулевое место, где расположена остановочная платформа, – все они расположены в непосредственной близости. Отображаемые данные позволяют заключить, что величина погрешности находится в пределах допустимого значения: порядка 8 см для дальнейшего выполнения работ.

Результаты исследования

В результате исследования был разработан алгоритм создания цифровой модели, который нужен для систематизации процесса создания трехмерной модели железнодорожного пути в компьютерной среде [12]. Он представляет собой последовательность действий, которые необходимо выполнить для получения точной и качественной цифровой модели.

Создание цифровой модели включает в себя различные этапы, такие как сбор данных, их обработка для получения точной геометрической модели, настройка параметров моделирования, визуализация и тестирование модели местности (пути).

Каждый этап имеет свои задачи, методы и инструменты, которые используются для выполнения определенных операций. На рис. 2 представлен алгоритм создания цифровой модели.

После получения задания на облет объекта инфраструктуры от начальника инженерно-гео-

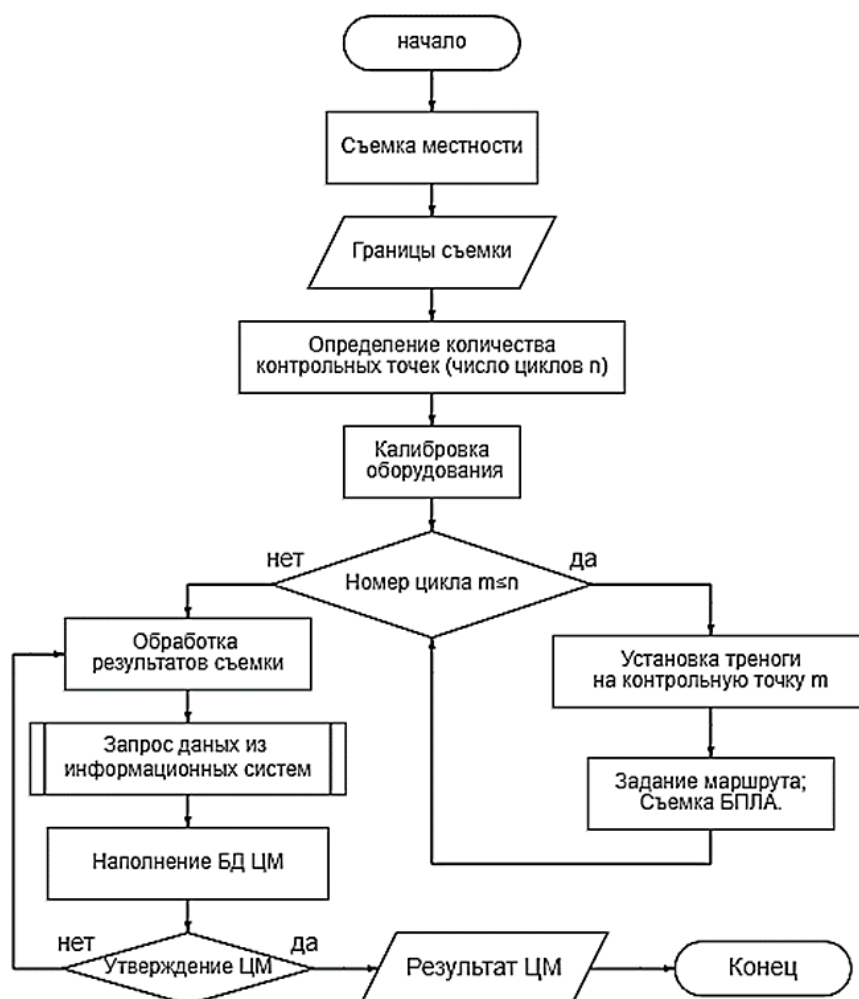


Рис. 2. Алгоритм создания цифровой модели

логической базы специалист разрабатывает план работ, который содержит информацию о цели полета БПЛА, временных рамках, номере борта, составе аппаратуры, полезной нагрузке, требуемой для получения качественных данных высоте полета, маршруте движения. Для выполнения работ специалист собирает имеющуюся по предыдущим осмотрам и замерам на объекте информацию и подготавливает ведомости для полевых записей.

Для того чтобы оценить трудоемкость работ, особенности и специфику, рассмотрим методику воплощения. Перед началом использования БПЛА для съемки необходимо определить потенциальные контрольные точки на местности, на которые может потребоваться переместить базовую станцию. Это нужно для обеспечения более точного и качественного съемочного процесса в указанных точках относительной позиции БПЛА и места съемки, а также для увеличения точности трансформирования полученных данных. Поэтому оператор БПЛА должен предварительно определить такие точки и обеспечить перестановку базовой станции в необходимые моменты.

Также стоит заметить, что на расстоянии от базовой станции снижается точность измерений позиционирования, поэтому рекомендуется использовать РТК в пределах 5–7 км от базовой станции.

Для обеспечения связи необходимо установить ровер (приемник) на площадке взлета, подключить его к базовой станции посредством беспроводной связи, запустить и настроить его в соответствии с требуемым проектом. Проверить точность установленной привязки РТК с помощью программ и тестовых данных, после чего можно начинать работу по сбору данных в режиме РТК.

Открыть приложение DJI GO 4 на своем смартфоне или планшете и подключиться к дрону. В меню калибровки выбрать опцию «Датчики», а затем функцию «Компас». Следуя инструкциям в приложении, завершить процесс калибровки компаса. Обычно это требует вращения дрона вдоль трех осей. Затем перейти к калибровке гироскопа, следуя тем же инструкциям в приложении DJI GO 4. После завершения калибровки перезапустить БПЛА и проверить его работу в ограниченной области.

Для установки привязки РТК необходимо определить точку установки: выбрать место, где будет стоять базовая станция (на высоком месте, на открытом пространстве без высоких зданий или деревьев в непосредственной близости). Установить базовую станцию (обычно она устанавливается на специальном штативе) и подключить к ней питание. Подключить антенну приемника ГНСС к базовой станции. Настроить базовую станцию: запустить программное обеспечение на манипуляторе и настроить параметры базовой станции в соответствии с требованиями проекта.

Для начала съемок в приложении DJI GO следует установить точки старта и окончания полета на карте. Настроить параметры камеры (режим фотосъемки, формат и разрешение изображений). Запустить автономный полет с помощью функции «Планирование полета» приложения DJI GO. Во время полета следует контролировать работу камеры и перерывы между снимками. По окончании полета снять DJI Phantom 4 на точке финиша. На рис. 3 представлен пример исполнительной съемки. Затем необходимо проверить качество изображений и скачать их на компьютер или другое устройство для дальнейшей обработки.

После того как съемка выполнена, необходимо перейти к следующему этапу, который предполагает обработку данных в специализированном программном обеспечении для создания цифровой модели рельефа (рис. 4).

Для дальнейшего использования цифровой модели железнодорожного пути необходимо заполнить ее информационной базой. С этой целью требуется выполнить запрос в сторонние информационные базы данных объектов инфраструктуры. Это позволит получить необходимую информацию о состоянии дороги, рельсов, мостов, переездов, тоннелей, других элементов инфраструктуры и о иных важных параметрах железнодорожной инфраструктуры. Полученные данные будут использованы для дальнейшего улучшения цифровой модели и обеспечения ее точности и полноты.

После успешного наполнения цифровой модели базой данных, полученной из сторонних систем, например из Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой в случае дистанции пути, следует осуществить утверждение полученной модели.



Рис. 3. Исполнительная съемка на участке исследования:
а – калибровка дрона; *б* – установка привязки; *в* – построение маршрута

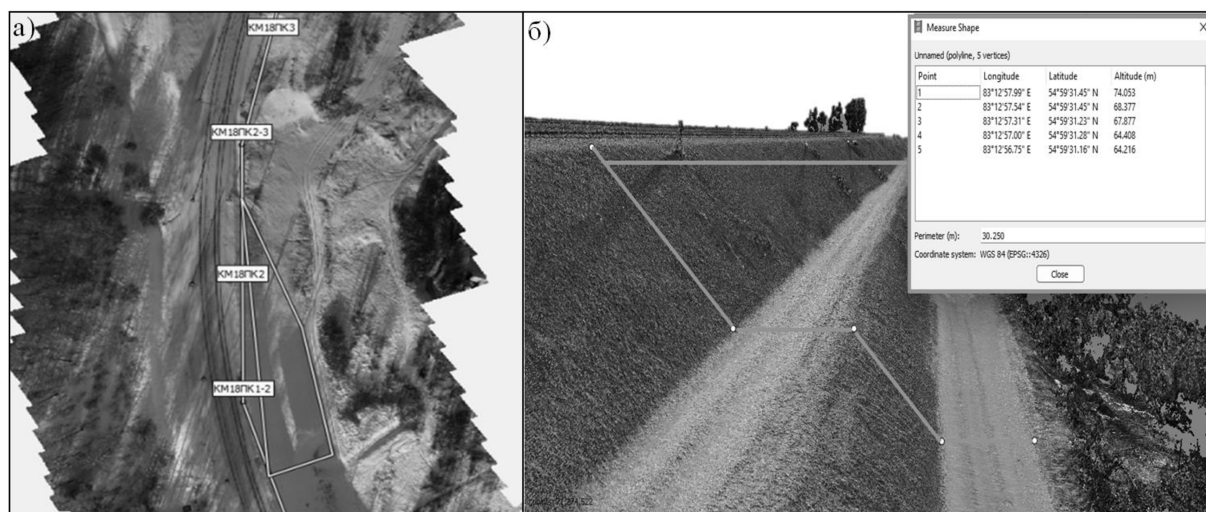


Рис. 4. Цифровая модель участка железнодорожного пути:
а – привязка к пикетажу; *б* – контроль геометрических параметров земельного полотна

Это необходимо для исключения неточностей и проверки корректности предоставленной информации, а также для обеспечения ее соответствия требованиям и стандартам, установленным в данной организации. В случае возникновения ошибок или несоответствия данных ответственный работник дистанции пути (начальник технического отдела, главный инженер) может предоставить дополнительную информацию или запретить использование цифровой модели до ее устранения.

Выводы

По результатам выполненного исследования можно заключить, что использование БПЛА для получения цифровой модели железной дороги является перспективным. Формирование цифровой модели железной дороги проводилось посредством использования облака точек, полученного с помощью данных БПЛА и их обработки фотограмметрическими методами.

В свою очередь, необходимо отметить проблемные места использования БПЛА для построения цифровой модели железнодорожного пути. Из-за характера сбора данных БПЛА не производят данные более высокого качества, чем наземные лазерные сканеры при захвате деталей и бокового вида рельсов. Кроме того, в условиях эксплуатации железнодорожного пути для его съемки с высоким разрешением на местности требуются полеты на малой высоте, что достаточно проблематично на участках с высокой интенсивностью движения. Также стоит отметить, что эффективность модели БПЛА, используемой в тестовой съемке, ограничена работой аккумуляторной батареи (20–30 мин), что увеличивает общую сложность и продолжительность выполняемых работ.

Авторами предложен алгоритм создания цифровой модели через систематизированный рабочий процесс оператора, что считается актуальным с учетом растущего интереса к данному виду деятельности. Однако необходимы дальнейшие исследования для оптимизации алгоритма и учета вероятностных событий по-

сле его апробации на реальной цифровой модели, чтобы создание цифровых моделей стало более точным и эффективным процессом. Такой подход может привести к развитию более продвинутых методов, которые способны оптимизировать эффективность и точность работы оператора. Кроме того, результаты исследований могут использоваться в дальнейшем для разработки других методов в области создания цифровых моделей, что повысит их применение в различных инженерно-геодезических видах работ.

С использованием полученной цифровой модели возможно осуществлять более оперативный анализ участка железнодорожного пути, что позволит выполнять оценку состояния характерных узких мест и производить более детальный анализ изменения ситуации на участке во время периодического обновления базы данных. Такой анализ участка железнодорожного пути можно использовать, чтобы контролировать и улучшать процессы, связанные с безопасностью движения поездов и обслуживанием пути. Оперативное реагирование на изменения в штате железнодорожных предприятий может поддерживать высокий уровень безопасности и производительности пути. Полученная цифровая модель облегчает работу инженеров над анализом железнодорожных путей и их оптимизацией, тем самым обеспечивая более эффективную и безопасную транспортировку грузов и пассажиров. Данная цифровая модель имеет широкий спектр применения как в путевом хозяйстве, так и в смежных службах.

В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть перспективы использования полученной цифровой модели в рамках путевого хозяйства с точки зрения определения объема работ, а также контроля выполнения работ и осмотров пути, так как периодическая съемка БПЛА позволяет выявлять неисправности в реальном времени и накапливать базу данных для моделирования отдельных процессов при техническом обслуживании и ремонте железнодорожного пути.

Список источников

1. Применение цифровизации при планировании контингента по техническому обслуживанию железнодорожной инфраструктуры / Н. И. Коваленко, В. А. Бучкин, Ю. А. Быков, Е. Н. Гринь // Мир транспорта. 2021. № 2. С. 116–121.
2. Суслов О. А., Федорова В. И. Цифровые двойники – перспективная основа планирования технического обслуживания железнодорожного пути // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт : сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ». Щербинка : ВНИИЖТ, 2021. С. 184–192.
3. Асалханова Т. Н., Осолков А. А. Организация транспортного производства путевых работ с учетом информационного моделирования // Транспорт Урала. 2021. № 3. С. 65–67.
4. Асалханова Т. Н., Карпов И. Г., Лагев С. Ю. Роботизация технологии допуска бригад к выполнению путевых работ в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 1 (73). С. 54–63.
5. Кириенко С. В., Банул В. В. Механизация содержания железнодорожного пути // Экономика и управление народным хозяйством : сборник статей XIV Международной научно-практической конференции, Пенза, 27–28 октября 2021 г. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2021. С. 136–139.
6. Щербakov В. В., Ковалева О. В., Щербakov И. В. Цифровые модели пути – основа геодезического обеспечения проектирования, строительства (ремонта) и эксплуатации железных дорог // Геодезия и картография. 2016. № 3. С. 12–16.
7. Щербakov И. В. Аппаратно-программный комплекс «Профиль-М» для определения пространственных и геометрических параметров рельсовой колеи // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2017. Т. 22, № 3. С. 60–71.
8. Васин Н. Н., Диязитдинов Р. Р. Система технического зрения для контроля состояния железнодорожного пути // Компьютерная оптика. 2016. № 3. С. 410–415. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-tehnicheskogo-zreniya-dlya-kontrolya-sostoyaniya-zheleznodorozhnogo-puti> (дата обращения: 30.11.2022).
9. Патент № 2020109110 Российская Федерация, МПК G01C 11/02 (2006.01), G01C 11/02 (2020.02). Способ построения трехмерной модели местности вдоль полотна железнодорожного пути : № 2726256 : заявл. 01.03.2020 : опубл. 10.07.2020 / Рошин Д. А.
10. Sahebdivani S., Arefi H., Maboudi M. Rail track detection and projection-based 3D modeling from UAV point cloud // Sensors. 2020. Pt. 20, No. 18. P. 1–15.
11. Lesiak P. Inspection and maintenance of railway infrastructure with the use of unmanned aerial vehicles // Problemy Kolejnictwa. 2020. No. 188. P. 115–127.
12. A comparative assessment of deep neural network models for detecting obstacles in the real time aerial railway track images / R. S. Rampriya [et al.] // Applied Artificial Intelligence. 2022. Pt. 36, No. 1. P. 1–34.

References

1. Kovalenko N. I., Buchkin V. A., Bykov Yu. A., Grin E. N. Application of digitalization in contingent planning for maintenance of railway infrastructure. *Transport World*. 2021;(2):116–121. (In Russ.).
2. Suslov O. A., Fedorova V. I. Digital twins – promising basis for railway maintenance planning. *Proceedings of the Scientific and Practical Conference of All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport 1520: Look beyond the horizon*. Shcherbinka: VNIIZHT; 2021. P. 184–192. (In Russ.).
3. Asalkhanova T. N., Oskolkov A. A. Organisation of transport production of track works taking into account information modelling. *Transport of the Urals*. 2021;(3):65–67. (In Russ.).
4. Asalkhanova T. N., Karpov I. G., Lagerev S. Y. Robotization of the technology of admittance of crews to track works in the unified corporate automated infrastructure management system. *Modern Technologies. System analysis. Modeling*. 2022;(73):54–63. (In Russ.).
5. Kirienko S. V., Banul V. V. Mechanization of railway track maintenance. Economics and management of national economy. *Proceedings of the XIV International Scientific-Practical Conference, Penza, 27–28 October 2021*. Penza: Volga House of Knowledge; 2021. P. 136–139. (In Russ.).
6. Shcherbakov V. V., Kovaleva O. V., Shcherbakov I. V. Digital track models – the basis of geodesic support for the design, construction (repair) and operation of railways. *Geodesy and Cartography*. 2016;(3):12–16. (In Russ.).
7. Shcherbakov I. V. Hardware-software complex “Profile-M” to determine spatial and geometric parameters of the rail track. *Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technology*. 2017;22(3):60–71. (In Russ.).

8. Vasin N. N., Diyazitdinov R. R. The vision system for control of railway track condition. *Computer Optics*. 2016;(3):410–415. (In Russ). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-tehnicheskogo-zreniya-dlya-kontrolya-sostoyaniya-zheleznodorozhnogo-puti>.
9. Roshchin D. A. Patent No. 2020109110 Russian Federation, MPK G01C 11/02 (2006.01), G01C 11/02 (2020.02). Method of building a three-dimensional terrain model along the railway track bed: No. 2726256. Applied 01.03.2020. Published 10.07.2020. (In Russ).
10. Sahebdivani S., Arefi H., Maboudi M. Rail track detection and projection-based 3D modeling from UAV point cloud. *Sensors*. 2020;20(18):1–15.
11. Lesiak P. Inspection and maintenance of railway infrastructure with the use of unmanned aerial vehicles. *Problemy Kolejnictwa*. 2020;(188):115–127.
12. Rampriya R. S. [et al.]. A comparative assessment of deep neural network models for detecting obstacles in the real time aerial railway track images. *Applied Artificial Intelligence*. 2022;36(1):1–34.

Информация об авторах

Е. Н. Тимофеев – студент факультета «Строительство железных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

А. В. Сокольников – начальник инженерно-геологической базы Центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры – структурного подразделения Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД».

Information about the authors

E. N. Timofeev – Student, Railway Construction Faculty, Siberian Transport University.

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

A. V. Sokolnikov – Head of the Engineering-Geological Base of the Centre for Diagnostics and Monitoring of Infrastructure Devices, Structural Subdivision of the West Siberian Infrastructure Directorate – Branch of Russian Railways.

Статья поступила в редакцию 21.09.2023; одобрена после рецензирования 17.10.2023; принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 21.09.2023; approved after reviewing 17.10.2023; accepted for publication 12.01.2024.

TRANSPORT

Научная статья
УДК 625.7/.8
doi 10.52170/1815-9265_2024_68_83

Оценка коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов при промерзании

Денис Алексеевич Разуваев¹, Михаил Геннадьевич Чахлов²✉

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

¹ razdenis@mail.ru

² mik404@mail.ru✉

Аннотация. В качестве способа минимизации морозного пучения земляного полотна в неблагоприятных грунтово-гидрологических условиях и при глубоком сезонном промерзании возможно применение силикатизации. При этом остается открытым ряд вопросов, связанных со свойствами силикатизированного грунта, характеризующими его водонепроницаемость в процессе эксплуатации сооружения и возможность создания закрытой схемы промерзания. В связи с этим целью исследования является определение зависимостей коэффициентов влагопроводности силикатизированного грунта от плотности вяжущего и числа пластичности исходного грунта с оценкой влияния на данный параметр процесса промерзания.

Методологическую основу работы составляют постановка и проведение лабораторного эксперимента с применением элементов математического анализа для обработки полученных данных. В рамках исследования проведен лабораторный эксперимент по определению коэффициентов влагопроводности силикатизированных глинистых грунтов. Также разработан и проведен эксперимент по оценке влияния процесса промерзания на коэффициенты влагопроводности силикатизированного грунта. В качестве основных лабораторных установок при реализации экспериментов использовались прибор для определения коэффициента влагопроводности грунтов ПКВГ-Ф и автоматизированный прибор ГТ 1.1.12.

По результатам проведенного исследования установлена зависимость коэффициента влагопроводности силикатизированного глинистого грунта от плотности водного раствора силиката натрия. При плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия более 1,15 г/см³ получаемый в результате силикатизации материал и капиллярный барьер из него можно считать водонепроницаемым. Проведенные дополнительные лабораторные исследования показали, что процесс промерзания оказывает на силикатный грунт минимальное воздействие, не вызывающее кардинальных изменений влагопроводных свойств.

Ключевые слова: земляное полотно, морозное пучение, силикатизированный глинистый грунт, капиллярный барьер

Благодарности: исследование выполнено в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Для цитирования: Разуваев Д. А., Чахлов М. Г. Оценка коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов при промерзании // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 83–92. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_83.

TRANSPORT

Original article

The assessment of the coefficients of permeability of silicified soils during freezing

Denis A. Razuvaev¹, Mikhail G. Chakhlov²✉

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

¹ razdenis@mail.ru

² mik404@mail.ru✉

Abstract. As a method to minimize frost heaving of the roadbed in adverse soil-hydrological conditions and during deep seasonal freezing, the application of silicification is possible. However, several questions remain open regarding the properties of silicified soil, particularly its water impermeability during the operation of the structure and the potential for creating a closed freezing scheme. In this regard, the aim of the research is to determine the dependencies of the coefficients of water permeability of silicified soil on the density of the binder and the plasticity index of the original soil, with an assessment of the influence of the freezing process on this parameter.

The methodological foundation of the work is formed by the design and conduct of laboratory experiments, incorporating elements of mathematical analysis for processing the obtained experimental data. Within the scope of the study, a laboratory experiment was conducted to determine the coefficients of water permeability in silicified clayey soils. Additionally, an experiment was developed and conducted to assess the influence of the freezing process on the coefficients of water permeability in silicified soil. The main laboratory equipment utilized in the experiments included a device for determining the coefficient of soil water permeability (PKVG-F) and an automated apparatus GT 1.1.12.

The research revealed a correlation between the coefficient of water permeability of silicified clayey soil and the density of the sodium silicate solution. At a density of the sodium silicate solution (concentration) exceeding 1.15 g/cm^3 , the material obtained as a result of silicification and the capillary barrier formed from it can be considered impermeable to water. The additional laboratory experiments conducted have shown that the freezing process for the silicified soil has minimal effects, causing no significant changes in its water permeability properties.

Keywords: subgrade, frost heaving, silicified clay soil, capillary barrier

Acknowledgments: the research was carried out as part of the implementation of the Russian Railways grant for the development of scientific and pedagogical schools in the field of railway transportation.

For citation: Razuvaev D. A., Chakhlov M. G. The assessment of the coefficients of permeability of silicified soils during freezing. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):83–92. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_83.

Введение

В районах с преобладанием неблагоприятных грунтово-гидрологических условий и глубокого сезонного промерзания грунтов деформирование земляного полотна в результате действия сил морозного пучения остается актуальной проблемой [1–3].

Для уже существующих и эксплуатируемых в таких условиях дорог по результатам экспериментальных исследований авторами обоснован способ создания капиллярного барьера в теле или основании земляного полотна путем инъекции гидроизолирующих составов [3–6]. Разработанный способ позволяет перевести открытую схему промерзания грунта в закрытую за счет прерывания интенсивного криогенного влагопереноса в рабочий слой (активную зону) земляного полотна капиллярным барьером из преобразованного инъекцией грунта.

В качестве способа преобразования свойств грунта авторами рекомендована силикатизация – пропитка грунтов раствором силиката натрия через инъекторы специальной конструкции [7, 8]. При этом остается открытым ряд вопросов, связанных со свойствами силикатизированного грунта, характеризующими его водонепроницаемость в процессе эксплуатации сооружения.

В связи с этим целью исследования является определение зависимостей коэффициентов влагопроводности силикатизированного грунта от плотности вяжущего и числа пластичности исходного грунта с оценкой влияния на данный параметр процесса промерзания.

Постановка лабораторного эксперимента

Все разработанные к настоящему времени методы определения коэффициента влагопроводности талых грунтов основаны на законе переноса влаги и, в зависимости от характера и величины потока влаги через единичную площадь в единицу времени, делятся на две основные группы: стационарного или нестационарного влагообмена [1]. В условиях стационарного изотермического влагообмена удельный поток влаги в единицу времени имеет постоянное значение во всех сечениях образца. При нестационарном изотермическом влагообмене в каждом сечении образца поток влаги изменяется во времени.

Методы стационарного влагообмена позволяют давать более точные значения коэффициента влагопроводности грунтов. Однако значительными недостатками таких методов являются сложность реализации в лабораторных условиях и высокая продолжительность одного опыта.

В свою очередь, для условий нестационарного изотермического влагообмена существуют известные методики и приборы [1, 9], а длительность лабораторного опыта не превышает нескольких часов, что является значительным преимуществом при реализации лабораторных экспериментов. При этом точность определения коэффициента влагопроводности при нестационарном изотермическом влагообмене можно повысить путем тщательного соблюдения начальных и граничных условий эксперимента. На основании вышеизложенного дальнейшие исследования

по определению коэффициентов влагопроводности грунтов проводились в условиях нестационарного изотермического влагообмена.

В качестве основного лабораторного прибора при реализации эксперимента использовался прибор для определения коэффициента влагопроводности грунтов ПКВГ-Ф. Принципиальная схема конструкции прибора ПКВГ-Ф представлена на рис. 1. Для оценки влияния на коэффициент влагопроводности промерзания использовался автоматизированный прибор ГТ 1.1.12.

Методика определения коэффициента влагопроводности с помощью прибора ПКВГ-Ф схожа с методикой, используемой при работе прибора конструкции И. А. Золотаря, Г. И. Собко, Ю. Г. Лазарева. Незначительные отличия методик обусловлены некоторой разницей в конструкциях приборов. При этом прибор ПКВГ-Ф обеспечивает те же начальные и граничные условия, что и прибор конструкции И. А. Золотаря, Г. И. Собко, Ю. Г. Лазарева [9].

Функционирование прибора построено на принципе работы сообщающихся сосудов, кото-

рые образуют форма для фильтрующего материала и питающая камера. Соединение питающего сосуда с питающей камерой при помощи трубки с косым отверстием, расположенной на уровне поверхности фильтрационного материала, при закрытом заливном вентиле обеспечивает их работу как сосуда Мариотта [9].

Схема исследуемого образца силикатизированного грунта для определения коэффициентов влагопроводности в приборе ПКВГ-Ф представлена на рис. 2.

В качестве исходных материалов для лабораторного эксперимента по определению коэффициентов влагопроводности приняты глинистые грунты с числом пластичности I_p от 5 до 13. Физические характеристики грунтов для эксперимента представлены в табл. 1.

Для сравнительного анализа испытания выполнялись как для силикатизированных, так и для исходных грунтов.

Формирование лабораторных образцов для каждого вида грунта без силиката натрия производилось при оптимальной влажности до коэффициента уплотнения, равного 0,95, с помощью

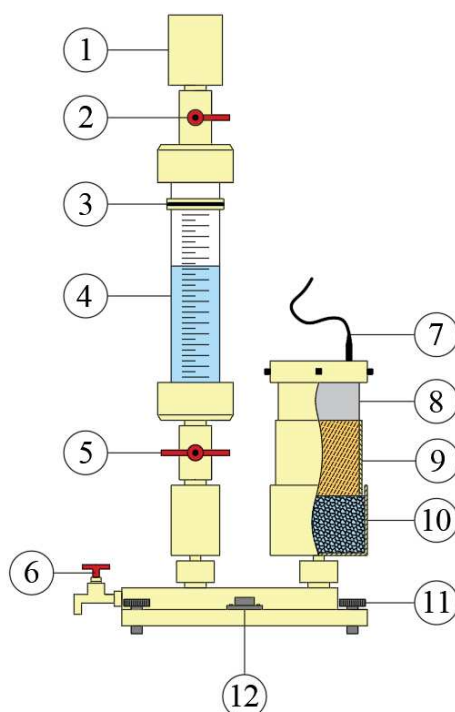


Рис. 1. Схема конструкции прибора ПКВГ-Ф для определения коэффициента влагопроводности грунта:

1 – заливной цилиндр; 2 – заливной вентиль; 3 – фиксирующее кольцо; 4 – питающий сосуд с нанесенной шкалой расхода воды; 5 – питающий вентиль; 6 – сливной вентиль; 7 – сетевой шнур; 8 – регистрирующий блок со встроенным минутным таймером и датчиком определения влажности; 9 – кольцо с исследуемым грунтом (грунтовый цилиндр); 10 – форма с фильтрующим материалом; 11 – подъемные винты; 12 – круглый уровень

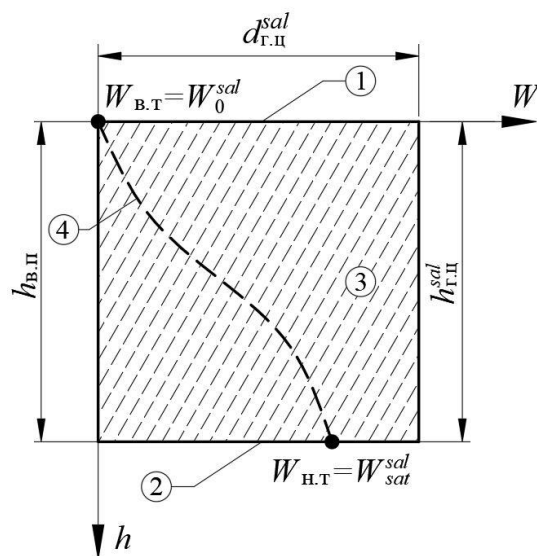


Рис. 2. Схема силикатизированного грунтового цилиндра с примером формирования эпюры влажности для прибора ПКВГ-Ф:

1 – верхний торец образца; 2 – нижний торец образца; 3 – образец; 4 – эпюра влажности (график распределения влажности по высоте образца); $h_{г.ц}^{sal}$ – высота и диаметр образца, см ($h_{г.ц}^{sal} = 7,0$); $h_{в.п}$ – высота поднятия фронта увлажнения, см; $W_{в.т}$ – влажность на верхнем торце образца, д. е.; $W_{н.т}$ – влажность на нижнем торце образца, д. е.; W_0^{sal} – начальная влажность образца, д. е.; W_{sat}^{sal} – полная влагоемкость исследуемого силикатизированного грунта, д. е.

Таблица 1

Физические характеристики исходных грунтов

Грунт	Число пластичности I_p , д. е.	Влажность, д. е.			Плотность, г/см ³	
		на границе текучести W_L	на границе раскатывания W_P	оптимальная $W_{опт}$	частиц грунта ρ_s	максимальная, $\rho_{d\max}$
1. Супесь пылевая	0,05	0,26	0,21	14,7	2,66	1,82
2. Суглинок легкий пылеватый	0,09	0,30	0,21	17,1	2,70	1,73
3. Суглинок тяжелый пылеватый	0,13	0,33	0,20	17,5	2,71	1,78

прибора стандартного уплотнения. Затем из полученного монолита с помощью кольца, входящего в комплект прибора ПКВГ-Ф, вырезался грунтовой цилиндр диаметром и высотой 7 см.

Для изготовления образцов силикатизированного грунта в приборе стандартного уплотнения предварительно рассчитывался объем водного раствора силиката натрия. Далее рассчитанный объем раствора тщательно перемешивался с исходным сухим грунтом (рис. 3, а и б). Перемешанный силикатизированный грунт уплотнялся в приборе стандартного уплотнения. Из полученного монолита с помощью кольца прибора ПКВГ-Ф вырезался необходимый для эксперимента образец (см. рис. 3, в). Затем образцы помещались в эксикатор, где производилось их отверждение, а затем водонасыщение до оптимальной влажности.

Параллельно с подготовкой образцов грунта выполнялась подготовка прибора ПКВГ-Ф к работе в соответствии с его паспортом.

В остальном методика подготовки и проведения испытания по определению коэффициентов влагопроводности с использованием прибора ПКВГ-Ф не отличалась от стандартной [10]. На завершающей стадии испытания, при выходе фронта увлажнения на верхнюю поверхность лабораторного образца, датчик фиксирует изменение влажности и останавливает минутный таймер. На таймере фиксируется время τ , затраченное на перемещение фронта увлажнения от нижнего торца грунтового образца до верхнего. В этот же момент фиксируется конечный уровень воды H_k в питающем сосуде, после чего испытание считается завершенным.



Рис. 3. Изготовление образцов силикатизированного грунта:
 а – подготовка раствора силиката натрия требуемой концентрации; б – пропитка исходного грунта раствором силиката натрия; в – подготовка грунтового цилиндра

Проведение лабораторного эксперимента

Лабораторный эксперимент выполнялся для каждого из намеченных видов грунта (супесь, суглинок легкий, суглинок тяжелый). Каждый опыт для отдельного вида грунта состоял из пяти этапов с различной плотностью водного раствора (концентрацией) силиката натрия. В свою очередь, каждый этап опыта проводился в шести повторностях.

Образцы исходного грунта увлажнялись только водой, без добавления силиката натрия. Для таких образцов, с целью упрощения обработки результатов, плотность водного «раствора силиката натрия» принята 1,00 (без силиката натрия).

Переменные параметры эксперимента:

- опыты: 1 – супесь пылеватая ($I_p = 0,05$); 2 – суглинок легкий пылеватый ($I_p = 0,09$); 3 – суглинок тяжелый пылеватый ($I_p = 0,13$);
- этапы: 0 – плотность водного раствора силиката натрия $\rho_{sal}^n = 1,00$ г/см³ (без силиката натрия); 1 – $\rho_{sal}^n = 1,05$ г/см³; 2 – $\rho_{sal}^n = 1,10$ г/см³; 3 – $\rho_{sal}^n = 1,15$ г/см³; 4 – $\rho_{sal}^n = 1,20$ г/см³; 5 – $\rho_{sal}^n = 1,25$ г/см³.

За расчетное значение коэффициентов влагопроводности для каждого этапа эксперимента принимались результаты испытаний по шести определениям с доверительной вероятностью 0,95, при одностороннем (в большую сторону) ограничении доверительного интервала. Обработка полученных результатов производилась согласно ГОСТ 20522 [11].

Проведенный эксперимент (рис. 4) позволил определить значения коэффициентов влагопроводности для трех видов исследованных грунтов с различной плотностью водного раствора (концентрацией) раствора силиката натрия.

Результаты лабораторного эксперимента

По определенным в ходе испытания значениям времени τ и количеству впитавшейся воды m_b вычислялись значения коэффициента влагопроводности грунта по зависимости

$$K_w = \frac{4}{3,14d^4\tau} \left[\frac{m_b}{\rho_d(W_{sat} - W_0)} \right]^2, \quad (1)$$

где d – диаметр грунтового образца, см ($d = 7$); τ – время водонасыщения, ч; m_b – масса впитавшейся в образец воды, г; ρ_d – плотность су-



Рис. 4. Проведение этапа эксперимента с помощью прибора ПКВГ-Ф

хого материала, г/см³; W_{sat} – полная влагоемкость образца, д. е.; W_0 – начальная влажность образца, близкая к оптимальной, д. е.

Значение m_b определяется как

$$m_b = H_k - H_n, \quad (2)$$

где H_k , H_n – конечный и начальный уровни воды в питающем сосуде соответственно, г.

Результаты определения коэффициентов влагопроводности для силикатизированных и исходных грунтов представлены в табл. 2.

На рис. 5 представлены графики зависимости расчетных коэффициентов влагопроводности исследуемых грунтов от плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия.

Анализ приведенных выше результатов показывает, что фактические значения коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов при плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия более 1,15 г/см³ близки к нулю. Соответственно,

Таблица 2

Результаты определения коэффициентов влагопроводности для исследуемых образцов

Опыт	Этап	I_p , д. е.	ρ_{sal} , г/см ³	n	\bar{K}_w , см ² /ч	K_{wp} , см ² /ч
1	0	0,05	1,00*	6	3,07	3,53
	1	0,05	1,05	6	1,26	1,35
	2	0,05	1,10	6	0,41	0,53
	3	0,05	1,15	6	0,06	0,10
	4	0,05	1,20	6	0,06	0,09
	5	0,05	1,25	6	0,03	0,05
2	0	0,09	1,00*	6	2,17	2,31
	1	0,09	1,05	6	1,06	1,15
	2	0,09	1,10	6	0,32	0,37
	3	0,09	1,15	6	0,08	0,13
	4	0,09	1,20	6	0,05	0,08
	5	0,09	1,25	6	0,02	0,03
3	0	0,13	1,00*	6	1,16	1,33
	1	0,13	1,05	6	0,70	0,74
	2	0,13	1,10	6	0,38	0,42
	3	0,13	1,15	6	0,05	0,08
	4	0,13	1,20	6	0,02	0,03
	5	0,13	1,25	6	0,01	0,02

Примечание. Звездочкой помечен исходный грунт (без силиката натрия); n – число определений коэффициента влагопроводности; \bar{K}_w – среднееарифметическое значение коэффициента влагопроводности по n испытаниям, см²/ч; K_{wp} – расчетный коэффициент влагопроводности силикатизированного глинистого грунта.

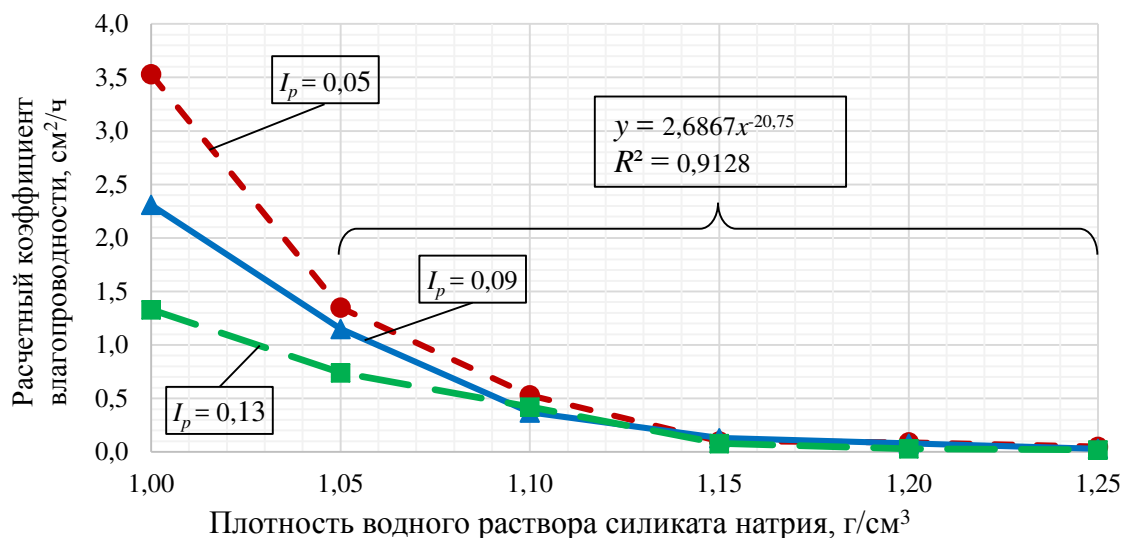


Рис. 5. Расчетные значения коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов по результатам проведенного эксперимента

получаемый в результате силикатизации материал капиллярного барьера можно считать водонепроницаемым. При этом стоит отметить, что силикатизация нивелирует отличия в коэффициенте влагопроводности для грунтов с различным числом пластичности.

Зависимость коэффициента влагопроводности силикатизированного глинистого грунта (в диапазоне $I_p = 0,05 \dots 0,13$) от плотности водного раствора силиката натрия (в диапазоне от 1,05 до 1,25 г/см³) можно аппроксимировать функцией

$$K_{wp} = 2,6867 \rho_{sal}^{-20,75}. \quad (3)$$

Аппроксимация показала, что полученные значения лучше всего описываются степенной функцией. Достоверность аппроксимации R^2 составила 0,91, что демонстрирует адекватность и высокую степень близости аппроксимации и полученных значений.

Оценка влияния процесса промерзания на коэффициенты влагопроводности силикатизированного грунта

Применение силикатизированного грунта в качестве материала капиллярного барьера для минимизации морозного пучения подразумевает его расположение в зоне сезонного промерзания [3–6]. В связи с этим необходимо качественно оценить влияние промерзания на величину коэффициента влагопроводности силикатизированного грунта.

Понижение температуры грунта следует рассматривать как основной фактор формирования кинетических основ миграции воды. Оно вызывает приращение свободной энергии минеральной части [12, 13], от которой зависят обменно-адсорбционная способность и количество воды, удерживаемой поверхностными силами. Свободная энергия тем больше, чем выше твердость минеральных частиц, которая, в свою очередь, зависит от температурного деформирования последних, формирующего микропути движения воды [12, 13].

Следовательно, существует вероятность изменения влагопроводных свойств силикатизированного грунта капиллярного барьера при его промерзании. Поэтому для оценки влияния промерзания на коэффициент влагопроводности силикатизированного грунта выполнены дополнительные лабораторные исследования, которые представляли собой модифи-

кацию описанной выше методики определения коэффициента влагопроводности профессора И. А. Золотаря, но с моделированием условий промерзания.

В качестве установки для моделирования промерзания использовался автоматизированный прибор для определения степени морозного пучения ГТ 1.1.12 и холодильная камера. Прибор в комплексе с программным обеспечением позволяет моделировать в образце силикатизированного грунта зону промерзания с контролируемыми параметрами температуры и схемы увлажнения.

Поскольку ранее отмечено, что силикатизация нивелирует отличия в коэффициенте влагопроводности глинистых грунтов от числа пластичности, для данного эксперимента принят грунт с максимальным числом пластичности 13. При этом значения плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия приняты 1,05 и 1,25 г/см³ (крайние значения в рамках исследования).

Методика приготовления силикатизированного грунта описана выше. Отличием данного эксперимента является формирование образцов непосредственно в кольцевых обоймах прибора ГТ 1.1.12 методом послойного трамбования. Подготовленный образец представлял собой цилиндр силикатизированного грунта диаметром 100 мм, высотой 150 мм внутри кольцевой обоймы прибора.

После установки образцов и необходимой подготовки осуществлялся запуск прибора. Затем с помощью программного обеспечения прибора задавались температурные параметры эксперимента: на верхней плите –1,5 °С, на нижней плите 0,5 °С. Образец термостатировали до установления температуры –0,3 °С (температура начала замерзания) в его середине. После термостатирования открывался питающий сосуд с водой для начала процесса увлажнения образца через пористый материал.

Продолжительность этапа эксперимента после термостатирования и начала процесса увлажнения образца составляла 1 ч.

По завершению эксперимента образцы силикатизированного грунта извлекались из прибора и в холодильной камере производилась их разделка, которая заключалась в послойном отборе материала в талой зоне для

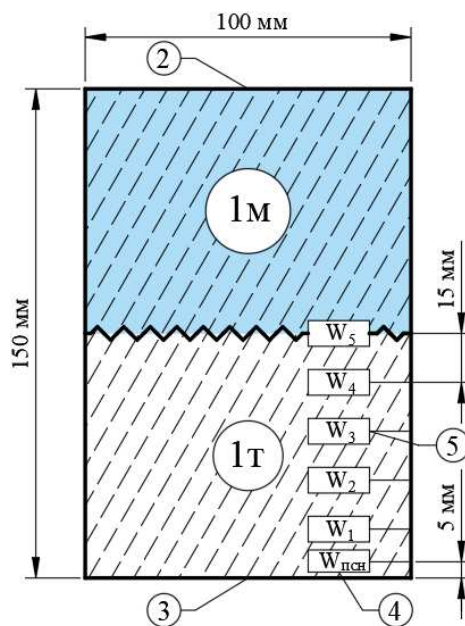


Рис. 6. Схема к послойному определению влажности силикатизированного образца:

1м, 1т – образец силикатизированного грунта после завершения этапа эксперимента в мерзлом и талом состояниях соответственно; 2 – верхний торец образца; 3 – нижний торец образца; 4 – влажность грунта у поверхности, через которую производится увлажнение, $W_{п.с.н.}$; 5 – влажность грунта в одном из сечений W_n

Таблица 3

**Результаты определения коэффициентов влагопроводности
для исследуемых грунтов при промерзании (опыт 1)**

Этап	I_p	$\rho_{sal}, \text{г/см}^3$	$h_{в.п}, \text{см}$	$\tau, \text{ч}$	$W_0, \%$	$\bar{W}, \%$	$W_{п.с.н.}, \%$	$K_{w3}, \text{см}^2/\text{ч}$
1	0,13	1,05	4,0	1,0	18	19,6	25	0,83
2	0,13	1,25	1,0	1,0	18	18,6	24	0,02

дальнейшего определения влажности в каждом сечении. По высоте образца сечения располагались через каждые 15 мм (рис. 6).

После определения влажности в каждом сечении ($W_1 \dots W_5$) и в точке у поверхности, через которую производится увлажнение ($W_{п.с.н.}$), рассчитывалась средняя влажность силикатизированного образца грунта (\bar{W}).

Коэффициент влагопроводности силикатизированного грунта при промерзании рассчитывался по формуле [9]:

$$K_w = \frac{\pi h_{в.п}^2}{4\tau} \left(\frac{\bar{W} - W_0}{W_{п.с.н.} - W_0} \right)^2, \quad (4)$$

где $h_{в.п}$ – высота впитывания (поднятия воды в образце), см; τ – время впитывания, ч; W_0 – начальная влажность образца (оптимальная), %.

Результаты определения коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов при промерзании представлены в табл. 3.

Проведенные дополнительные лабораторные исследования показали, что процесс промерзания оказывает на силикатизированный грунт минимальное влияние и не вызывает кардинальных изменений влагопроводных свойств материала. Фактическая абсолютная разность коэффициентов влагопроводности составила от 0,00 до 0,09 $\text{см}^2/\text{ч}$.

Заключение

По результатам проведенного исследования установлена зависимость коэффициента влагопроводности силикатизированного глинистого грунта (в диапазоне $I_p = 5 \dots 13$) от плотности водного раствора силиката натрия (в диапазоне от 1,05 до 1,25 г/см^3).

Также установлено, что фактические значения коэффициентов влагопроводности силикатизированных грунтов при плотности водного раствора (концентрации) силиката натрия более 1,15 г/см^3 близки к нулю.

Соответственно, получаемый в результате силикатизации материал капиллярного барьера можно считать водонепроницаемым. При этом отмечено, что силикатизация нивелирует отличия в коэффициенте влагопроводности для грунтов с различным числом пластичности.

Проведенные дополнительные лабораторные исследования показали, что процесс промерзания оказывает на силикатизированный грунт минимальное воздействие и не вызывает кардинальных изменений влагопроводных свойств материала.

Список источников

1. Золотарь И. А., Пузаков Н. А., Сиденко В. М. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. Москва : Транспорт, 1971. 416 с.
2. Пузаков Н. А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. Москва : Дориздат, 1960. 169 с.
3. Razuvaev D. A., Lanis A. L., Chakhlov M. G. Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds // *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021. Vol. 13, Iss. 5, October. P. 366–371. DOI 10.3724/SP.J.1226.2021.21029.
4. Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation / D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov, V. Y. Soloviova, G. V. Karpachevsky // *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 61. P. 621–626. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.100>.
5. Обоснование создания капиллярного барьера в земляном полотне путем инъектирования гидроизолирующих составов / Д. А. Разуваев, А. Л. Ланис, М. Г. Чахлов, Ю. А. Цибариус // *Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : XVIII Международная научно-техническая конференция (г. Москва, 27–28 октября 2021 г.) : чтения, посвященные памяти профессора Г. М. Шахунянца : труды / Российские железные дороги, Российский университет транспорта (МИИТ). Москва, 2021. С. 216.*
6. Коэффициенты морозного пучения силикатизированных глинистых грунтов / Д. А. Разуваев, А. Л. Ланис, М. Г. Чахлов, Р. С. Печенкин // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2023. № 2 (65). С. 91–98. DOI 10.52170/1815-9265_2023_65_91. EDN QCJMCX.
7. Окольникова Г. Э., Симоненко Е. Ю. Химическая стабилизация пучинистых грунтов // *Системные технологии*. 2023. № 2 (47). С. 178–181. DOI 10.55287/22275398_2023_2_178. EDN LKORZW.
8. Усиление грунтов основания фундаментов методом инъекционной силикатизации / А. А. Михайлов, Е. Ю. Евлахова, А. В. Иванова, М. С. Матвеев // *Строительство и архитектура*. 2019. Т. 7, № 1. С. 5–9. DOI 10.29039/article_5c646f166c48d2.74103573.
9. Патент № 6627:21.0421.04 Российская Федерация, МПК G01N 27/00 (1995.01). Прибор для определения коэффициента влагопроводности талых связных грунтов нарушенной структуры нестационарным методом : № 97106667/20 : заявлен 21.04.1997 : опубликован 16.05.1998 / Золотарь И. А., Собко Г. И., Лазарев Ю. Г. ; заявитель Военная академия тыла и транспорта ; патентообладатель Золотарь И. А., Собко Г. И., Лазарев Ю. Г. 6 с.
10. Сухоруков А. В. Обоснование региональных расчетных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд в условиях Западной Сибири : специальность 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сухоруков Алексей Владимирович. Томск, 2017. 166 с.
11. ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний : принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и оценке соответствия в строительстве (приложение В к протоколу № 40 от 4 июня 2012 г.) : введен 29.10.2012. Москва : Стандартиформ, 2013. 19 с.
12. Орлов В. О., Дубнов Ю. Д., Меренков Н. Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1977. 184 с.
13. Zhang C., Liu E. Experimental study on moisture and heat migration and deformation properties of unsaturated soil column under a temperature gradient during rainfall infiltration // *PLOS ONE*. 2023. Vol. 18 (6), e0286973. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286973>.

References

1. Zolotar I. A., Puzakov N. A., Sidenko V. M. Water-thermal regime of subgrade and pavement. Moscow: Transport; 1971. 416 p. (In Russ.).
2. Puzakov N. A. Water-heat regime of the automobile roads subgrade. Moscow: Dorizdat; 1960. 169 p. (In Russ.).
3. Razuvaev D. A., Lanis A. L., Chakhlov M. G. Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021;13(5):366–371. October. DOI 10.3724/SP.J.1226.2021.21029.
4. Razuvaev D. A., Chakhlov M. G., Soloviova V. Y., Karpachevsky G. V. Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation. *Transportation Research Procedia*. 2022;61:621–626. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.100>.
5. Razuvaev D. A., Lanis A. L., Chakhlov M. G., Tsibarius Yu. A. Substantiation of creating a capillary barrier in the roadbed by injecting waterproofing compounds. *Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference. Modern Problems of Design, Construction, and Operation of Railway Tracks (Moscow, October 27–28, 2021): Readings Dedicated to the Memory of Professor G. M. Shakhunyan. Russian Railways, Russian University of Transport*. Moscow; 2021. P. 216. (In Russ.).
6. Razuvaev D. A., Lanis A. L., Chakhlov M. G., Pechenkin R. S. Frost Heaving Coefficients of Silicified Clayey Soils. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(65):91–98. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_65_91. EDN QJCJMCX.
7. Okolnikova G. E., Simonenko E. Yu. Chemical stabilization of expansive soils. *Systemic Technologies*. 2023;(47):178–181. (In Russ.). DOI 10.55287/22275398_2023_2_178. EDN LKORZW.
8. Mikhailov A. A., Evlakhova E. Yu., Ivanova A. V., Matveev M. S. Strengthening of foundation soils by injection silicization. *Construction and Architecture*. 2019;7(1):5–9. (In Russ.). DOI 10.29039/article_5c646f166c48d2.74103573.
9. Zolotar I. A., Sobko G. I., Lazarev Yu. G. Patent 6627:21.0421.04 Russian Federation. Device for determining the coefficient of water permeability of thawed cohesive soils with a disturbed structure by a non-stationary method. Applicant Military Academy of Home Front and Transport and patent holder Zolotar I. A., Sobko G. I., Lazarev Yu. G. No. 97106667/20; published on 21.04.1997. 6 p. (In Russ.).
10. Sukhorukov A. V. Substantiation of regional calculated values of characteristics of clayey soils for the design of road pavements in the conditions of Western Siberia. Specialty 05.23.11 Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels. Dissertation for the degree of Candidate of Engineering. Sukhorukov Alexey Vladimirovich. Tomsk; 2017. 166 p. (In Russ.).
11. GOST 20522–2012. Soils. Methods of Statistical Processing of Test Results. Adopted by the Interstate Scientific and Technical Commission on standardization, technical standardization and conformity assessment in construction (Annex B to Protocol N 40 of June 4, 2012): Introduced on 29.10.2012. Moscow: Standartinform; 2013. 19 p. (In Russ.).
12. Orlov V. O., Dubnov Yu. D., Merenkov N. D. Frost heave and its influence on the foundations of structures. Leningrad: Stroyizdat, Leningrad branch; 1977. 184 p. (In Russ.).
13. Zhang C., Liu E. Experimental study on moisture and heat migration and deformation properties of unsaturated soil column under a temperature gradient during rainfall infiltration. *PLoS ONE*. 2023;18(6):e0286973. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286973>.

Информация об авторах

Д. А. Разуваев – заведующий научно-исследовательской лабораторией «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент.

М. Г. Чахлов – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

D. A. Razuvaev – Head of the Quality Control of Road Pavements and Subgrade Research Laboratory, Siberian Transport University, Candidate of Engineering, Associate Professor.

M. G. Chakhlov – Research Associate of the Quality Control of Road Pavements and Subgrade Research Laboratory, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 27.11.2023; одобрена после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 19.01.2024.

The article was submitted 27.11.2023; approved after reviewing 15.12.2023; accepted for publication 19.01.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 93–102.
The Siberian Transport University Bulletin. 2024. No. 1 (68). P. 93–102.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.121.537+624.131.7
doi 10.52170/1815-9265_2024_68_93

Экспериментальные исследования несущей способности двухслойного основания

Максим Витальевич Шохирев

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия,
170596maxim@gmail.com

Аннотация. В практике строительства часто встречаются неоднородные основания. Один из вариантов такого основания – со слабым подстилающим слоем – представляет особый интерес, ему посвящено немало теоретических и экспериментальных работ. Однако до сих пор в проектировании не найдено применение только методики определения расчетного сопротивления основания со слабым подстилающим слоем, тогда как нормативная методика оценки его несущей способности отсутствует. В определенной степени это обусловлено отсутствием строгого статического решения теории предельного равновесия грунтов для этого случая. Применение же приближенных расчетных схем требует экспериментального обоснования процесса формирования области выпора в двухслойном основании при его разрушении.

В данной статье приводятся результаты опытов по исследованию очертания и размеров области выпора грунта в основании со слабым подстилающим слоем при различной глубине его расположения. Опыты проводились в малом грунтовом лотке для условий плоской деформации.

Результаты испытаний показывают, что, во-первых, при определенной глубине заложения слабого подстилающего слоя несущая способность такого основания равна несущей способности однородного основания песка. Во-вторых, при дальнейшем уменьшении глубины заложения подстилающего слоя несущая способность начинает уменьшаться, а линия разрушения основания – заходить в подстилающий слой.

В статье также приведены результаты полевых испытаний других ученых, изучавших двухслойное основание со слабым подстилающим слоем. В этих испытаниях подготовленный стенд подвергался монотонному нагружению жесткой круглой опоры (штампа), измерялись нагрузка на штамп и деформации основания. Результаты данных полевых исследований подтверждают результаты наших лабораторных испытаний.

Ключевые слова: несущая способность, грунт, основание, подстилающий слой, слабый слой

Для цитирования: Шохирев М. В. Экспериментальные исследования несущей способности двухслойного основания // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 93–102. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_93.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Experimental studies of the bearing capacity of a two-layer foundation

Maxim V. Shokhirev

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, 170596maxim@gmail.com

Abstract. In construction practice, heterogeneous foundations are often encountered. One of the options for such a foundation – a foundation with a weak underlying layer – is of particular interest; a lot of theoretical and experimental work has been devoted to this type of foundation. However, so far only the method of determining the calculated resistance of a foundation with a weak underlying layer has been used for design, while there is no standard method for assessing its load-bearing capacity. To a certain extent, this is due to the lack of a strict static solution to the theory of limiting equilibrium of soils for this case. The use of approximate calculation schemes requires experimental substantiation of the process of formation of an uplift region in a two-layer foundation upon its destruction.

This article presents the results of experiments to study the outline and size of the soil uplift area in the foundation with a weak underlying layer at different depths. The experiments were carried out in a small soil tray for plane strain conditions.

The test results show that, firstly, at a certain depth of a weak underlying layer, the bearing capacity of such a base is equal to the bearing capacity of a homogeneous sand base. Secondly, with a further decrease in the depth of the underlying layer, the bearing capacity begins to decrease. Also, the line of destruction of the base begins to extend into the underlying layer.

The article also presents the results of field tests by another author testing a two-layer base with a weak underlying layer. In these tests, the prepared stand was subjected to monotonic loading of a rigid circular support (stamp). During the tests, the load on the die and the deformation of the base were measured. The results of these field studies confirm the results of our laboratory tests.

Keywords: bearing capacity, soil, foundation, underlying layer, weak layer

For citation: Shokhirev M. V. Experimental studies of the bearing capacity of a two-layer foundation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):93–102. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_93.

Введение

Схема разрушения и метод расчета несущей способности определены лишь для однородного основания [1–4]. Одна из первых и основных расчетных схем, требующая внимания, – это основание со слабым подстилающим слоем. Для этой схемы в нормативной литературе [5, 6] дана только оценка прочности основания по величине расчетного сопротивления грунта, но не несущей способности. В ранее опубликованных работах [7–9] приведено приближенное теоретическое решение о несущей способности двухслойного основания, основанное на применении метода логарифмической спирали для оценки предельной нагрузки. Граница области выпора в этом решении очерчена логарифмической спиралью, которая может пересекать как верхний, так и нижний слой грунта основания. В случае основания со слабым подстилающим слоем при увеличении глубины положения его кровли

линия скольжения, определяющая область выпора, также заглубляется, захватывая часть слабого слоя до некоторой критической глубины, – так показывает расчет. Логично предположить, что и на практике несущая способность основания со слабым подстилающим слоем зависит от глубины его заложения. В данной статье приводятся результаты опытов, подтверждающие указанное явление для основания со слабым подстилающим слоем. Цель исследования – определить влияние слабого подстилающего слоя на несущую способность основания и схему разрушения.

Материалы и методы исследования

Лабораторная установка для проведения исследований состоит из лотка размерами $300 \times 400 \times 50$ мм, штампа размерами 50×50 мм, металлической штанги с рамой и прогибомера с грузом (рис. 1).

Сначала в лоток с послойным уплотнением укладывалась глина. Затем поверх глины, также

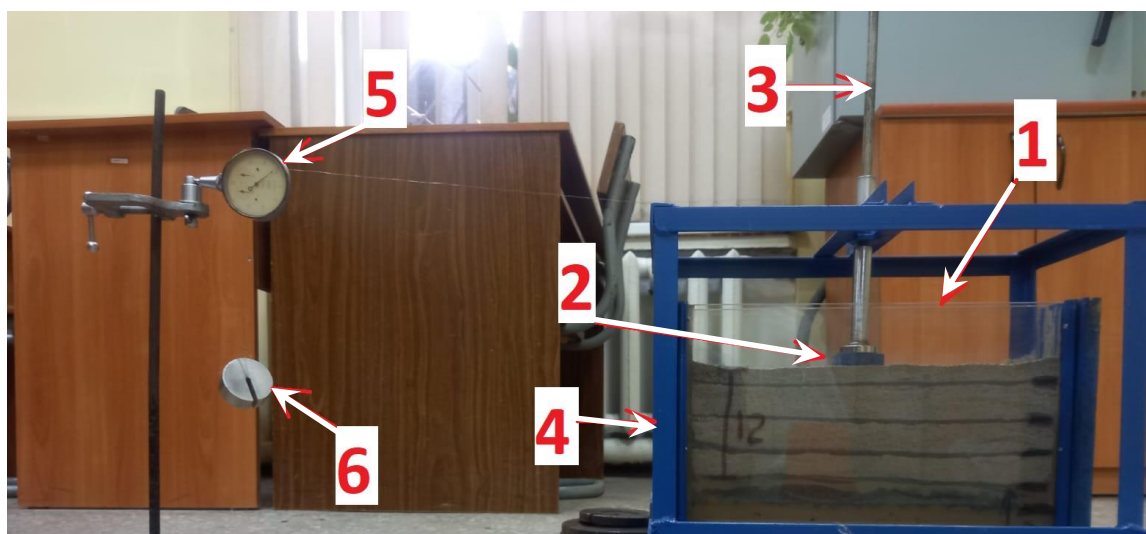


Рис. 1. Лабораторная установка:
1 – лоток; 2 – штамп; 3 – штанга; 4 – рама; 5 – прогибомер; 6 – груз

с послойным уплотнением, укладывался песок. Для отслеживания формы деформации основания, т. е. для фиксации ожидаемой зоны выпора, с определенным шагом по вертикали укладывался цветной песок (рис. 2).

Характеристики грунтов:

– несущий слой (плотный песок):
 $\gamma_1 = 17 \text{ кН/м}^3$, $\phi_1 = 32^\circ$, $c_1 = 1 \text{ кПа}$;

– подстилающий слой (слабая глина):
 $\gamma_1 = 19 \text{ кН/м}^3$, $\phi_1 = 7^\circ$, $c_1 = 23 \text{ кПа}$.

Далее через металлическую штангу 3 на штамп 2 (см. рис. 1) передается центрально приложенная нагрузка. Нагружение происходит ступенями по 1 кг, которые выдерживаются до затухания деформации. Критерий затухания – 0,01 мм за 2 ч. Вертикальные перемещения штампа регистрируются прогибомером.

Серии испытаний проводились с различной глубиной заложения кровли слабого подстилающего слоя H . Были приняты $H = 12, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 0$ см. Соответственно, $H/B = 2,4; 2,0; 1,8; 1,6; 1,4; 1,2; 1,0; 0$.

Результаты исследования

Испытание № 1 при мощности несущего слоя 12 см ($H/B = 2,4$) показано на рис. 3, а. При глубине залегания глины $H = 12$ см ($H/B = 2,4$) разрушение основания произошло в несущем слое, разрушающая нагрузка равна 310 Н.

Испытание № 2 при мощности несущего слоя 10 см ($H/B = 2,0$) показано на рис. 3, б. При глубине залегания глины $H = 10$ см ($H/B = 2,0$) разрушение основания произошло на контакте 1-го и 2-го слоев грунта, разрушающая нагрузка равна 300 Н.

Испытание № 3 при мощности несущего слоя 9 см ($H/B = 1,8$) показано на рис. 3, в. При глубине залегания глины $H = 9$ см ($H/B = 1,8$) разрушение основания произошло через два слоя грунта, разрушающая нагрузка составила 260 Н.

Испытание № 4 при мощности несущего слоя 8 см ($H/B = 1,6$) показано на рис. 3, г. При глубине залегания глины $H = 8$ см ($H/B = 1,6$) разрушение основания произошло через два слоя грунта, разрушающая нагрузка составила 250 Н.

Испытание № 5 при мощности несущего слоя 7 см ($H/B = 1,4$) показано на рис. 3, д. При глубине залегания глины $H = 7$ см ($H/B = 1,4$) разрушение основания произошло через два слоя грунта, разрушающая нагрузка составила 230 Н.

Испытание № 6 при мощности несущего слоя 6 см ($H/B = 1,2$) показано на рис. 3, е. При глубине залегания глины $H = 6$ см ($H/B = 1,2$) разрушение основания произошло через два слоя грунта, разрушающая нагрузка составила 220 Н.

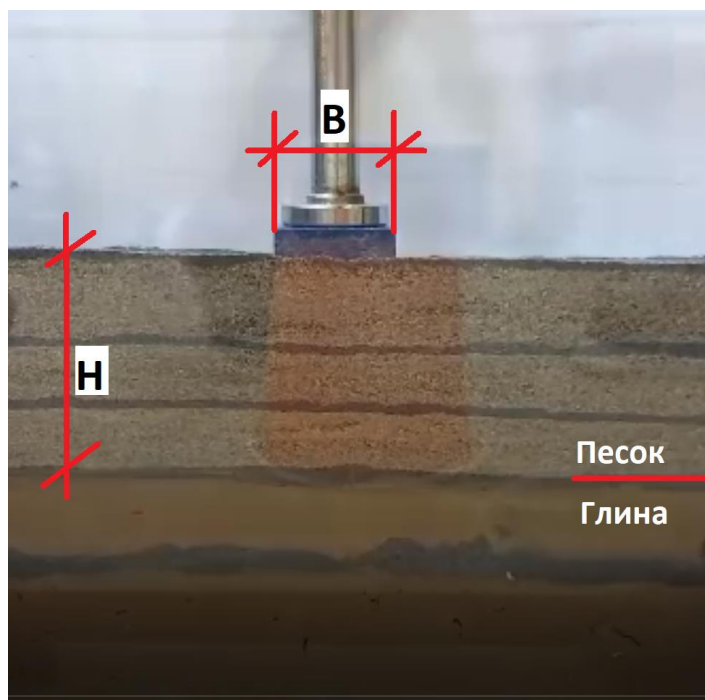
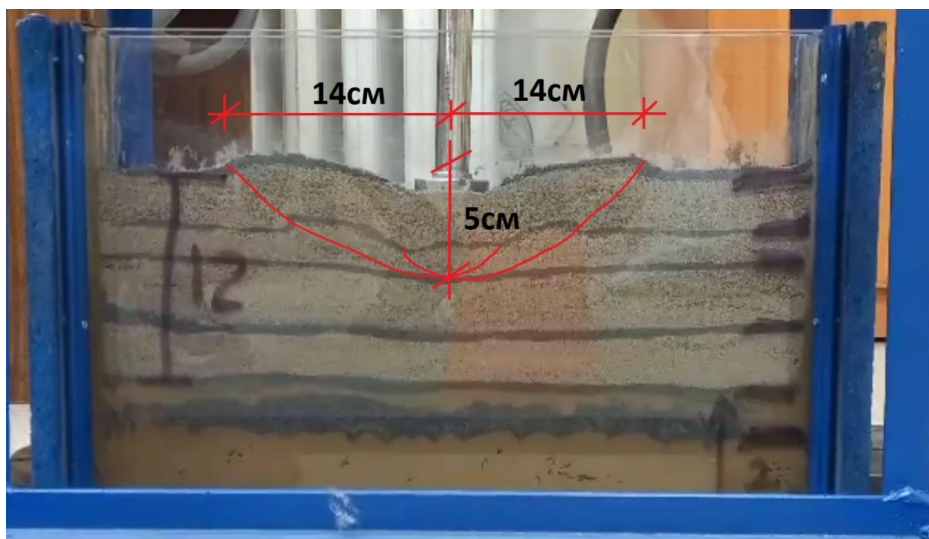
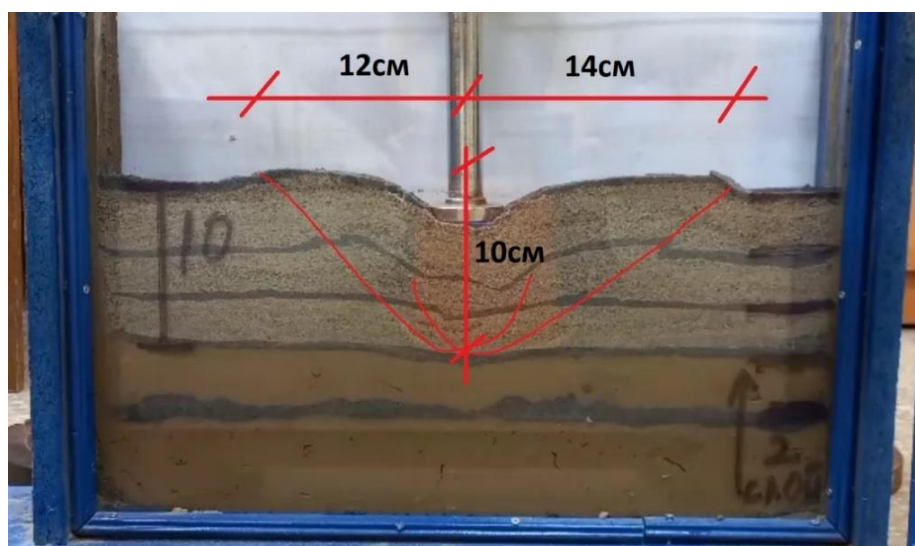


Рис. 2. Двухслойное основание:
 B – ширина штампа; H – мощность несущего слоя

а)



б)



в)

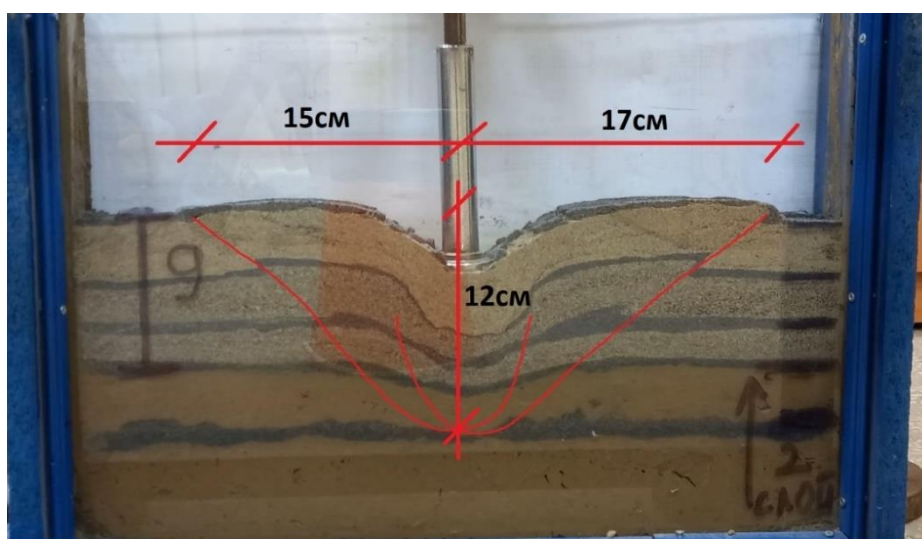
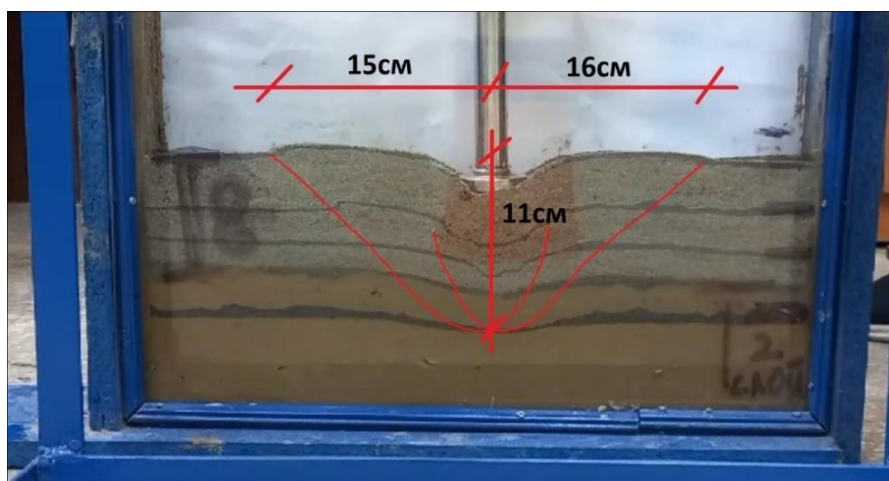
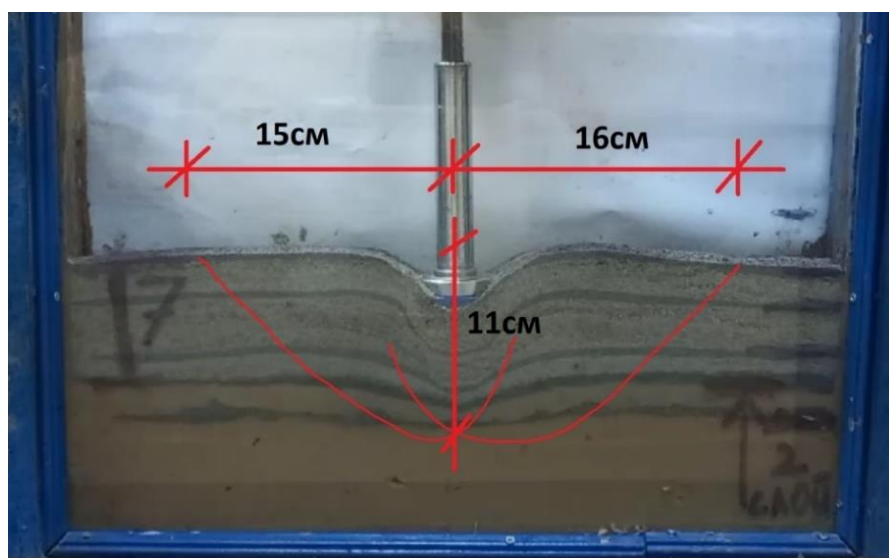


Рис. 3. Испытания после потери несущей способности основания (начало):
а – № 1 ($H = 12$ см, $H/B = 2,4$); б – № 2 ($H = 10$ см, $H/B = 2,0$); в – № 3 ($H = 9$ см, $H/B = 1,8$)

з)



д)



е)

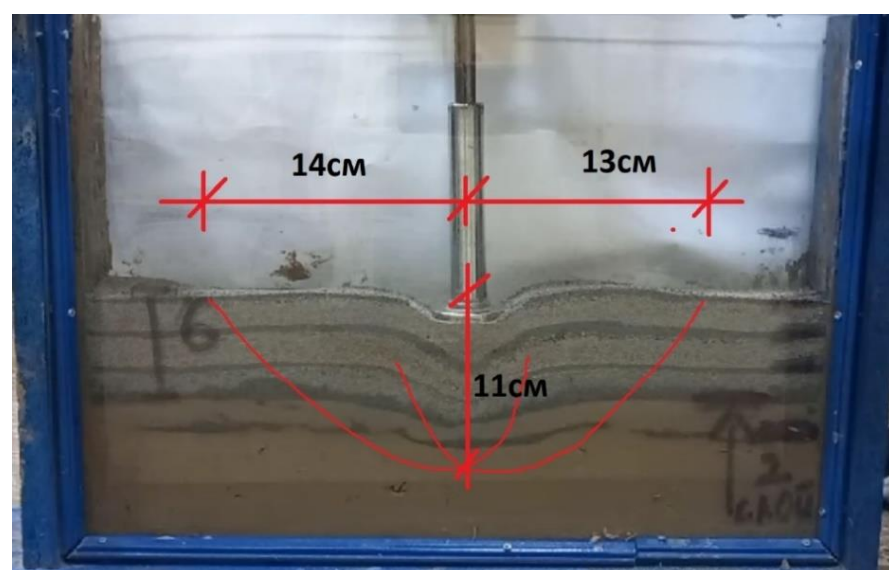


Рис. 3. Испытания после потери несущей способности основания (продолжение):
 з – № 4 ($H = 8$ см, $H/B = 1,6$); д – № 5 ($H = 7$ см, $H/B = 1,4$); е – № 6 ($H = 6$ см, $H/B = 1,2$)

жс)

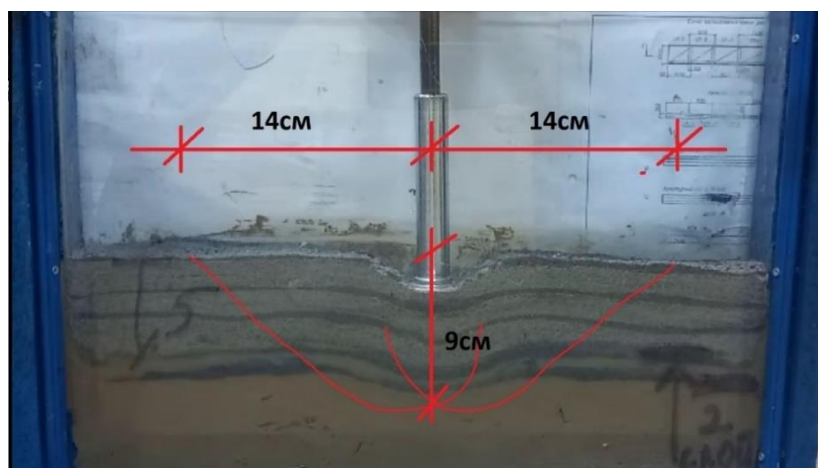


Рис. 3. Испытания после потери несущей способности основания (окончание):
жс – № 7 ($H = 5$ см, $H/B = 1,0$)

Испытание № 7 при мощности несущего слоя 5 см ($H/B = 1,0$) показано на рис. 3, жс. При глубине залегания глины $H = 5$ см ($H/B = 1,0$) разрушение основания произошло через два слоя грунта, разрушающая нагрузка составила 200 Н.

В табл. 1 приведены значения перемещений штампа в зависимости от нагрузки для проведенных испытаний с различной глубиной расположения кровли подстилающего слоя H .

Таблица 1

Данные «осадка – нагрузка» проведенных испытаний

Нагрузка, Н	Перемещение штампа, мм, при глубине залегания подстилающего слоя H , см							
	12	10	9	8	7	6	5	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0,23
30	0	0	0	0	0	0	0,11	0,32
40	0	0	0	0	0	0	0,33	0,56
50	0	0	0	0	0	0,34	0,52	0,72
60	0	0	0	0	0,23	0,42	0,63	0,91
70	0	0	0	0,32	0,32	0,53	0,72	1,34
80	0	0	0	0,41	0,41	0,61	0,81	1,55
90	0	0	0,10	0,53	0,64	0,74	1,04	1,82
100	0	0,13	0,20	0,62	0,81	0,85	1,36	2,23
110	0	0,21	0,31	0,71	1,05	1,24	1,85	2,76
120	0,11	0,34	0,43	0,84	1,44	1,85	2,34	3,38
130	0,23	0,55	0,52	0,95	2,01	2,32	2,94	4,07
140	0,32	0,61	0,61	1,16	2,52	2,81	3,57	5,04
150	0,54	0,73	0,74	1,25	3,11	3,36	4,39	6,52
160	0,60	0,85	0,85	1,37	3,74	4,06	5,25	7,61
170	0,75	0,96	0,96	1,44	4,25	4,62	6,14	8,86
180	0,84	1,05	1,07	1,53	5,07	5,63	7,02	–
190	1,01	1,11	1,55	2,06	5,75	6,79	7,91	–
200	1,13	1,24	2,06	3,08	6,61	7,67	9,22	–
210	1,44	1,53	3,01	3,82	7,54	8,68	–	–
220	1,65	1,86	3,82	4,51	8,77	9,73	–	–
230	1,74	2,25	4,51	6,06	11,04	–	–	–
240	1,87	2,67	6,03	7,54	–	–	–	–
250	2,04	3,14	7,52	12,00	–	–	–	–
260	2,22	3,66	13,03	–	–	–	–	–
270	2,43	4,34	–	–	–	–	–	–
280	2,62	6,22	–	–	–	–	–	–
290	3,03	9,24	–	–	–	–	–	–
300	6,23	14,03	–	–	–	–	–	–
310	15,01	–	–	–	–	–	–	–

Теперь по имеющимся значениям перемещений от нагрузки построим график зависимости «осадка – нагрузка» для разной глубины заложения слабого подстилающего слоя (рис. 4). Сводный результат значений несущей способности двухслойного основания приведен в табл. 2.

В работе [9] было предложено оценивать влияние подстилающего слоя на несущую способность двухслойного основания с помощью коэффициента влияния k_l , в зависимости от величины относительной глубины положения кровли подстилающего слоя $l = H/B$:

$$k_l = \frac{p_l - p_2}{p_1 - p_2},$$

где p_l – несущая способность двухслойного основания; p_1, p_2 – несущая способность однородного основания, сложенного грунтом 1 и 2 соответственно.

По имеющимся значениям несущей способности, представленным в табл. 2, были определены опытные значения коэффициента влияния по приведенной выше формуле. Далее по методике, изложенной в работе [9], для исходных данных проведенных испытаний были рассчитаны теоретические значения этого коэффициента (табл. 3).

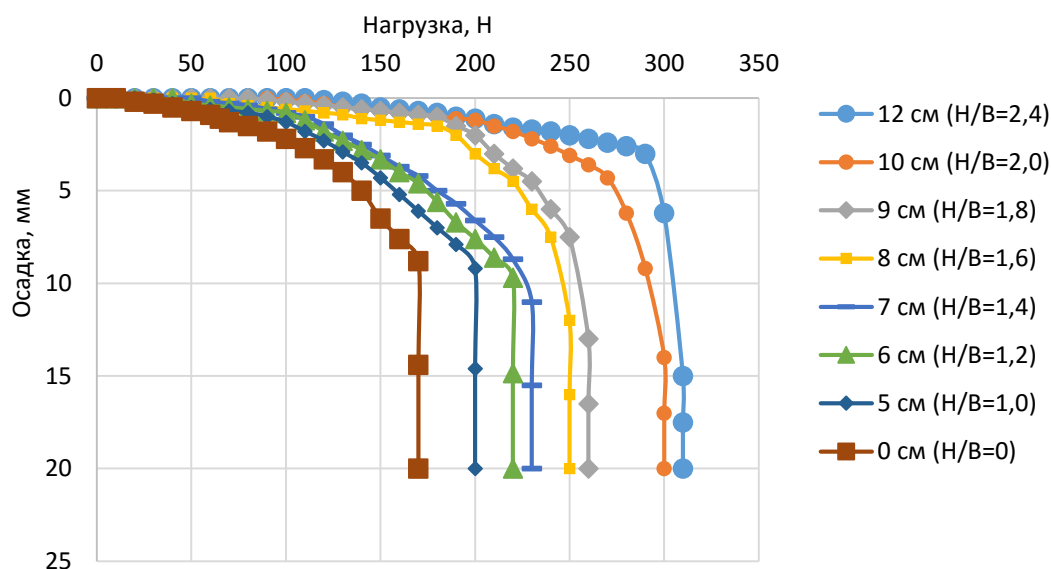


Рис. 4. Зависимость осадки основания от нагрузки при разной глубине заложения слабого подстилающего слоя

Таблица 2

Значения несущей способности двухслойного основания при разной глубине залегания слабого подстилающего слоя

H/B	2,4	2	1,8	1,6	1,4	1,2	1	0
P_u , Н	310	300	260	250	230	220	200	170

Таблица 3

Опытные и теоретические значения коэффициента влияния при разной глубине залегания слабого подстилающего слоя

$l = H/B$	Коэффициент влияния		Расхождение, %
	Опытные данные	Теоретический расчет	
2,40	1,00	1,00	0,00
2,00	0,93	0,86	7,59
1,80	0,64	0,70	–9,11
1,60	0,57	0,56	2,29
1,40	0,43	0,43	–0,10
1,20	0,36	0,32	11,39
1,00	0,21	0,22	–3,30
0,00	0,00	0,00	0,00

На рис. 5 представлен сопоставительный график изменения опытных и теоретических значений коэффициента влияния в зависимости от относительной глубины расположения кровли подстилающего слоя l . Из графика следует, что разработанный теоретический метод [7–9] достаточно приближен к результатам, полученным опытным путем.

Аналогичная картина уменьшения несущей способности двухслойного основания

при изменении глубины залегания слабого подстилающего слоя представлена в статье [10]. В ней авторы проводили полевые испытания, в которых в качестве подстилающего слоя также была глина, а в качестве несущего слоя – песок, диаметр штампа равнялся 150 мм. График зависимости осадки основания от нагрузки при разной глубине заложения слабого подстилающего слоя для данных полевых испытаний представлен на рис. 6.

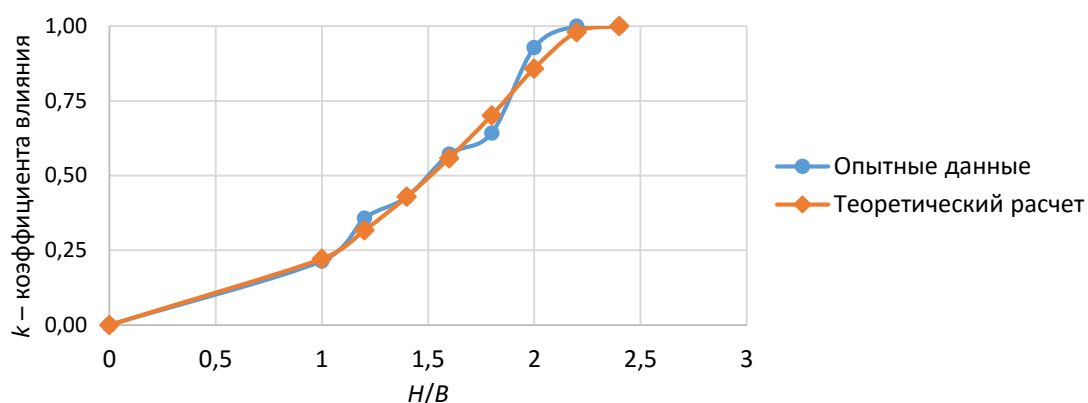


Рис. 5. Зависимость коэффициента влияния от относительной глубины заложения слабого подстилающего слоя

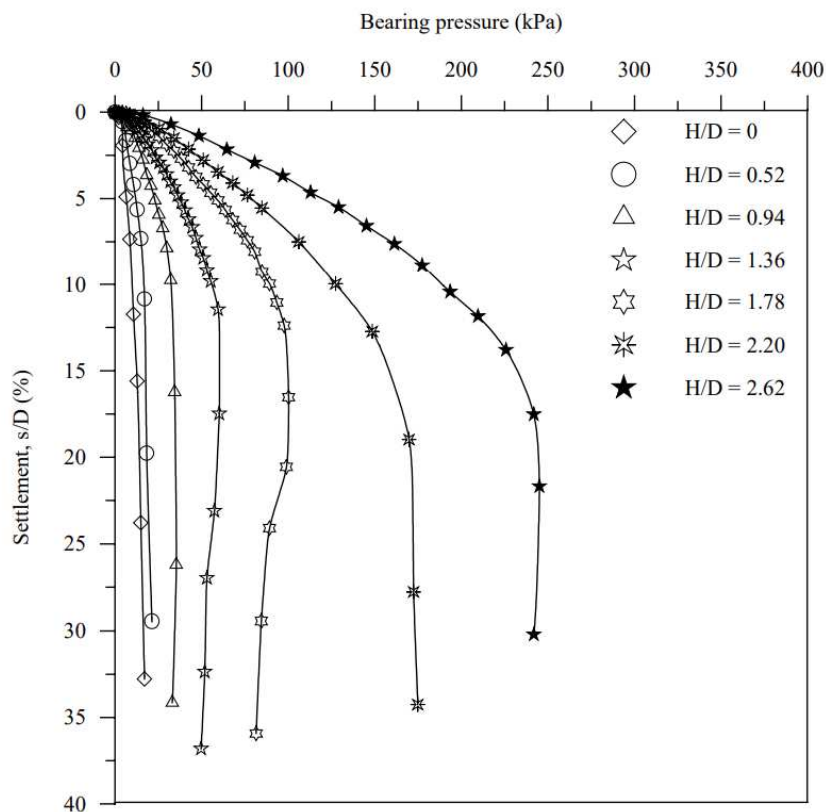


Рис. 6. Зависимость осадки основания от нагрузки при разной глубине заложения слабого подстилающего слоя (полевые испытания) [10]

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. При определенной глубине заложения слабый подстилающий слой перестает влиять на несущую способность основания и разрушение происходит только в верхнем несущем слое грунта. Это можно видеть на рис. 3, в и 4 при глубине заложения подстилающего слоя $H = 12$ см ($H/B = 2,4$).

2. Также на рис. 3, в–ж отражено, что линия скольжения, по которой происходит разрушение основания, начинает проходить через два слоя. Причем она начинает проходить через подстилающий слой при глубине его заложения 9 см, а когда разрушение происходило только в несущем слое, глубина выпора была равна 5 см (см. рис. 3, а). Это означает, что слабый подстилающий слой начинает уменьшать несущую способность двухслойного основания еще до того, как глубина его залегания подойдет к глубине выпора однородного несущего слоя.

3. По графику, изображенному на рис. 5, видно, что коэффициенты влияния, полученные по опытным данным и определенные разработанным теоретическим расчетом, достаточно близки, что говорит о корректности предлагаемого метода.

4. График, изображенный на рис. 4, отражает следующую зависимость: чем меньше глубина заложения подстилающего слоя, тем меньше несущая способность двухслойного основания. Это также подтверждается полевыми испытаниями других авторов (см. рис. 6).

5. Рисунок 3, в–ж позволяет сделать вывод, что при увеличении глубины заложения слабого подстилающего слоя линия скольжения, определяющая область выпора, также заглубляется, захватывая часть слабого слоя до некоторой критической глубины, в нашем случае равняющейся 12 см (см. рис. 3, в). Данный факт подтверждает теоретическое решение, основанное на применении метода логарифмической спирали для оценки предельной нагрузки, представленное в статьях [7–9].

Список источников

1. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. Москва : Физматгиз, 1960. 240 с.
2. Строганов А. С. Прочность оснований сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1983. № 3. С. 23–27.
3. Соловьев Ю. И. Несущая способность предельно напряженного основания под ленточным фундаментом // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1979. № 4. С. 21–23.
4. Королев К. В. Канонические уравнения статике сыпучей среды при малом влиянии удельного веса грунта и решение задачи Прандтля // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 5. С. 2–6.
5. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений : актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* : с изменениями № 1, 2. Москва : Стандартинформ, 2017. 220 с.
6. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общей редакцией В. А. Ильичева и Р. А. Мангушева. 2-е издание, дополненное и переработанное. Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2016. 1024 с.
7. Караулов А. М., Королев К. В., Шохирев М. В. Оценка несущей способности двухслойных грунтовых оснований // Известия вузов. Строительство. 2020. № 11. С. 18–27.
8. Шохирев М. В. Метод определения несущей способности двухслойного основания // Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий : материалы II Всероссийской конференции с международным участием. Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. С. 117–131.
9. Шохирев М. В. К методике расчета несущей способности двухслойных оснований // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (62). С. 57–66.
10. Dash Sujit Kumar, Sireesh S., Sitharam T. G. Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay // Geotextiles and Geomembranes. 2003. Vol. 21. P. 197–219.

References

1. Sokolovsky V. V. Granular medium statics. Moscow: Fizmatgiz; 1960. 240 p. (In Russ.).
2. Stroganov A. S. The strength of the foundations of structures. *Base, Foundations and Soil Mechanics*. 1983;(3):23–27. (In Russ.).
3. Solovlev Yu. I. The bearing capacity of an extremely stressed base under a continuous footing. *Bases, Foundations and Mechanics of Soils*. 1979;(4):21–23. (In Russ.).
4. Korolev K. V. Canonical equations of static granular medium with a small influence of the specific weight of the soil and the solution of the problem Prandtl. *Bases, Foundations and Mechanics of Soils*. 2012;(5):2–6. (In Russ.).
5. SP 22.13330.2016. Foundations of buildings and structures: updated version of SNiP 2.02.01-83*: with amendments No. 1, 2. Moscow: Standardinform; 2017. 220 p. (In Russ.).
6. Directory of geotechnical engineering. Bases, foundations and underground structures. Under the general editorship of V. A. Ilyichev and R. A. Mangushev. 2nd edition supplemented and revised. Moscow: Publishing House of the Association of Construction Universities; 2016. 1034 p. (In Russ.).
7. Karaulov A. M., Korolev K. V., Shokhirev M. V. Assessment of the bearing capacity of two-layer soil foundations. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020;(11):18–27. (In Russ.).
8. Shokhirev M. V. Method for determining the bearing capacity of a two-layer foundation. *Foundations of Deep Laying and Problems of Geotechnical Territories. Materials of the II All-Russian Conference with international participation*. Perm: Publishing House of Perm National Research Polytechnic University; 2021. P. 117–131. (In Russ.).
9. Shokhirev M. V. Additions to the method of calculating the load-bearing capacity of two-layer foundations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(62):57–66. (In Russ.).
10. Dash Sujit Kumar, Sireesh S., Sitharam T. G. Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*. 2003;21:197–219.

Информация об авторе

М. В. Шохирев – аспирант кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

M. V. Shokhirev – Post-graduate Student of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 13.10.2023; принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 13.10.2023; accepted for publication 12.01.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 624.012.3/.4
doi 10.52170/1815-9265_2024_68_103

О нормировании надежности раскрытия трещин, нормальных к продольной оси железобетонных изгибаемых элементов, из условия ограничения проницаемости

Евгений Петрович Герасимов

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А. Д. Крячкова,
Новосибирск, Россия, GerasimovEP@mail.ru

Аннотация. Использование вероятностного метода расчета строительных конструкций невозможно, если отсутствует информация о предельных значениях вероятности безотказной работы. Данные значения задаются или определяются дифференцировано, в зависимости от вида расчета – по прочности, по деформациям и т. д. Целью настоящей статьи является установление обоснованного предельного значения вероятности безотказной работы по ширине раскрытия трещин изгибаемых железобетонных конструкций из условия ограничения проницаемости. Рассматривалась только ширина раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента.

Установление предельного значения вероятности безотказной работы выполнено с применением вероятностно-оптимизационного метода, с некоторыми изменениями: вместо начальной стоимости использовалась условная начальная стоимость. Величина экономических последствий была принята как доля от условной начальной стоимости в пределах от 0,1 до 2,0. Вероятность безотказной работы вычислялась в предположении, что все исходные параметры конструкции и внешних воздействий распределены по нормальному закону. Все необходимые исходные данные для расчетов были приняты на основании нормативных документов и научной литературы, посвященной проблеме надежности строительных конструкций.

В результате расчетов были получены предельные значения вероятности безотказной работы в зависимости от продолжительного и непродолжительного раскрытия трещин. Вычисленные значения находятся примерно в пределах от 0,93 до 0,999 в зависимости от величины экономических потерь. От продолжительности ширины раскрытия трещин они не зависят. Полученные значения являются рекомендательными и могут быть использованы при вероятностном методе расчета железобетонных конструкций.

Ключевые слова: изгибаемые железобетонные конструкции, надежность строительных конструкций, вероятностные методы расчета железобетонных конструкций, трещины, проницаемость железобетонных конструкций

Для цитирования: Герасимов Е. П. О нормировании надежности раскрытия трещин, нормальных к продольной оси железобетонных изгибаемых элементов, из условия ограничения проницаемости // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 103–108. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_103.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

On rationing the reliability of crack opening normal to the longitudinal axis of reinforced concrete bent elements from the condition of permeability limitation

Evgeniy P. Gerasimov

Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, Novosibirsk, Russia,
GerasimovEP@mail.ru

Abstract. The use of a probabilistic method for calculating building structures is impossible if there is no information about the maximum values of the probability of failure-free operation. These values are assigned or determined differentially depending on the type of calculation – strength, deformations, etc. The purpose of this article is to establish a reasonable limit value for the probability of trouble-free operation in the width of crack opening of bent reinforced concrete structures from the condition of permeability limitation. Only the opening width of cracks normal to the longitudinal axis of the element was considered.

The establishment of the maximum value of the probability of failure-free operation was carried out using the probabilistic optimization method, with some changes: instead of the initial cost, a conditional initial cost was used. The magnitude of the economic consequences was taken as a fraction of the conditional initial cost in the range from 0.1 to 2.0. The probability of trouble-free operation was calculated on the assumption that all the initial parameters of the design and external influences are distributed according to the normal law. All the necessary initial data for calculations were adopted on the basis of regulatory documents and scientific literature devoted to the problem of reliability of building structures.

As a result of calculations, the maximum values of the probability of trouble-free operation were obtained, depending on the long and short crack opening. The calculated values are approximately in the range from 0.93 to 0.999, depending on the magnitude of economic losses. The values do not depend on the duration of the crack opening width. The obtained values are recommendations that can be used in the probabilistic method of calculating reinforced concrete structures.

Keywords: bent reinforced concrete structures, reliability of building structures, probabilistic methods of calculation of reinforced concrete structures, cracks, permeability of reinforced concrete structures

For citation: Gerasimov E. P. On rationing the reliability of crack opening normal to the longitudinal axis of reinforced concrete bent elements from the condition of permeability limitation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):103–108. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_103.

Введение

Проницаемость железобетона – это его способность пропускать через себя газы и жидкости при определенном давлении. Из условия ограничения проницаемости железобетонных конструкций нормы [1] установили предельно допустимые значения ширины раскрытия трещин 0,2 и 0,3 мм при продолжительном и непродолжительном раскрытии соответственно. Можно отметить, что данные значения были назначены на основании:

- ограничения фильтрационного расхода жидкости через трещину [2];
- ограничения выщелачивания извести в бетоне [3].

Для того чтобы конструкция была пригодна к эксплуатации, необходимо выполнение условия

$$a_{crc} \leq a_{crc,ult}, \quad (1)$$

где a_{crc} – ширина раскрытия трещины от действия внешней нагрузки; $a_{crc,ult}$ – предельно допустимая ширина раскрытия трещины.

При использовании вероятностного метода расчета условие (1) изменится и примет следующий вид [4]:

$$P_f(a_{crc} \leq a_{crc,ult}) \leq [P_f], \quad (2)$$

где $P_f(a_{crc} \leq a_{crc,ult})$ – вероятность того, что ширина раскрытия трещины не превысит допустимого значения; $[P_f]$ – предельное значение вероятности.

Вероятность, входящую в левую часть неравенства, вычислить не представляет большой трудности. Для этого нужно иметь в наличии необходимые статистические данные. Имеются некоторые работы, посвященные вопросам

определения надежности железобетонных конструкций по трещиностойкости [5, 6].

Установление значения предельной вероятности встречает определенные трудности, связанные с последствиями отказа. Некоторые авторы предлагают принимать численные значения предельной вероятности при выполнении расчетов по второй группе предельных состояний, в диапазоне от 0,9 до 0,999 [7–10]. При этом данные значения определены на основании опыта проектирования и относятся ко всем расчетам, без разделения их по видам – по образованию трещин, по ширине их раскрытия и по деформациям. Было бы правильно устанавливать по каждому виду расчетов свои численные значения предельной вероятности, как это представлено в ряде работ [4, 10].

Цель исследования – определить значения предельной вероятности безотказной работы по ширине раскрытия трещин, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных конструкций, только из условия ограничения проницаемости.

Материалы и методы исследования

Вопрос о численном значении предельной вероятности связан с последствиями отказа. Нарушение условия (2) влечет за собой, как правило, только экономические последствия. В связи с этим для определения значения предельной вероятности воспользуемся вероятностно-оптимизационной моделью [11]:

$$C = C_0 + C_f Q_f \rightarrow \min, \quad (3)$$

где C_0 – начальная стоимость конструкции; C_f – экономические потери в случае наступления отказа; Q_f – вероятность отказа.

Начальная стоимость включает в себя такие расходы, как стоимость материалов, электроэнергии и т. д. Для железобетонных конструкций арматура является ключевым материалом, от которого зависит трещиностойкость. Поэтому при определении значения предельной вероятности предлагается варьировать диаметр арматурных стержней. От диаметра арматуры зависит ее масса, стоимость, а следовательно и стоимость конструкции.

Стоимость арматуры не является какой-либо постоянной величиной. Обзор стоимости арматурных стержней в России показал, что разные организации предлагают разные цены (табл. 1).

Как видно, с увеличением диаметра возрастает масса стержней и, следовательно, стоимость арматуры и конструкции.

При определении значения предельной вероятности начальную стоимость конструкции примем равной условной величине – условной начальной стоимости конструкции. Если предположить, что конструкция будет армирована одним продольным стержнем диаметром 6 мм, то за условную начальную стоимость примем величину $C_0 = 1$. При замене стержня другим условная начальная стоимость конструкции будет увеличиваться. При этом примем тот факт, что остальные стои-

мостные показатели (стоимость бетона, электроэнергии и т. д.) остаются такими же.

Зависимость условной начальной стоимости конструкции от диаметра арматурного стержня представлена на рисунке.

Величина экономических потерь в случае отказа включает в себя стоимость ремонта конструкции. Больших экономических потерь в случае нарушения проницаемости, как правило, ожидать не приходится, хотя не исключены потери, связанные с остановкой производства. Обзор некоторых организаций России, специализирующихся на ремонте железобетонных конструкций, показал, что стоимость ремонта (заделка трещин, выполнение гидроизоляции) является не очень большой величиной и редко превышает стоимость самой конструкции. При определении значения предельной вероятности величину C_f примем как долю от условной начальной стоимости в нескольких вариантах: 0,1; 0,2; 1,0 и 2,0.

Вероятность отказа Q_f определяется через индекс надежности β [4]:

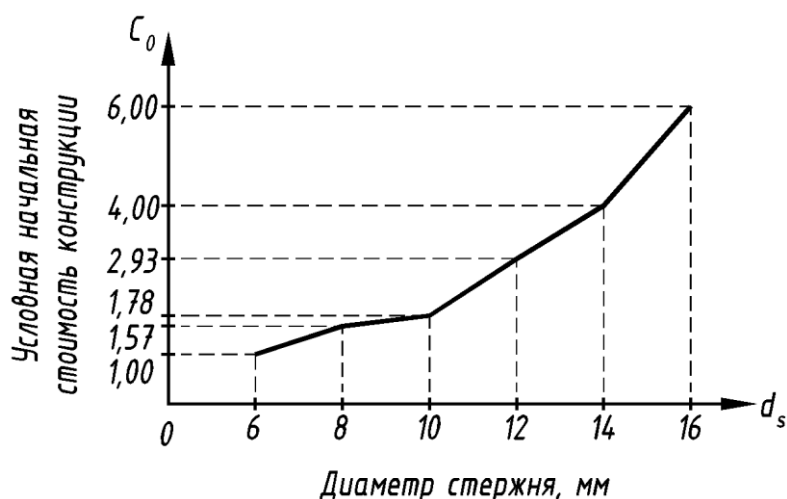
$$\beta = \frac{a_{crc,ult} - \bar{a}_{crc}}{\sqrt{S_{a_{crc,ult}}^2 + S_{\bar{a}_{crc}}^2}} = \frac{a_{crc,ult} - \bar{a}_{crc}}{S_{\bar{a}_{crc}}} = \frac{a_{crc,ult} - \bar{a}_{crc}}{\bar{a}_{crc} v_{\bar{a}_{crc}}}, \quad (4)$$

Таблица 1

Стоимость 1 м арматуры класса А400 в зависимости от ее диаметра*

Диаметр стержня, мм	6	8	10	12	14	16
Стоимость, р.	14	22	25	41	56	84

* По данным крупной российской компании.



Зависимость условной начальной стоимости конструкции от диаметра арматурного стержня

где \bar{a}_{crc} – среднее значение ширины раскрытия трещины; $S_{a_{crc,alt}}$ – среднее квадратическое отклонение предельно допустимой ширины раскрытия трещины; $S_{\bar{a}_{crc}}$ – среднее квадратическое отклонение значения ширины раскрытия трещины; $v_{\bar{a}_{crc}}$ – коэффициент вариации ширины раскрытия трещины.

Формула для определения ширины раскрытия трещины, нормальной к продольной оси элемента, имеет вид

$$a_{crc} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s, \quad (5)$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – коэффициенты, учитывающие продолжительность действия нагрузок, профиль арматуры и характер нагружения; ψ_s – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительной деформации растянутой арматуры между трещинами; σ_s – напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении; E_s – модуль упругости арматуры; l_s – базовое расстояние между нормальными трещинами.

После преобразования формула (5) примет следующий вид:

$$a_{crc} = 2,5 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s \frac{MA_{bt}}{h_0 \pi^2 d_s^3 E_s}, \quad (6)$$

где M – изгибающий момент от внешней нагрузки; A_{bt} – площадь сечения растянутого бетона; h_0 – рабочая высота сечения; d_s – диаметр арматурного стержня.

Так как при определении значения предельной вероятности предлагается варьировать диаметр стержня, то выражение (6) можно записать в следующем виде:

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{2,5 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s M A_{bt}}{h_0 \pi^2 a_{crc} E_s}}. \quad (7)$$

В выражении (7) изгибающий момент, площадь сечения растянутого бетона и рабочая высота сечения остаются величинами неизменными. Соотношение $\frac{MA_{bt}}{h_0}$ можно определить в предположении, что трещина будет иметь максимальную ширину раскрытия при минимальном диаметре стержня ($d_s = 6$ мм).

Тогда, применяя численные значения коэффициентов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и ширины раскрытия

трещин, приведенные в [1], а также $\psi_s = 0,891$ и $E_s = 1\,913\,000$ кг/см² [12], получаем:

– при непродолжительном раскрытии трещин

$$\begin{aligned} d_s &= \sqrt[3]{\frac{2,5 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s M A_{bt}}{h_0 \pi^2 a_{crc} E_s}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow 0,6 = \sqrt[3]{\frac{2,5 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 0,891 M A_{bt}}{h_0 \cdot 3,14^2 \cdot 0,03 \cdot 1\,913\,000}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{MA_{bt}}{h_0} = 109\,739 \text{ кг} \cdot \text{см}^2; \end{aligned}$$

– при продолжительном раскрытии трещин

$$\begin{aligned} d_s &= \sqrt[3]{\frac{2,5 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s M A_{bt}}{h_0 \pi^2 a_{crc} E_s}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow 0,6 = \sqrt[3]{\frac{2,5 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 0,891 M A_{bt}}{h_0 \cdot 3,14^2 \cdot 0,02 \cdot 1\,913\,000}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{MA_{bt}}{h_0} = 52\,256 \text{ кг} \cdot \text{см}^2. \end{aligned}$$

Коэффициент вариации ширины раскрытия трещины в формуле (4) вычисляется по выражению, приведенному в [4]:

$$v_{\bar{a}_{crc}} = \sqrt{v_q^2 + v_{E_s}^2 + v_{\psi_s}^2},$$

где v_q – коэффициент вариации нагрузок; v_{E_s} – коэффициент вариации модуля упругости арматуры (при расчете было принято $v_{E_s} = 0,1$ [12]); v_{ψ_s} – коэффициент вариации, учитывающий неравномерное распределение относительной деформации растянутой арматуры между трещинами (при расчете было принято $v_{\psi_s} = 0,047$ [12]).

Нагрузка, действующая на конструкцию, включает в себя постоянную и временную. Изменчивость нагрузок очень большая, поэтому при расчете было принято, что $v_q = 0,2$ [13].

Тогда, с учетом значений коэффициентов вариации, коэффициент вариации ширины раскрытия трещины составит

$$\begin{aligned} v_{\bar{a}_{crc}} &= \sqrt{v_q^2 + v_{E_s}^2 + v_{\psi_s}^2} = \\ &= \sqrt{0,2^2 + 0,1^2 + 0,047^2} = 0,2284. \end{aligned}$$

Результаты исследования

Определение значения предельной вероятности производилось в следующем порядке:

Таблица 2

Результаты расчета

Раскрытие трещин	Доля экономических потерь C_f от условной начальной стоимости C_0	Предельное значение
Продолжительное	0,1	0,9281
	0,2	0,9699
	1,0	0,9982
	2,0	0,9982
Непродолжительное	0,1	0,9446
	0,2	0,9858
	1,0	0,9982
	2,0	0,9982

1. Назначена предельно допустимая ширина раскрытия трещины $a_{crc,ult}$ в зависимости от продолжительности ее раскрытия согласно [1].

2. Задано несколько значений ширины раскрытия трещин \bar{a}_{crc} , при этом $\bar{a}_{crc} < a_{crc,ult}$.

При каждом значении ширины раскрытия трещины определено:

- диаметр продольной арматуры d_s – согласно формуле (7);
- стоимость арматуры в зависимости от полученной величины диаметра (см. табл. 1). При промежуточных значениях стоимость определялась линейной интерполяцией;
- величина C_0 – по графику на рисунке;
- вероятность отказа Q_f .

3. Величина экономических потерь C_f принята как доля от условной начальной стоимости конструкции в нескольких вариантах: 0,1; 0,2; 1,0 и 2,0.

Таким образом, варьируя значения ширины раскрытия трещин и, соответственно, диаметр стержней, можно добиться такого состояния, при котором в формуле (3) $C = \min$. По вероятности отказа определена вероятность безотказной работы, которая принята за предельную.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Выводы

Как показали расчеты, значения предельной вероятности ширины раскрытия нормальных трещин, в зависимости от продолжительности их раскрытия, близки друг к другу. Предельная вероятность не имеет какого-либо конкретного значения, она зависит от величины экономических потерь в случае наступления отказа: чем выше потери, тем значение надежности выше. Причем при доле экономических потерь, равной 1,0 и более от условной начальной стоимости, значение предельной вероятности меняется незначительно.

В практических расчетах значение предельной вероятности по ограничению проницаемости конструкций предлагается принять в диапазоне от 0,95 до 0,999 в зависимости от величины возможных экономических последствий.

В заключение следует отметить, что предложенный в статье порядок определения значения предельной вероятности условен. Ширина раскрытия трещин не так однозначно зависит от диаметра стержня. Эта величина обусловлена параметрами сцепления арматурных стержней с бетоном, которые, в свою очередь, зависят от многочисленных условий. Однако предложенный в статье порядок позволяет более обоснованно определить значение предельной вероятности по ширине раскрытия трещин из условия ограничения проницаемости конструкций.

Список источников

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва : Стандартинформ, 2019. 140 с.
2. Пухонто Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений. Москва : АСВ, 2004. 424 с.
3. Вербецкий Г. П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. Москва : Стройиздат, 1976. 128 с.
4. Герасимов Е. П. О нормировании надежности по раскрытию нормальных трещин изгибаемых железобетонных элементов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25, № 1. С. 142–151.

5. Кошелева Ж. В. Оценка показателя надежности железобетонной балки по трещиностойкости при неполном объеме информации // Вузовская наука – регионам : материалы XVI Всероссийской научной конференции с международным участием (Вологда, 27 февраля 2018 г.). Вологда : Вологодский государственный университет, 2018. С. 20–22.
6. Кошелева Ж. В. Расчет надежности изгибаемой железобетонной конструкции в период эксплуатации // Эффективные строительные конструкции: теория и практика : сборник статей XX Международной научно-технической конференции / под редакцией Н. Н. Ласькова. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2020. С. 75–78.
7. Таль К. Э. Вопросы надежности железобетонных сооружений за рубежом // Бетон и железобетон. 1973. № 11. С. 42–43.
8. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1994. 288 с.
9. Громацкий В. А. Оценка надежности железобетонных изгибаемых элементов по деформациям // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 2. С. 35–40.
10. Коваленко Г. В., Дудина И. В., Нестер Е. В. Вероятностный подход к контролю качества и оценке начальной надежности сборных железобетонных конструкций // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11, № 2. С. 274–283.
11. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. Москва : Стройиздат, 1978. 239 с.
12. Лычев А. С. Надежность строительных конструкций. Москва : АСВ, 2008. 184 с.
13. Мартынов Ю. С., Надольский В. В. Вероятностные модели воздействий для условий Республики Беларусь // Вестник Полоцкого государственного университета. 2014. № 16. С. 13–19.

References

1. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Standartinform; 2019. (In Russ.).
2. Puhonto L. M. Durability of reinforced concrete structures of engineering structures. Moscow: ASV; 2004. 424 p. (In Russ.).
3. Verbetskiy G. P. Strength and durability of concrete in an aqueous environment. Moscow: Stroyizdat; 1976. 128 p. (In Russ.).
4. Gerasimov E. P. Reliability specification of crack opening in flexural reinforced concrete elements. *Journal of Construction and Architecture*. 2023;25(1):142–151. (In Russ.).
5. Kosheleva Zh. V. Evaluation of the reliability index of a reinforced concrete beam by crack resistance with incomplete information. *University Science – by Regions. Materials of the XVI All-Russian Scientific Conference with International Participation*. Vologda: Vologda State University; 2018. P. 22–22. (In Russ.).
6. Kosheleva Zh. V. Calculation of the reliability of a bent reinforced concrete structure during operation. *Effective Building Structures: Theory and Practice. Proceedings of the XX International Scientific and Technical Conference*. Edited by N. N. Laskov. Penza: Privolzhsky House of Knowledge; 2020. P. 75–78. (In Russ.).
7. Tal K. E. Issues of reliability of reinforced concrete structures abroad. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1973;(11):42–43. (In Russ.).
8. Shpete G. Reliability of load-bearing building structures. Moscow: Stroiizdat; 1994. 288 p. (In Russ.).
9. Gromatskii V. A. Evaluation of the reliability of reinforced concrete bending elements by deformations. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2007;(2):35–40. (In Russ.).
10. Kovalenko G. V., Dudina I. V., Nester E. V. Probabilistic approach to quality control and evaluation of the initial reliability of precast concrete structures. *News of Higher Educational Institutions. Investment. Construction. Realty*. 2021;11(2):274–283. (In Russ.).
11. Rzhantsyn A. R. Theory of calculation of building structures for reliability. Moscow: Stroiizdat; 1978. 239 p. (In Russ.).
12. Lychev A. S. Reliability of building structures. Moscow: ASV; 2008. 184 p. (In Russ.).
13. Martinov Y. S., Nadolskiy V. V. Probabilistic impact models for the conditions of the Republic of Belarus. *Bulletin of Polotsk State University*. 2014;(16):13–19. (In Russ.).

Информация об авторе

Е. П. Герасимов – доцент кафедры строительного производства Новосибирского государственного университета архитектуры, дизайна и искусств имени А. Д. Крячкова, кандидат технических наук.

Information about the author

E. P. Gerasimov – Associate Professor of the Construction Production Department, Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 03.10.2023; одобрена после рецензирования 18.10.2023; принята к публикации 15.12.2023.

The article was submitted 03.10.2023; approved after reviewing 18.10.2023; accepted for publication 15.12.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.21

doi 10.52170/1815-9265_2024_68_109

Контролируемые параметры систем мониторинга железнодорожных пролетных строений со сквозными фермами

Евгений Олегович Иванов

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, eo.ivanov@sibgups.ru

Аннотация. Пролетные строения мостов являются важнейшими дорогостоящими элементами транспортной системы, от состояния которых в значительной степени зависит безопасность и бесперебойность работы транспорта. В связи с этим по требованиям современных нормативных документов для больших и внеклассных мостов обязательным мероприятием является мониторинг. Системы мониторинга только начинают активно внедряться, а существующий метод оценки технического состояния по результатам мониторинга требует доработки. В статье исследуются контролируемые параметры систем мониторинга железнодорожных пролетных строений со сквозными фермами на основании расчетного и экспериментального анализа напряженно-деформированного состояния пролетного строения моста через р. Обь в г. Новосибирске. Целью настоящего исследования являлось совершенствование метода оценки технического состояния решетчатых пролетных строений по результатам автоматизированного мониторинга. Для этого были предложены новые контролируемые параметры, способствующие более точному отслеживанию возникновения и развития повреждений в пролетном строении. По результатам проведенного анализа данных, полученных с датчиков напряжений, установленных на Комсомольском мосту через р. Обь в Новосибирске, продемонстрированы преимущества использования инвариантных параметров и напряжений в элементах при пропуске одинаковой нагрузки для оценки состояния мостовых конструкций в рамках систем мониторинга. Результаты исследования подтверждают возможность использования предложенных параметров для повышения точности обнаружения повреждений системой мониторинга, что позволит увеличить безопасность на сети железных дорог. Работа вносит вклад в совершенствование метода оценки состояния железнодорожных пролетных строений по результатам мониторинга. Результаты исследования подтверждают статистическими данными и могут служить основой для совершенствования систем мониторинга, повышения их точности и надежности в прогнозировании технического состояния металлических пролетных строений.

Ключевые слова: система мониторинга, напряженно-деформированное состояние, железнодорожный мост, металлическая ферма, пролетное строение, инвариантные параметры

Для цитирования: Иванов Е. О. Контролируемые параметры систем мониторинга железнодорожных пролетных строений со сквозными фермами // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 109–116. DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_109.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Controlled parameters of monitoring systems for railway bridge superstructures with trusses

Evgeniy O. Ivanov

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia eo.ivanov@sibgups.ru

Abstract. The bridge superstructures are crucial, expensive components of the transportation system, significantly influencing safety and operational continuity. Modern regulations mandate monitoring for large and exceptional bridges. Monitoring systems are just beginning to be actively implemented, and the existing method for evaluating technical condition based on monitoring results needs refinement. This article examines the monitored parameters of railway bridge superstructures with through trusses based on theoretical and experimental analysis of the stressed-deformed state of the bridge superstructure over the Ob River in Novosibirsk. The study aims to improve the method for evaluating the technical condition of lattice superstructures based on automated monitoring results. New monitored parameters were proposed to more accurately track the onset and development of damage in the superstructure. The analysis of data from strain sensors installed on the Komsomolsky Bridge over the Ob River in Novosibirsk demonstrated the advantages of using invariant parameters and stresses in elements under

identical loads for assessing bridge conditions. The study confirms the possibility of using these parameters to enhance the accuracy of damage detection by the monitoring system, thereby increasing railway network safety. This work contributes to the development of methods for assessing the condition of railway superstructures based on monitoring results. The findings are supported by statistical data analysis and can serve as a basis for improving monitoring systems, enhancing their accuracy and reliability in predicting the technical condition of metal superstructures.

Keywords: monitoring system, stress-strain state, railway bridge, metal truss, superstructure, invariant parameters

For citation: Ivanov E. O. Controlled parameters of monitoring systems for railway bridge superstructures with trusses. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):109–116. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_109.

Введение

Сети железных дорог России эксплуатируют около 11 тысяч металлических пролетных строений, которые являются важнейшими дорогостоящими элементами транспортной системы [1]. Наиболее распространенный тип пролетных строений для больших и внеклассных мостов – решетчатые конструкции. Безопасность и бесперебойность работы транспорта в значительной степени зависит от состояния и надежности этих конструкций. В особенности это актуально при сложившейся ситуации, когда эксплуатируют сооружения, запроектированные в разное время под разные нормативные нагрузки, многие из которых уже подходят к границе своего нормативного срока службы и не обеспечивают пропуск поездов без ограничения скорости движения. Современная организация содержания не в полной мере обеспечивает безопасность их эксплуатации, так как между осмотрами изменение технического состояния оказывается неизвестным, а по результатам обследований периодически выявляют сооружения в неудовлетворительном и даже предаварийном состоянии [2]. В связи с этим по требованиям современных нормативных документов для отмеченных выше пролетных строений, являющихся технически сложными объектами, обязательным мероприятием является мониторинг [3, 4].

Сейчас системы мониторинга только начинают активно внедряться, выполняются новые научные разработки для их совершенствования [5–10]. При этом существующий метод оценки технического состояния по результатам мониторинга, основанный на фиксации превышения контролируемого параметра заданных сигнальных уровней, не в полной мере применим для решетчатых пролетных строений внеклассных железнодорожных

мостов, так как не позволяет отслеживать появление повреждений при низких уровнях воздействия и неудобен из-за непостоянства временных нагрузок.

Выполненное исследование направлено на изучение возможности использования в системах мониторинга новых контролируемых параметров, более точно фиксирующих изменение состояния сооружений.

Материалы и методы исследования

В работе исследуются показания датчиков напряжений в контрольных элементах системы мониторинга на Комсомольском мосту через р. Обь в г. Новосибирске (рис. 1). Данная система была разработана и установлена ФГУП «ЗащитаИнфоТранс» Минтранса при участии специалистов СибНИИ мостов СГУПС. Контрольные элементы для опытной системы мониторинга были выбраны по предложенному автором алгоритму определения наиболее чувствительных к повреждениям элементов, приведенному в статье [11]. В качестве контрольных элементов в данной системе мониторинга используются элементы в панели 7–8: верхний и нижний пояса, раскос.

На рис. 2 показана архитектура опытной системы мониторинга. Она включает комплекс измерительного, телекоммуникационного и системного оборудования, смонтированного на объекте, а также специальное программное обеспечение.

Работоспособность системы испытана путем проведения специальных испытаний. Достоверность получаемых в опытной системе мониторинга напряжений была подтверждена параллельными измерениями, выполненными с применением сертифицированного и поверенного оборудования системы «Тензор МС», а также дополнительными измерениями с помощью деформометров. Таким образом была

выполнена валидация опытной системы мониторинга. Примеры полученных тензограмм напряжений показаны на рис. 3.

При испытаниях системы сравнение фактических значений контролируемых параметров со значениями, полученными по результатам численного моделирования, проводилось при проездах одиночного локомотива 2ЭС6. Таким образом была проведена апробация конечно-элементной модели, получены конструктивные коэффициенты элементов, с помощью которых

были уточнены сигнальные уровни срабатывания системы. Результаты испытаний опытной системы мониторинга приведены в таблице.

Результаты исследования

При проведении исследований было выявлено, что наиболее показательными с точки зрения оценки технического состояния будут изменения напряжений или перемещений при пропуске одинаковой нагрузки (удобнее отслеживать при проездах одинаковых локомо-

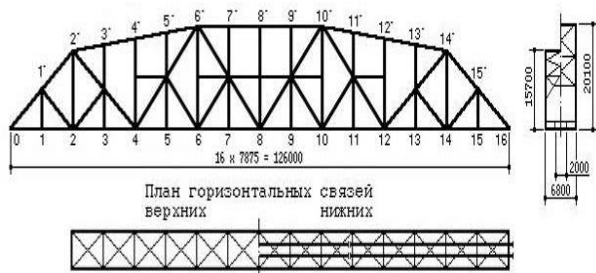


Рис. 1. Комсомольский мост через р. Обь в г. Новосибирске

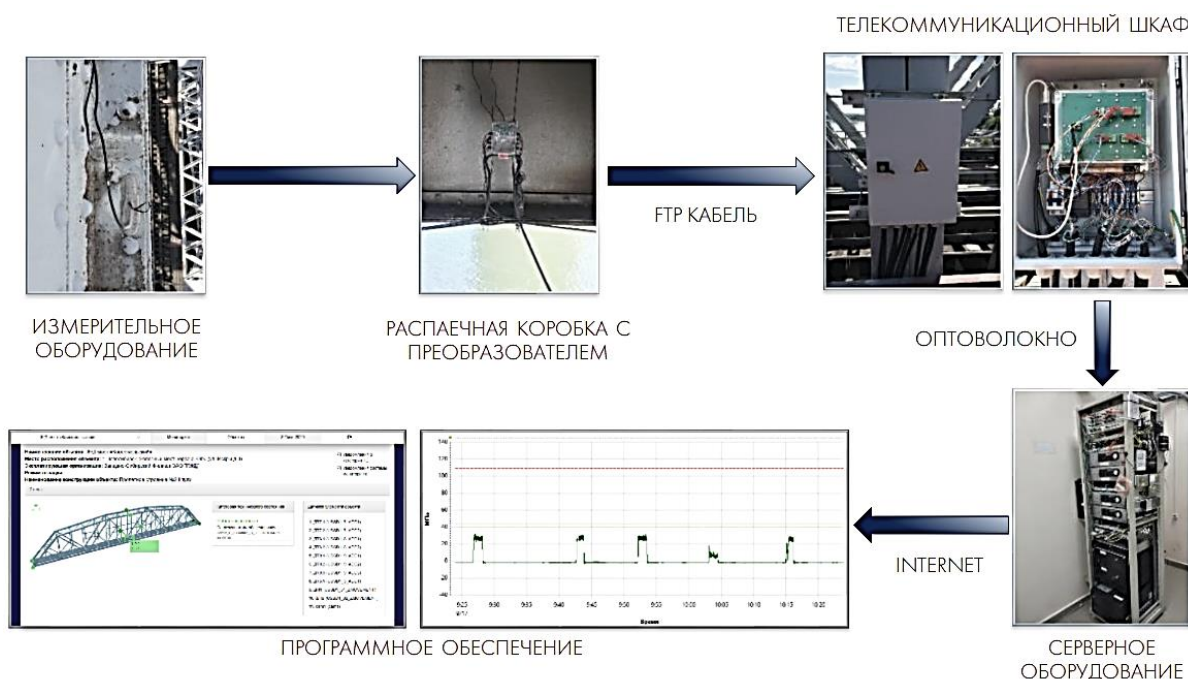


Рис. 2. Архитектура системы мониторинга

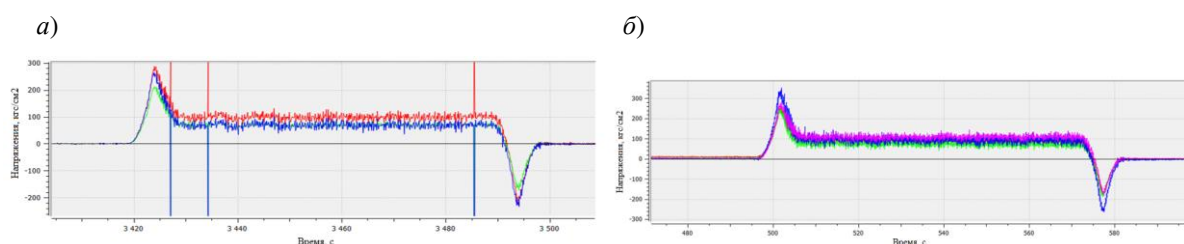


Рис. 3. Тензограммы напряжений в раскосе пролетного строения:
а – опытная система мониторинга; б – «Тензор МС»

Результаты испытаний опытной системы мониторинга

Наименование и местоположение пункта	Фактическое напряжение, МПа	Расчетное напряжение, МПа	Конструктивный коэффициент K_k
T1: ПФ, ВП 7'–8'	–11,6	–18,76	0,62
T2: ЛФ, ВП 7'–8'	–11,68	–18,71	0,62
T3: ПФ, НП 7–8	12,65	14,52	0,87
T4: ЛФ, НП 7–8	11,28	14,65	0,77
T5: ПФ, Р 7''–8	18,13 / –12,87	23,04 / –15,99	0,79 / 0,8
T6: ЛФ, Р 7''–8	18,12 / –13,88	23,11 / –16,62	0,78 / 0,84
T7: ПБ 8	16,45 / –18,15	23 / –24,4	0,63 / 0,82
T8: правая ПрБ 7–8	17,3	29,4	0,59
T9: левая ПрБ 7–8	18,7	28,39	0,66

Примечания: 1. Для раскосов в числителе указаны максимальные напряжения, в знаменателе – минимальные; для поперечной балки в числителе указаны напряжения в нижней полке, в знаменателе – в верхней.

2. Условные обозначения: ПФ, ЛФ – правая и левая ферма; ВП, НП – элементы верхнего и нижнего пояса фермы; Р – раскос фермы; ПБ, ПрБ – поперечная и продольная балка.

тивов), а также инвариантные контролируемые параметры:

- отношение вертикальных перемещений симметричных узлов, в частности узлов по левой и правой фермам пролетного строения;

- отношение напряжений в симметричных элементах (верхний и нижний пояса ферм, левая и правая фермы, начало и конец пролетного строения);

- отношение выкатки опорных частей к температуре металлоконструкций пролетного строения;

- частоты собственных колебаний конструкции при фоновых воздействиях (отсутствие подвижного состава на мосту). Преимущества использования частот колебаний для систем мониторинга мостовых переходов описываются в статьях [12, 13].

В процессе опытной эксплуатации системы для анализа получен большой массив данных с датчиков. Была выполнена статистическая обработка данных, позволяющая в дальнейшем отслеживать изменение технического состояния конструкций. На рис. 4 для примера приведены кривые распределения значений контролируемых параметров (напряжений в контрольных элементах) при проезде одиночных локомотивов 2ЭС6.

На рис. 5 показаны кривые распределения фактических отношений напряжений в элементах пролетного строения по результатам

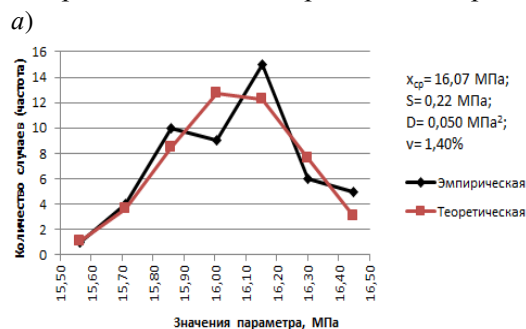
измерений системой мониторинга (инвариантные параметры).

Анализ выборочных совокупностей показывает, что справедливо предположение о распределении значений контролируемых параметров по нормальному закону (критерий согласия Пирсона менее критического значения при уровне значимости 0,05). Коэффициенты вариации для выборок находятся в интервале 1,1...1,7 %, отклонение максимальных и минимальных значений от средних значений выборок составляет 2,6...4,9 %. Результаты статистической обработки позволяют назначать доверительные интервалы с определенной обеспеченностью и отслеживать изменение состояния по выходу контролируемого параметра за границы доверительного интервала.

Выводы

Стандартный подход к системам мониторинга предполагает, что ухудшение технического состояния сооружения определяется по превышению показаний датчика установленным уровням срабатывания системы (предупреждение и тревога), что не в полной мере применимо для решетчатых пролетных строений внеклассных железнодорожных мостов [14]. Такой подход не позволяет отслеживать появление повреждений при низких уровнях воздействия и неудобен из-за непостоянства временных нагрузок.

Предложенные инвариантные параметры



В связи с тем что значение инвариантного

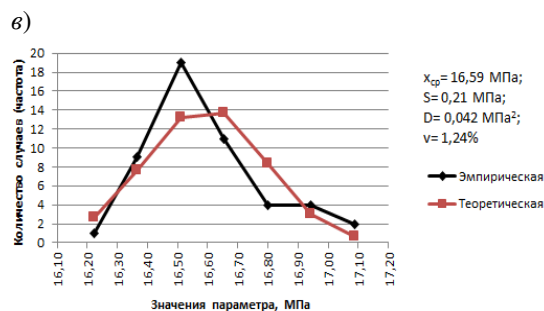
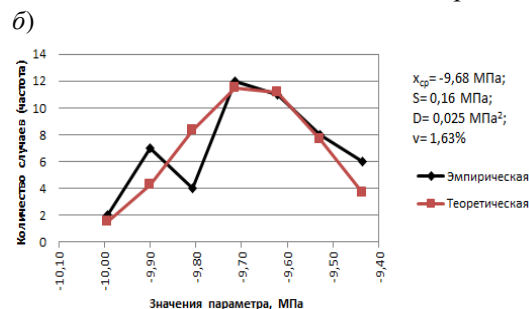


Рис. 4. Кривые распределения напряжений в контрольных элементах при проезде одиночных локомотивов 2ЭС6:

а – нижний пояс; б – верхний пояс; в – продольная балка; г – раскос (на максимум);
 x_{cp} – выборочное среднее значение; S – стандартное отклонение; D – дисперсия; V – коэффициент вариации

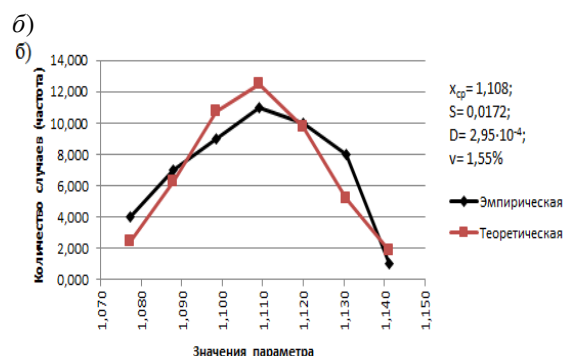
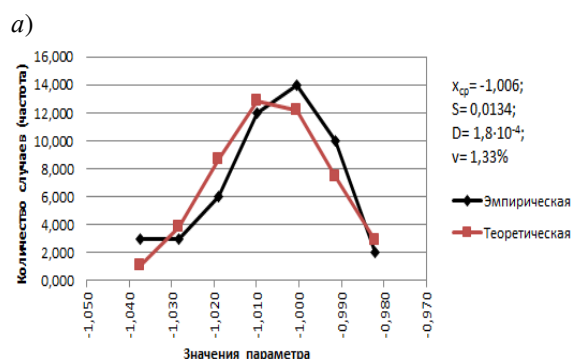


Рис. 5. Кривые распределения инвариантных параметров:

а – отношение напряжений в верхнем поясе к напряжениям в нижнем поясе; б – отношение напряжений в нижнем поясе правой фермы к напряжениям в нижнем поясе левой фермы

позволяют анализировать изменение состояния при любом уровне нагрузки, так как не зависят от него и таким образом являются наиболее показательными с точки зрения изменений технического состояния сооружения. Было выявлено, что при пропуске любой нагрузки значения инвариантного параметра, а также напряжений контрольных элементов в пролетном строении отличаются от среднего исторического значения не более чем на 5 %, что подтверждает расчетные предпосылки о неизменяемости этих параметров при стабильном состоянии сооружения.

параметра постоянно при любой нагрузке, изменение его значения более чем на три величины стандартного отклонения от исторического среднего значения будет служить сигналом возникновения и развития повреждений в сооружении. Аналогичный подход можно использовать при анализе напряжений в элементах при пропуске одинаковой нагрузки. Графическое представление традиционного и предложенных методов фиксации изменения состояния сооружения представлено на рис. 6 и 7.

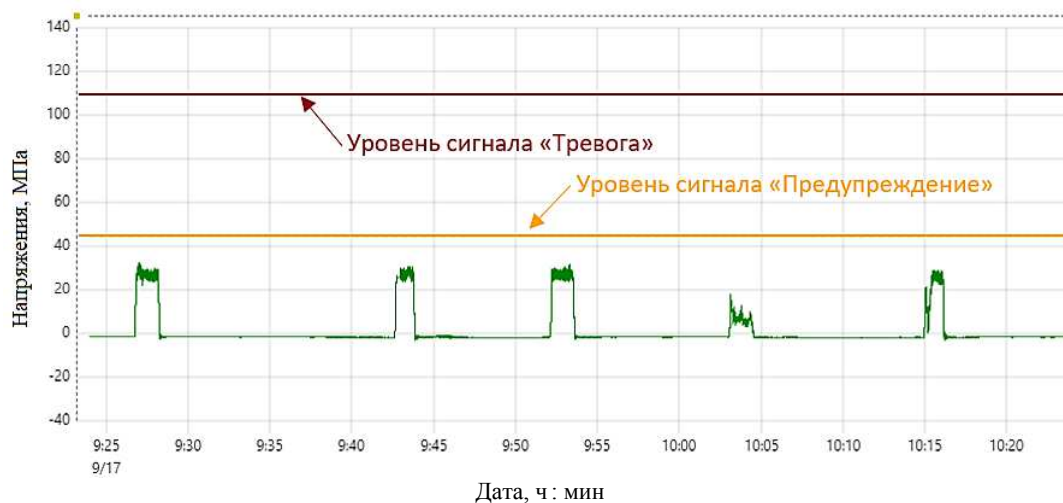
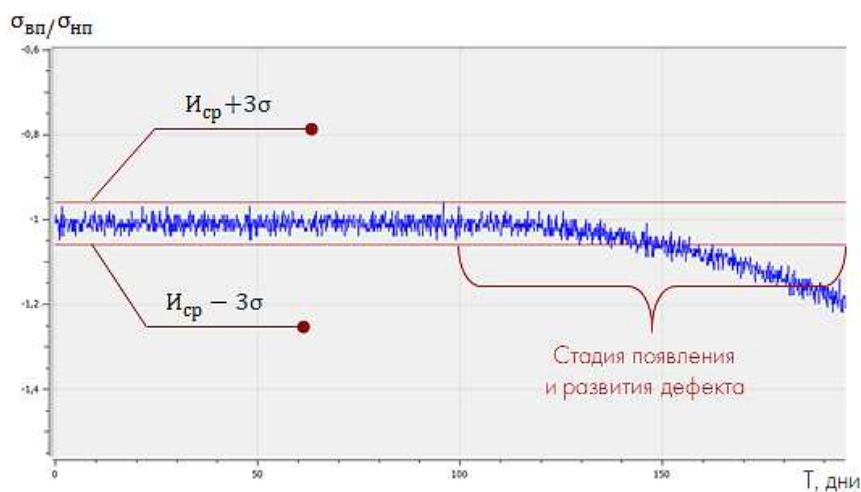


Рис. 6. Традиционный метод фиксации ухудшения технического состояния в системах мониторинга

а)



б)

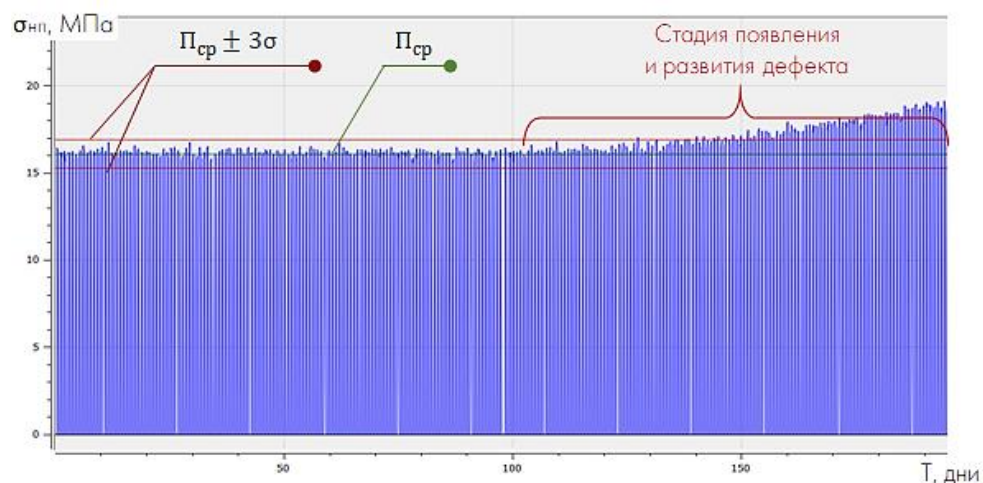


Рис. 7. Предложенные методы фиксации ухудшения технического состояния в системах мониторинга:
а – по изменению значения инвариантного параметра; б – по уровням срабатывания системы мониторинга при пропуске одинаковой нагрузки

Таким образом, в работе доказана возможность использования указанных параметров в системах мониторинга для фиксации изменения состояния сооружения при появлении неисправностей. Применение различных контролируемых параметров в системах монито-

ринга мостов должно быть конструктивно и технологически обоснованным. Особую роль играет учет воздействия временных нагрузок на сооружение, а также крайне важна методика анализа данных с датчиков.

Список источников

1. Жунев К. О., Мурованный Ю. Н., Яшнов А. Н. Исследование усталостной долговечности сварных соединений железнодорожных пролетных строений // Транспортные сооружения. 2020. № 2. URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS220.pdf> (дата обращения: 01.02.2024).
2. Бокарев С. А., Жунев К. О. Особенности и перспективы оценки остаточного ресурса сварных металлических пролетных строений железнодорожных мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 40. С. 30–35.
3. СП 274.1325800.2016. Мосты. Мониторинг технического состояния : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. № 967/пр : дата введения 2017-06-17. Москва : Стандартинформ, 2017. 52 с.
4. ГОСТ 32019–2012. Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений. Правила проектирования и установки стационарных систем (станций) мониторинга : принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и оценке соответствия в строительстве (МНТКС) (протокол от 18 декабря 2012 г. № 41) : дата введения 2014-01-01. Москва : Стандартинформ, 2014. 35 с.
5. Васильев А. И., Хазанов М. Д. Практика мониторинга НДС больших и внеклассных мостов и высотных сооружений // Мир дорог. 2021. № 140. С. 82–83.
6. Яшнов А. Н., Снежков И. И. Развитие систем диагностики и мониторинга мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3. С. 6–13.
7. Яшнов А. Н. Сквозная система мониторинга технического состояния мостов // Новые технологии в мостостроении 2022 : материалы научно-практической конференции / под редакцией В. Н. Смирнова, С. В. Чижова, Д. А. Шестовицкого. Санкт-Петербург, 2022. С. 114–119.
8. Васильев А. И. Мониторинг технического состояния мостовых сооружений : учебное пособие. Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. 120 с.
9. Интегральный мониторинг моста Александра Невского / А. А. Белый, А. А. Белов, А. И. Яценко, А. А. Антонюк // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 45 (71). С. 38–45.
10. Сафронова М. А., Чаплин И. В. Эксплуатационный опыт мониторинга балочных мостов // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2023. № 2 (9). С. 85–95.
11. Иванов Е. О. Выбор контрольных элементов пролетного строения для формирования системы мониторинга // Идея, практика, перспективы : сборник научных трудов национальной (всероссийской) научно-технологической конференции. Новосибирск : Издательство Новосибирского государственного технического университета, 2019. С. 14–17.
12. Крутиков О. В., Гершуни И. Ш., Рыжов Д. И. Оценка форм собственных колебаний пролетных строений моста при мониторинге // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9, № 2. С. 1–23. URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS222.pdf> (дата обращения: 01.02.2024).
13. Long-term static and dynamic monitoring to failure scenarios assessment in steel truss railway bridges: A case study / B. Torres, P. Poveda, S. Ivorra, L. Estevan // Engineering Failure Analysis. 2023. Vol. 152. P. 107435.
14. Яшнов А. Н., Кузьменков П. Ю., Иванов Е. О. Развитие мониторинга технического состояния мостов // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 7. С. 14–18.

References

1. Zhunev K. O., Murovanny Yu. N., Yashnov A. N. Fatigue life research of welded joints in railway spanning structures. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020;(2). (In Russ.). URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS220.pdf>.
2. Bokarev S. A., Zhunev K. O. Features and prospects of assessing the residual life of welded metal span structures of railway bridges. *Bulletin of the Siberian Transport University*. 2017;(40):30–35. (In Russ.).

3. SP 274.1325800.2016. Bridges. Monitoring of the technical condition. Approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation from 16 December 2016 № 967/pr. Introduced on 17.06.2017. Moscow: Standartinform; 2017. 52 p. (In Russ.).
4. GOST 32019-2012. Monitoring of the technical condition of unique buildings and structures. Rules for the design and installation of stationary systems (stations) of monitoring. Adopted by the Interstate Scientific and Technical Commission for Standardization, Technical Norming and Conformity Assessment in Construction (Protocol of 18 December 2012 № 41). Introduced on 01.01.2014. Moscow: Standartinform; 2014. 35 p. (In Russ.).
5. Vasiliev A. I., Khazanov M. D. Practice of monitoring the stress-strain state of large and extra-class bridges and high-rise structures. *Road World*. 2021;(140):82–83. (In Russ.).
6. Yashnov A. N., Snezhkov I. I. Development of diagnostic and monitoring systems for bridges. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(3):6–13. (In Russ.).
7. Yashnov A. N. Comprehensive system for monitoring the technical condition of bridges. *New technologies in bridge construction 2022: Proceedings of the Scientific-Practical Conference*. Edited by V. N. Smirnov, S. V. Chizhov, D. A. Shestovitsky. Saint Petersburg: 2022. P. 114–119. (In Russ.).
8. Vasiliev A. I. Monitoring of the technical condition of bridge structures. Textbook. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University; 2021. 120 p. (In Russ.).
9. Bely A. A., Belov A. A., Yashchenko A. I., Antonyuk A. A. Integral monitoring of the Alexander Nevsky Bridge. *Travel Navigator*. 2020;(71):38–45. (In Russ.).
10. Safronova M. A., Chaplin I. V. Operational experience of monitoring girder structures. *Fundamental and Applied Issues of Transport*. 2023;(9):85–95. (In Russ.).
11. Ivanov E. O. Selection of control elements of the span structure for forming a monitoring system. *Idea, Practice, Perspectives. Proceedings of the National (all-Russian) Scientific-Technological Conference*. Novosibirsk: Publishing house of Novosibirsk State Technical University. 2019. P. 14–17. (In Russ.).
12. Krutikov O. V., Gershuni I. Sh., Ryzhov D. I. Evaluation of the forms of natural vibrations of bridge spans during monitoring. *Transport Structures*. 2022;9(2):1–23. (In Russ.). 10.15862/01SATS222. URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS222.pdf>.
13. Torres B., Poveda P., Ivorra S., Estevan L. Long-term static and dynamic monitoring to failure scenarios assessment in steel truss railway bridges: A case study. *Engineering Failure Analysis*. 2023. Vol. 152. P. 107435.
14. Yashnov A. N., Kuzmenkov P. Yu., Ivanov E. O. Development of bridge technical condition monitoring. *Track and Track Facility*. 2021;(7):14–18. (In Russ.).

Информация об авторе

Е. О. Иванов – инженер Сибирского научно-исследовательского института мостов Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

E. O. Ivanov – Engineer, Siberian Research Institute of Bridges, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 21.02.2024; одобрена после рецензирования 01.03.2024; принята к публикации 04.03.2024.

The article was submitted 21.02.2024; approved after reviewing 01.03.2024; accepted for publication 04.03.2024.

Информация для авторов

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

2. Статья предоставляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (гарнитура Times New Roman, кегль 14 pt; поля: верхнее и нижнее – 20, левое – 30, правое – 10 мм). Файл с текстом статьи должен быть назван фамилией автора (например: Иванов.doc).

3. Статья должна содержать:

- тип статьи (например, научная, обзорная, рецензия);
- УДК;
- название статьи;
- фамилию, имя и отчество каждого автора, место его работы/учебы, город, страну, ученую степень, звание, должность;
- аннотацию на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- библиографический список на русском и английском языках.

4. Список источников составляется в порядке упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Список должен содержать не менее 10 источников, из них собственных статей должно быть не более 30 %.

5. Графический материал должен быть выполнен в графических редакторах, поддерживающих векторную и растровую графику. Иллюстрации должны быть четкими, все подписи на рисунке должны хорошо читаться и иметь расшифровку. Если в тексте есть фотография, отсканированный рисунок, то они обязательно должны быть представлены также отдельным файлом в исходном графическом формате (например: jpeg, tiff).

6. Статья для опубликования в журнале и заявка отправляются по адресу: vestniksgups@sibgups.ru.

7. В редакцию предоставляются оригиналы документов: экспертное заключение о возможности опубликования статьи, статья и заявка.

8. Публикация статей в журнале бесплатная.

Более подробную информацию по вопросам опубликования статей и размещения другой информации в журнале можно найти на сайте издания.



www.stu.ru/science



vestniksgups@sibgups.ru



+7 383 328-04-36



630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук,
191, корп. 3, комн. 307



Главный редактор *А. Л. Манаков*
Заместитель главного редактора *А. Д. Абрамов*
Заместитель главного редактора *С. В. Карасев*
Ответственный секретарь *М. С. Галай*
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*
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 22.03.2024. Дата выхода в свет 25.03.2024
Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 13,8 уч.-изд. л., 14,75 усл.-печ. л. Заказ № 3888

Цена свободная

Отпечатано в издательстве СГУПС.
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
Тел. (383) 328-03-81; e-mail: bvu@stu.ru



Издательство Сибирского государственного
университета путей сообщения

ISSN 1815-9265
Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения
2024. № 1 (68). 1–118