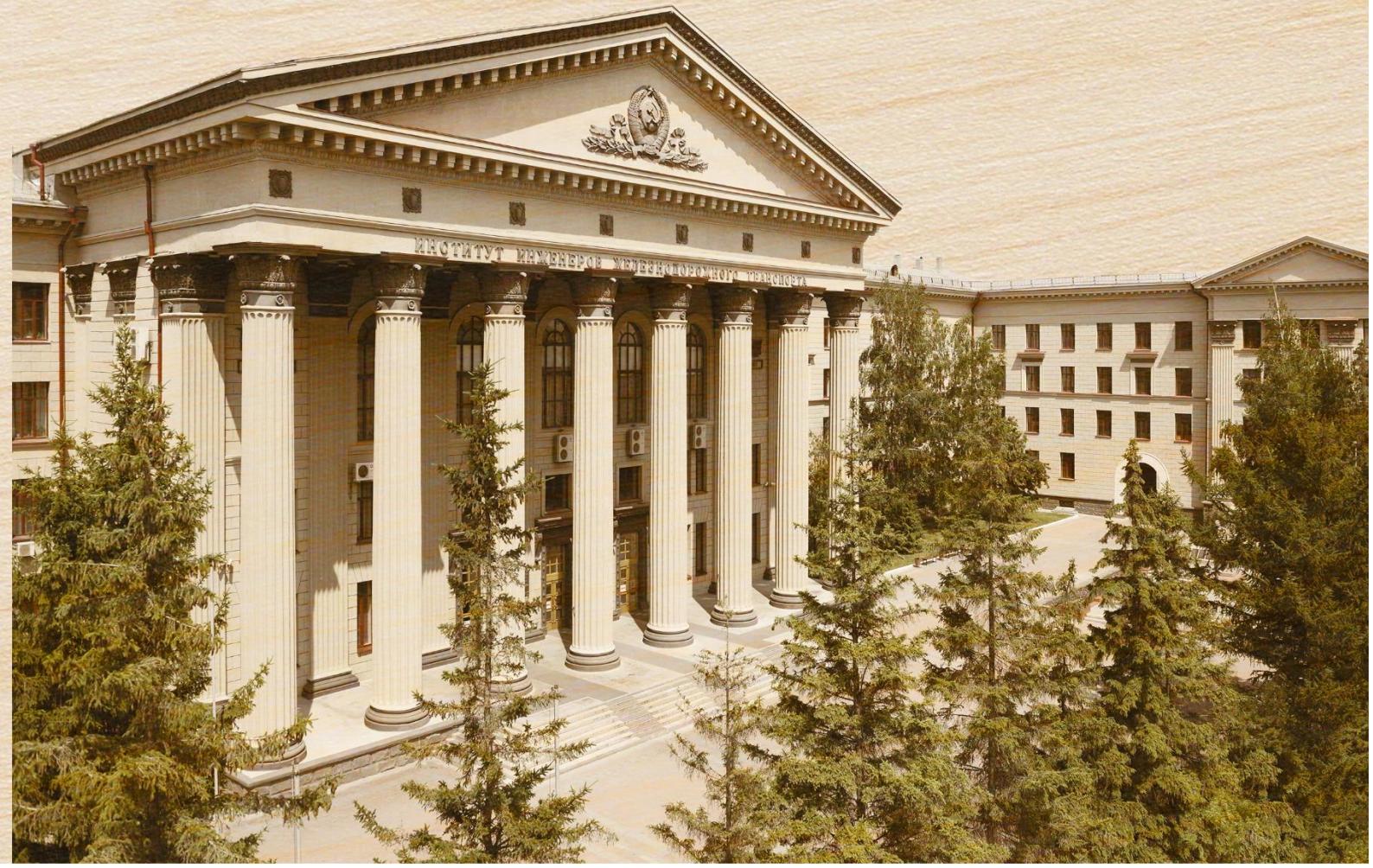


ISSN 1815-9265

# ВЕСТНИК

Сибирского государственного  
университета путей сообщения

№ 3 (70). 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Редактор перевода текста на английский язык**

**Степачкова Ирина Игоревна** – старший преподаватель

**Редактор Е. Е. Рыжкова**

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

**Макет, верстка Ю. В. Борцовой**

**Дизайн обложки А. С. Петренко**

**Сайт журнала:**

[www.stu.ru](http://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. Ilinikh**, Doctor of Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*English Text Reviewer*

**I. Stepachkova**, Senior Lecturer

*Text Reviewer E. E. Ryzhkova*

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

*Layout Designer Yu. V. Bortsova*

*Cover Designer A. S. Petrenko*

**Main contact details**

Siberian Transport University

room 307, 191, Dusi Kovalchuk St.

630049, Novosibirsk, Russia

Phone: (383) 328-04-36

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

E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

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

**ISSN: 1815-9265**

**Вестник  
Сибирского государственного  
университета путей сообщения**

Научно-теоретический  
журнал

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

**№ 3 (70) · ИЮЛЬ – СЕНТЯБРЬ · 16+**

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

---

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Транспорт**

<i>Манаков А. Л., Репях А. Ю.</i> Оценка риска задержки поездов по причине несвоевременной очистки железнодорожных путей станций от снега .....	5
<i>Каштанов А. Л., Комяков А. А., Никифоров М. М., Малышева А. В.</i> Методика оценки технико-экономической эффективности перевода автотракторной техники для работы на природном газе .....	12
<i>Хабаров В. И., Беков М. А., Квашнин В. Е.</i> Критические объекты транспортной инфраструктуры мегаполисов и агломераций .....	20
<i>Осипов Н. И.</i> Формирование многофакторных матриц эксплуатационных показателей при различных вариантах конфигурации однопутного полигона и системах интервального регулирования движения поездов .....	28
<i>Медведев В. И., Бессоненко С. А., Корягин М. Е., Сурков М. Д.</i> Обоснование новой методики прогноза экологических последствий техногенных чрезвычайных ситуаций (пожаров и взрывов) с опасными грузами на железнодорожном транспорте.....	40

**Строительство и архитектура**

<i>Донец А. Н., Ветошкин А. Д., Казанов Л. Е.</i> О взаимодействии речного льда с опорами мостов (обзор) .....	49
<i>Новоселов А. А., Пичкурова Н. С.</i> Исследование влияния геометрии и вида решетки металлической промежуточной опоры ЛЭП на ее прочность, жесткость и устойчивость .....	62
<i>Пичкурова Н. С., Воробьев В. С.</i> Оценка несущей способности железобетонных шпал при строительстве и реконструкции железнодорожного пути .....	71
<i>Попов А. М., Шведов В. Н., Зиновьев В. Б., Герасимов С. И.</i> Прогнозирование глубины забивки нагеля крестообразного сечения огнестрельным методом .....	79
<i>Баранов Т. М., Зайнагабдинов Д. А., Забияка А. А., Фетисов И. А.</i> Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния поврежденных ферм железнодорожного моста .....	87

# The Siberian Transport University Bulletin

A scientific journal

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

Nº 3 (70) · 2024 · July - September · 16+

*Issued quarterly. Established in 1999*

---

## CONTENTS

### Transport

A. L. Manakov, A. Yu. Repyakh. Assessing the risk of train delays due to untimely clearing of railway tracks from snow at stations .....	5
A. L. Kashtanov, A. A. Komyakov, M. M. Nikiforov, A. V. Malysheva. Methodology for assessing technical and economic efficiency of converting automotive equipment to run on natural gas.....	12
V. I. Khabarov, M. A. Bekov, V. E. Kvashnin. Critical objects of transportation infrastructure in megacities and agglomerations .....	20
N. I. Osipov. Formation of operational indicators multi-factor matrices under different variants of single-track polygon configuration and interval train control systems.....	28
V. I. Medvedev, S. A. Bessonenko, M. E. Koryagin, M. D. Surkov. Substantiation of a new methodology for forecasting the environmental consequences of man-made emergencies (fires and explosions) with dangerous goods in railway transport.....	40

### Building and Architecture

A. N. Donets, A. D. Vetoshkin, L. E. Kazanov. On the interaction of river ice with bridge supports (review) .....	49
A. A. Novoselov, N. S. Pichkurova. The influence of the metal intermediate transmission line support geometry and type of grid study on its strength, rigidity and stability .....	62
N. S. Pichkurova, V. S. Vorobyov. Reinforced concrete sleepers bearing capacity assessment during the construction and rehabilitation of railway tracks .....	71
A. M. Popov, V. N. Shvedov, V. B. Zinoviev, S. I. Gerasimov. Predicting the depth of cross-sectional dowel driving by fire method .....	79
T. M. Baranov, D. A. Zainagabdinov, A. A. Zabiyaka, I. A. Fetisov. Experimental stress-strain state research of damaged railway bridge trusses.....	87

# ТРАНСПОРТ

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 5–11.  
The Siberian Transport University Bulletin. 2024. No. 3 (70). P. 5–11.

## ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 625.174

doi 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_5

### Оценка риска задержки поездов по причине несвоевременной очистки железнодорожных путей станций от снега

Алексей Леонидович Манаков<sup>1</sup>, Алексей Юрьевич Репях<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup> Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирское подразделение Западно-Сибирского учебного центра профессиональных квалификаций, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> manakov005@mail.ru

<sup>2</sup> repyakh.alex06@yandex.ru✉

**Аннотация.** В статье проанализированы технологические нарушения, допущенные по причине несвоевременной очистки железнодорожных путей станций от снега. На основе статистических данных построен график зависимости количества нарушений от их продолжительности. Установлено, в Новосибирском регионе за четыре зимних периода с 2019 по 2023 г. около 40 % станций от общего их количества являются метеозависимыми и подвержены риску задержки поездов. Максимальное количество нарушений зафиксировано на станции Обь, при этом максимальная их продолжительность наблюдается на станции Инская.

Основные задачи исследования – оценка риска задержки поездов по причинам, связанным с несвоевременной очисткой железнодорожных путей станций от снега, путем построения матрицы рисков и разработка рекомендаций для его снижения.

Для железнодорожных станций Новосибирского региона Западно-Сибирской железной дороги допустимый уровень риска задержки поездов составил 0,104 поездо-часов в год, что согласуется с нормативными документами. Также определено, что в регионе фактический уровень рисков не превышает допустимого. Построена матрица рисков задержки поездов по причинам, связанным с несвоевременной очисткой железнодорожных путей станций от снега, и определены станции, уровень риска на которых рекомендуется снизить: № 1, 4, 8, 9, 11, 13, 16 и 20.

Для каждого уровня риска разработаны рекомендации, направленные на снижение частоты нарушений и продолжительности задержки поездов. Также удалось определить границы широко приемлемого уровня риска и железнодорожные станции, не требующие разработки краткосрочных мер по снижению риска при наличии нарушений.

**Ключевые слова:** уровень риска, технологические нарушения, очистка станций от снега, железнодорожный путь, матрица рисков

**Для цитирования:** Манаков А. Л., Репях А. Ю. Оценка риска задержки поездов по причине несвоевременной очистки железнодорожных путей станций от снега // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 5–11. DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_5.

## TRANSPORT

Original article

### Assessing the risk of train delays due to untimely clearing of railway tracks from snow at stations

Alexey L. Manakov<sup>1</sup>, Alexey Yu. Repyakh<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup> Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk division of the West Siberian Training Center for Professional Qualifications, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> manakov005@mail.ru

<sup>2</sup> repyakh.alex06@yandex.ru✉

**Abstract.** The article analyzes technological violations committed due to untimely clearing of snow from railway tracks at stations. Based on statistical data, a graph was constructed depending on the number of violations and their duration. It has been established that in the Novosibirsk region over four winter periods from 2019 to 2023,

about 40 % of the total number of stations are weather-sensitive and are at risk of train delays. The maximum number of violations was recorded at Ob station, while their maximum duration was observed at the Inskaya station.

The main objective of the study is to assess the risk of train delays for reasons related to untimely clearing of snow from railway tracks at stations, by constructing a risk matrix and developing recommendations for its reduction.

For the railway stations of the Novosibirsk region of the West Siberian Railway, the acceptable level of risk of train delays was 0.104 (train-hour)/year, which is consistent with regulatory documents. It was also determined that the actual level of risks in the region does not exceed the acceptable level. A matrix of risks of train delays due to reasons related to untimely clearing of snow from the railway tracks of stations has been constructed and stations have been identified whose risk level is recommended to be reduced: No. 1, 4, 8, 9, 11, 13, 16 and 20.

For each risk level, recommendations have been developed aimed at reducing the frequency of violations and the duration of train delays. It was also possible to determine the boundaries of a broadly acceptable level of risk and railway stations that do not require the development of short-term risk reduction measures in the presence of violations.

**Keywords:** level of risk, technological violations, clearing snow from stations, railway track, risk matrix

**For citation:** Manakov A. L., Repyakh A. Yu. Assessing the risk of train delays due to untimely clearing of railway tracks from snow at stations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):5–11. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_5.

## Введение

Железнодорожный транспорт представляет собой совокупность объектов инфраструктуры и подвижного состава, которые вместе формируют систему грузопассажирских перевозок. Надежность перевозочного процесса начинает снижаться при появлении внутренних и внешних рисков, обусловленных человеческими и техническими факторами. Технические факторы фиксируются в виде отказов в Комплексной автоматизированной системе учета, контроля устранения отказов технических средств и анализа их надежности (КАСАНТ), а человеческие – в виде технологических нарушений в Комплексной автоматизированной системе учета, расследования и анализа случаев технологических нарушений (КАСАТ).

Накопленный опыт на железных дорогах России свидетельствует о том, что риски не всегда целесообразно исключать, поскольку это практически невозможно [1]. Например, производитель в конструкторской документации технического средства закладывает определенный уровень надежности его работы с учетом допусков на изготовление, монтаж и эксплуатацию. Так, эталонная контактная сеть на участке постоянного тока Свердловской железной дороги может привести к задержке поездов на 0,0085 ч в год [2]. А в путевом хозяйстве удалось добиться снижения затрат на текущее содержание пути за счет проведения капитального ремонта на участках, срок ремонта на которых по нормативам еще не наступил, но затраты на текущее содержание превышают контрольные значения [3]. Поэтому необходимо определение такого допустимого уровня риска, при котором баланс между последствиями и затратами будет эконо-

мически целесообразным. Такой подход в холдинге ОАО «РЖД» сформулирован в методологии управления ресурсами, рисками и надежностью объектов железнодорожного транспорта на этапах жизненного цикла (система УРРАН).

Применительно к процессу очистки станционных путей от снега повышенный риск задержки поездов возникает при неудовлетворительной организации снегоуборочных работ, которыми руководит дежурный персонал станции. Более 35 % рабочего времени снегоуборочная техника простоявает перед запрещающим сигналом светофора, повышая риск задержки поездов в период снегопада [4]. При этом состояние безопасности процесса очистки путей от снега с точки зрения движения поездов наступает тогда, когда отсутствует недопустимый риск их задержки. Учитывая, что, согласно [5], в состав объекта при оценке риска может входить не только система, подсистема, оборудование, устройство, аппаратура, узел, деталь, элемент, но и человек, который участвует в процессе принятия решений, произведем оценку риска задержки поездов по причине несвоевременной очистки железнодорожных путей станций от снега.

Таким образом, сформулированы главные задачи исследования – оценка риска задержки поездов по причинам, связанным с несвоевременной очисткой железнодорожных путей станций от снега, путем построения матрицы рисков и разработка рекомендаций для его снижения.

## Материалы и методы исследования

Следуя методологии УРРАН, произведем оценку риска задержек поездов для железнодорожных станций, основной причиной которых является несвоевременная очистка путей

от снега и которые произошли вследствие влияния человеческого фактора. В качестве объекта приняты железнодорожные станции Новосибирского региона Западно-Сибирской железной дороги. На основе выгруженных из системы КАСАТ за период с 2019 по 2023 г. технологических нарушений по причинам, связанным с наличием снега на железнодорожном пути, построена гистограмма распределения продолжительности и количества нарушений (рис. 1).

Установлено, что за четыре зимних периода с 2019 по 2023 г. на более 40 % станций от общего их количества в регионе (21 станция из 53) существовал риск задержки поездов, связанный с несвоевременной очисткой путей от снега. По рис. 1 также видно, что максимальное количество нарушений (6) зафиксировано на станции № 13, при этом максимальная их продолжительность (320 мин) наблюдается на станции № 4. Однако проблема в том, что по приведенному графику невозможно определить, какие станции требуют разработки корректирующих мероприятий, направленных на снижение риска задержки поездов, поскольку не заданы допустимые параметры риска.

Разрешить поставленную проблему возможно путем построения матрицы рисков, которая позволит не только установить допусти-

мые границы частот нарушений и их последствий для Новосибирского региона, но и определить фактический уровень риска для конкретной станции.

Используя методики, разработанные для оценки рисков в хозяйстве электроснабжения и хозяйстве автоматики и телемеханики, установим границы рисков для процесса очистки станционных путей от снега [6, 7].

Интенсивность отказов вычисляется по формуле [7]:

$$f = \frac{r}{T_{\text{наб}}}, \quad (1)$$

где  $r$  – количество отказов;  $T_{\text{наб}}$  – интервал наблюдения, принимаемый за зимний сезон или год ( $T_{\text{наб}} = 4$  года).

Поскольку выгрузка задержек поездов в работе [7] произведена из системы КАСАТ, то в формуле (1)  $r$  заменим на количество технологических нарушений  $z$ .

При переходе от объекта к процессу возникает сложность в определении эталонного значения интенсивности нарушений для одной станции, что требуется для установления допустимого уровня риска. Исходя из того что все технологические нарушения произошли вследствие влияния человеческого фактора (низкой квалификации дежурного персонала станции), интенсивность нарушений для эталонной станции может быть рассчитана по формуле



Рис. 1. Гистограмма распределения продолжительности и количества нарушений, допущенных на железнодорожных станциях Новосибирского региона в зимние периоды с 2019 по 2023 г.

$$f_3 = \frac{f}{n_A} k^4, \quad (2)$$

где  $n_A$  – количество эталонных станций в регионе ( $n_A = 53$ );  $k^4$  – коэффициент, учитывающий долю человеческого фактора среди эксплуатационных отказов ( $k^4 = 1,16$  [8]).

Величина ущерба для одного технологического нарушения составит, поездо-ч:

$$c = \frac{c_{\Sigma}}{z}, \quad (3)$$

где  $c_{\Sigma}$  – продолжительность технологических нарушений ( $c_{\Sigma} = 1\ 140$  мин = 19 поездо-ч).

Уровень риска для одной эталонной железнодорожной станции определяется как

$$R_{\text{доп}}^{\text{ст}} = f_3 c. \quad (4)$$

Для железнодорожных станций Новосибирского региона построена матрица рисков задержки поездов по причинам, связанным с несвоевременной очисткой железнодорожных путей станций от снега. При построении матрицы использован принцип ALARP (as low as reasonably practicable), поскольку он учитывает затраты на снижение риска [9].

### Результаты исследования

Интенсивность нарушений среди станций региона определена по формуле (1):

$$f = \frac{47}{4} = 11,75 \text{ год}^{-1}.$$

Интенсивность нарушений для одной эталонной станции по формуле (2) составляет:

$$f_3 = \frac{11,75}{53} \cdot 1,16 = 0,257 \text{ год}^{-1}.$$

Рассчитана по формуле (3) величина ущерба, приходящегося на одно технологическое нарушение:

$$c = \frac{19}{47} = 0,404 \text{ поездо-ч.}$$

По формуле (4) определен уровень риска для эталонной станции за один зимний период (год):

$$R_{\text{доп}}^{\text{ст}} = 0,257 \cdot 0,404 = \\ = 0,104 \text{ поездо-ч/год} \approx 6,2 \text{ поездо-мин/год.}$$

Полученный по формуле (4) уровень риска согласуется с Положением об учете, расследовании и анализе технологических нарушений в перевозочном процессе на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАТ, в котором установ-

лено: задержки пассажирского или пригородного поезда на 6 мин и более относятся к технологическому нарушению 1-й категории [10]. Рассчитанный по формуле (4) уровень риска  $R_{\text{доп}}^{\text{ст}}$  превышен на величину коэффициента, учитывающего долю человеческого фактора, который невозможно исключить из технологического процесса очистки путей от снега.

Следовательно, допустимый уровень риска для Новосибирского региона, состоящего из 53 железнодорожных станций,  $R_{\text{доп}}^{\text{пер}} = 5,512$  поездо-ч/год.

С учетом результатов расчета по формулам (1) и (3) фактический уровень риска задержки поездов в регионе составляет:

$$R = 11,75 \cdot 0,404 = 4,747 \text{ поездо-ч/год.}$$

Несмотря на то что в регионе фактический уровень рисков не превышает допустимого ( $4,747 < 5,512$ ), требуется проверка аналогичного условия применительно к железнодорожным станциям.

На матрице рисков (рис. 2) видно, что все уязвимые в зимний период железнодорожные станции рассматриваемого региона располагаются в двух зонах: широко приемлемого риска ( $R_2, R_3, R_5, R_6, R_7, R_{10}, R_{12}, R_{14}, R_{15}, R_{17}, R_{18}, R_{19}, R_{21}$ ) и приемлемого риска при условии, если затраты на его снижение превысят достигаемые улучшения ( $R_1, R_4, R_8, R_9, R_{11}, R_{13}, R_{16}, R_{20}$ ). Поскольку главной задачей исследования является повышение эксплуатационной надежности работы станции (ближе к 100 %), то для станций, находящихся в зоне приемлемого риска при определенном условии, необходима разработка рекомендаций по его снижению.

Рекомендации по снижению риска задержек поездов, связанного с несвоевременной очисткой железнодорожных путей станций от снега, для каждого уровня риска приведены в таблице.

### Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для железнодорожных станций Новосибирского региона Западно-Сибирской железной дороги с учетом влияния человеческого фактора установлен допустимый уровень риска задержки поездов, связанный с несвоевременной

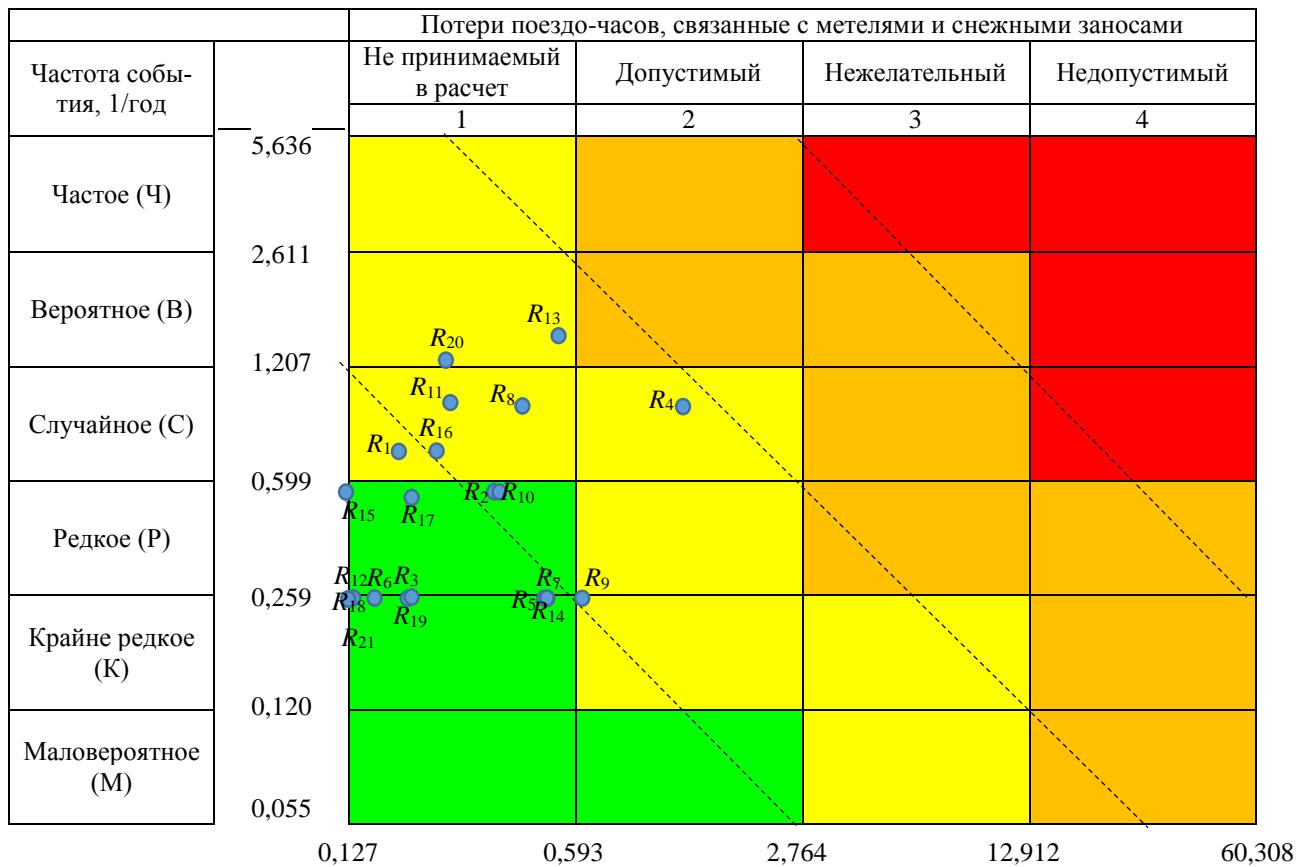


Рис. 2. Матрица рисков задержки поездов по причинам, связанным с несвоевременной очисткой железнодорожных путей станций от снега:  
 $R_1-R_{21}$  – уровни риска для станций № 1–21 соответственно

#### Рекомендации по снижению риска задержки поездов, связанного с несвоевременной очисткой железнодорожных путей станций от снега

Уровень риска	Обозначение ячейки матрицы риска	Рекомендации по снижению риска
Недопустимый	Ч3, Ч4, В4, С4	Требуется немедленное снижение риска путем увеличения количества закрепленных единиц снегоуборочной и снегоочистительной техники за железнодорожной станцией. Также необходимо совершенствовать технологический процесс очистки станционных путей от снега и определить оптимальные маршруты следования снегоуборочной техники
Нежелательный	Ч2, В2, В3, С3, Р3, Р4, К4, М4	Принять краткосрочные действия по снижению риска путем увеличения парка путевых машин, закрепленных за станцией, или привлечения дополнительных единиц техники с прилегающих станций. Для оценки эффективности принимаемых мер необходимо определить затраты на снижение риска $Z_c$ и сравнить их с величиной последствий $\Pi$ в рублях. Если $Z_c \gg \Pi$ , то следует перейти к другому варианту
Допустимый	Ч1, В1, С1, С2, Р2, К2, К3, М3	Разработать научно обоснованный перечень действий по снижению риска путем совершенствования технологии очистки станционных путей от снега и (или) формирования комплектов из машин снегоуборочного и снегоочистительного типа. Для оценки эффективности принимаемых мер необходимо определить затраты на снижение риска $Z_c$ и сравнить их с величиной последствий $\Pi$ в рублях. Если $Z_c > \Pi$ , то следует перейти к другому варианту
Не принимаемый в расчет	Р1, К1, М1, М2	Не требуется разработка краткосрочных мер по снижению риска, поскольку риск можно считать приемлемым. С целью поддержания уровня риска на заданном уровне рекомендуется не изменять количество обслуживающей техники в меньшую сторону и совершенствовать технологии очистки путей от снега с использованием имеющегося парка машин

очисткой железнодорожных путей от снега ( $R_{\text{доп}}^{\text{ст}} = 0,104$  поездо-ч/год). Также определено, что в регионе фактический уровень рисков не превышает допустимого ( $4,747 < 5,512$ ).

2. Матрица рисков задержки поездов, построенная на основе технологических нарушений за четыре зимних периода с 2019 по 2023 г., позволила определить железнодорожные станции, которые требуют разработки рекомендаций по снижению уровня риска: ст. № 1, 4, 8, 9, 11, 13, 16 и 20.

3. Установлены границы широко приемлемого риска для одной станции за зимний период, которые составляют при максимальной частоте  $0,559$  год $^{-1}$  задержку  $0,127$  поездо-ч или при  $0,055$  год $^{-1}$  –  $2,764$  поездо-ч. В эту категорию попали остальные станции, не требующие проведения дополнительных исследо-

ваний технологического процесса очистки путей от снега.

4. Разработаны рекомендации по снижению риска задержки поездов для каждого уровня риска задержки поездов. При этом для железнодорожных станций, уровень риска на которых превышает широко допустимый, рекомендуется разработать научно обоснованный перечень действий по снижению риска путем совершенствования технологии очистки станционных путей от снега и (или) формирования комплектов из машин снегоуборочного и снегоочистительного типа. Для оценки эффективности принимаемых мер необходимо определить затраты на снижение риска  $Z_c$  и сравнить их с величиной последствий  $P$  в рублях. Если  $Z_c > P$ , то следует перейти к другому варианту.

## Список источников

1. Гапанович В. А. Система УРРАН. Универсальный инструмент поддержки принятия решений // Железнодорожный транспорт. 2012. № 10. С. 16–22.
2. Микава А. В. Обеспечение требуемых статических параметров скоростных и высокоскоростных контактных подвесок на этапах жизненного цикла : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Микава Александр Ваноевич ; Уральский государственный университет путей сообщения. Екатеринбург, 2017. 156 с.
3. Замышляев А. М., Рачковский М. Ю., Никифорова М. С. Экономические критерии принятия решений о замене основных средств на основе методологии УРРАН // Экономика железных дорог. 2012. № 12. С. 11–12.
4. Репях А. Ю. Анализ эффективности работы снегоуборочных поездов с помощью картирования // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (62). С. 15–22.
5. ГОСТ Р 54505–2011. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте : дата введения 01.08.2012 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Москва : Стандартинформ, 2011. 54 с.
6. Солдатов Д. В. Нормирование и анализ показателей надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Солдатов Дмитрий Владимирович ; Российский университет транспорта (МИИТ). Москва, 2018. 294 с.
7. Ковалев А. А., Шаюхов Т. Т. Оценка риска отказа участка контактной сети // Транспортное дело России. 2015. № 5. С. 142–146.
8. Человеческий фактор в технологических процессах железной дороги / А. Л. Манаков, В. С. Воробьев, И. В. Яншина, И. Б. Репина // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 4 (47). С. 5–14.
9. Методические рекомендации по построению матрицы рисков открытого акционерного общества «Российские железные дороги» : утверждены распоряжением от 01.12.2023 № 3060/р. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
10. Положение об учете, расследовании и анализе технологических нарушений в перевозочном процессе на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАСАТ : утверждено распоряжением от 06.09.2021 № 1915/р. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

## **References**

1. Gapanovich V. A. URRAN system. Universal decision support tool. *Railway Transport*. 2012;(10):16–22. (In Russ.).
2. Mikava A. V. Ensuring the required static parameters of high-speed and high-speed catenary suspensions at the stages of the life cycle. Specialty 05.22.07 Railway rolling stock, train traction and electrification. Dissertation for the degree of Candidate of Engineering. Mikava Alexander Vanoevich; Ural State Transport University. Ekaterinburg; 2017. 156 p. (In Russ.).
3. Zamyslyayev A. M., Rachkovsky M. Yu., Nikiforova M. S. Economic criteria for making decisions on the replacement of fixed assets based on the URRAN methodology. *Economics of Railways*. 2012;(12):11–12. (In Russ.).
4. Repyakh A. Yu. Analysis of the efficiency of snow removal trains using mapping. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(62):15–22. (In Russ.).
5. GOST R 54505–2011. Security is functional. Risk management in railway transport: national standard of the Russian Federation: introduction date 01.08.2012. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Moscow: Standartinform; 2011. 54 p. (In Russ.).
6. Soldatov D. V. Standardization and analysis of reliability indicators of railway automation and telemechanics systems. Specialty 05.22.08 Transportation process management. Dissertation for the degree of Candidate of Engineering. Soldatov Dmitry Vladimirovich; Russian University of Transport. Moscow; 2018. 294 p. (In Russ.).
7. Kovalev A. A., Shayukhov T. T. Assessment of the risk of failure of a contact network section. *Transport Business in Russia*. 2015;(5):142–146. (In Russ.).
8. Manakov A. L., Vorobyov V. S., Yanshina I. V., Repina I. B. Human factor in railway technological processes. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2018;(47):5–14. (In Russ.).
9. Methodological recommendations for constructing a risk matrix for Russian Railways. Order No. 3060/r dated 01.12.2023. Access from the ConsultantPlus reference and legal system. (In Russ.).
10. Regulations on recording, investigation and analysis of technological violations in the transportation process on the infrastructure of Russian Railways using the automated KASAT system. Order No. 1915/r dated 06.09.2021. Access through the ConsultantPlus reference and legal system. (In Russ.).

## **Информация об авторах**

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

**А. Ю. Репях** – аспирант Сибирского государственного университета путей сообщения, преподаватель Новосибирского подразделения Западно-Сибирского учебного центра профессиональных квалификаций.

## **Information about the authors**

**A. L. Manakov** – Rector of the Siberian Transport University, Doctor of Technical Sciences, Professor.

**A. Yu. Repyakh** – Postgraduate of the Siberian Transport University, teacher of the Novosibirsk division of the West Siberian Training Center for Professional Qualifications.

Статья поступила в редакцию 19.04.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 24.06.2024.

The article was submitted 19.04.2024; approved after reviewing 27.05.2024; accepted for publication 24.06.2024.

## ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.076.2

doi 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_12

### Методика оценки технико-экономической эффективности перевода автотракторной техники для работы на природном газе

Алексей Леонидович Каштанов<sup>1</sup>, Александр Анатольевич Комяков<sup>2✉</sup>,  
Михаил Михайлович Никифоров<sup>3</sup>, Александра Витальевна Малышева<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

<sup>1</sup> al.kashtanov@mail.ru

<sup>2</sup> tskom@mail.ru✉

<sup>3</sup> nikiforovmm@mail.ru

<sup>4</sup> malysheva.av-omsk@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена разработке методики поддержки принятия решения о целесообразности перевода автотракторной техники для работы на компримированном или сжиженном природном газе. Показаны основные технические, экономические и экологические эффекты, достигаемые при переводе автотракторной техники на работу на природном газе. Описана существующая в стране ситуация с газонаполнительными заправочными станциями и возникающими в связи с ней ограничениями на использование природного газа в качестве моторного топлива. Перечислены случаи, которые исключают возможность перевода автотракторной техники на природный газ. Определено, что к факторам, которые необходимо учитывать при расчете технико-экономической эффективности такого перевода, следует относить характеристики автотракторной техники; нормативный и фактический расход топлива; стоимость переоборудования для работы на природном газе; стоимость моторного топлива в регионе эксплуатации; расходы, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом техники после перевода на газомоторное топливо, переобучением обслуживающего персонала, а также перепробегом из-за удаленного расположения автомобильных газонаполнительных компрессорных станций или криоАЗС; наличие федеральных и региональных субсидий, льготных ставок транспортного налога и иных дополнительных мер по стимулированию развития рынка газомоторного топлива. Приведены примеры расчета по представленной методике для парка автотракторной техники ОАО «РЖД». Представлена оценка влияния таких факторов, как годовой пробег, соотношение стоимости моторных топлив и увеличение расстояния до заправочных станций, на сроки окупаемости проекта перевода автотракторной техники для работы на природном газе.

**Ключевые слова:** автотракторная техника, газомоторное топливо, компримированный природный газ, сжиженный природный газ, энергетическая эффективность, срок окупаемости

**Для цитирования:** Методика оценки технико-экономической эффективности перевода автотракторной техники для работы на природном газе / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, М. М. Никифоров, А. В. Малышева // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 12–19. DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_12.

## TRANSPORT

Original article

### Methodology for assessing technical and economic efficiency of converting automotive equipment to run on natural gas

Alexey L. Kashtanov<sup>1</sup>, Alexander A. Komyakov<sup>2</sup>, Mikhail M. Nikiforov<sup>3</sup>, Alexandra V. Malysheva<sup>4</sup>

<sup>✉1,2,3,4</sup> Omsk State Transport University, Omsk, Russia

<sup>1</sup> al.kashtanov@mail.ru

<sup>2</sup> tskom@mail.ru

<sup>3</sup> nikiforovmm@mail.ru

<sup>4</sup> malysheva.av-omsk@mail.ru

**Annotation.** The article is devoted to the development of a methodology for supporting decision-making on the feasibility of converting automotive equipment to run on compressed or liquefied natural gas. The main technical, economic and environmental effects achieved when converting automotive equipment to run on natural gas are shown. The current situation in the country with gas filling stations and the resulting restrictions on the use of natural

gas as a motor fuel are described. Cases are listed that exclude the possibility of converting automotive equipment to natural gas. It has been determined that the factors that must be taken into account when calculating the technical and economic efficiency of converting automotive equipment to run on natural gas should include the characteristics of automotive equipment, standard and actual fuel consumption, the cost of conversion to run on natural gas, the cost of motor fuel in the region of operation , costs associated with the maintenance and repair of equipment after switching to gas engine fuel, as well as retraining of service personnel, costs associated with re-mileage due to the remote location of automobile gas filling compressor stations or cryo-gas stations, the availability of federal and regional subsidies, preferential rates transport tax and other additional measures to stimulate the development of the gas motor fuel market. Examples of calculations using the presented methodology for the fleet of automotive and tractor equipment Russian Railways are given. An assessment of the influence of such factors as annual mileage, the ratio of the cost of motor fuels and an increase in the distance to gas stations on the payback period of the project of converting automotive equipment to run on natural gas is presented.

**Keywords:** automotive technology, gas motor fuel, compressed natural gas, liquefied natural gas, energy efficiency, payback period

**For citation:** Kashtanov A. L., Komyakov A. A., Nikiforov M. M., Malysheva A. V. Methodology for assessing technical and economic efficiency of converting automotive equipment to run on natural gas. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):12–19. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_12.

## Введение

С целью стимулирования внутреннего спроса на природный газ Правительство Российской Федерации утвердило в 2021 г. дорожную карту по расширению производства и использования малотоннажного сжиженного природного газа для газификации и в качестве моторного топлива до 2025 г. [1].

Согласно исследованиям [2, 3], использование компримированного (сжатого) природного газа (КПГ) или сжиженного нефтяного газа (СНГ) на автотракторной технике (АТТ), помимо снижения затрат на топливо, имеет следующие преимущества:

- 1) повышение моторесурса на 25–50 %;
- 2) увеличение срока службы масла, следовательно, уменьшение его расхода в процессе эксплуатации;
- 3) снижение уровня шумоизлучения на 3–6 дБ в сравнении с традиционными дизельными двигателями внутреннего сгорания;
- 4) снижение затрат на соблюдение норм выбросов вредных веществ (выбросы углекислого газа снижаются в 5–10 раз, окислов азота в 1,5–2 раза, углеводородов в 2–3 раза в сравнении с бензиновым двигателем);
- 5) уменьшение выбросов диоксида углерода, являющегося одним из парниковых газов (удельные выбросы CO<sub>2</sub> снижаются примерно на 50 % по сравнению с выбросами при работе бензиновых двигателей и на 25–27 % – при работе дизелей).

К реализации дорожной карты в обязательном порядке привлекаются акционерные общества с государственным участием. Оценим возможный масштаб работ по переоборудованию АТТ для работы на КПГ и СНГ на

примере ОАО «Российские железные дороги». Из открытых источников [4] известно, что годовое потребление автомобильного бензина в ОАО «РЖД» превышает 75 тыс. т, а потребление дизельного топлива на нетяговые нужды (значительное количество которого используется в качестве топлива для АТТ) составляет около 180 тыс. т.

Согласно [5], ОАО «РЖД» владеет парком АТТ размером более чем 36,8 тыс. единиц легковых и грузовых автомобилей, автобусов, спецтехники, прицепов. Модельный ряд разнообразен и включает в себя автомобили как иностранных, так и отечественных марок (всего более 50 марок АТТ).

Ключевым фактором, ограничивающим реализацию проектов по переоборудованию АТТ для работы на КПГ или СНГ, является слабое развитие газозаправочной инфраструктуры. Так, в 2020 г. в РФ насчитывалось 580 стационарных автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) для КПГ и 10 действующих объектов газозаправочной инфраструктуры СНГ. В соответствии с [1] и [6], их количество должно увеличиться к 2025 г. до 1 273 и 58 соответственно. При этом, согласно открытым источникам информации, количество автозаправочных станций (АЗС), предназначенных для заправки бензином и дизельным топливом, превышает 23 000.

В соответствии с [5], перед ОАО «РЖД» поставлена задача по постепенному переводу АТТ на газомоторное топливо. Внедрение данного мероприятия в других отраслях промышленности и сельского хозяйства в основном демонстрирует положительные результаты [2, 3, 7, 8]. Тем не менее для снижения

рисков непроизводительных расходов в результате перехода на альтернативные виды топлива для ОАО «РЖД», а также иных экономических субъектов, участвующих в реализации дорожной карты, существует потребность в разработке методики, позволяющей оценить экономический эффект от данного мероприятия и выполнить ранжирование АТТ в порядке приоритета их переоборудования.

#### **Материалы и методы исследования**

Общий алгоритм предлагаемой методики включает в себя следующие этапы:

1. Из рассмотрения исключаются АТТ со следующими признаками: уже использующие газомоторное топливо; предназначенные для устранения аварийных ситуаций, отказов (предотказов) технических средств, работающие в круглосуточном режиме; находящиеся на гарантии завода-изготовителя; с истекшим сроком службы в соответствии с [5]: легковые – 7 лет, автобусы и грузовой транспорт – 10 лет, спецтехника – 18 лет; базирующиеся на стоянках или обслуживающиеся на объектах, которые не предназначены для газобаллонных АТТ, при этом нецелесообразны перевод их на другие места базирования или переоборудование мест стоянок или обслуживания.

2. Осуществляется расчет чистой приведенной стоимости (*NPV*) проекта по переоборудованию рассматриваемой АТТ для двух вариантов: использование КПГ и СНГ. К дальнейшему рассмотрению принимаются варианты с положительным *NPV*.

3. Осуществляется расчет дисконтированного индекса доходности (*DPI*). Затем проекты по переоборудованию АТТ ранжируются по значению дисконтированного индекса доходности, начиная с максимального. На основе сформированной выборки разрабатывается программа перевода АТТ на газомоторное топливо. При прочих равных условиях приоритет отдается переоборудованию группы АТТ, базирующейся в одном месте.

При оценке экономической эффективности перевода АТТ для работы на природном газе принимаются к рассмотрению следующие факторы:

1) характеристики АТТ (марка, модель, год выпуска, вид используемого топлива, экологический класс, пробег по одометру и др.);

2) нормативный удельный расход топлива, пробег автотранспорта и иные факторы, необходимые для определения нормативного расхода топлива согласно [9];

3) фактический расход топлива АТТ;

4) стоимость перевода действующих АТТ для работы на природном газе;

5) стоимость моторного топлива в регионе эксплуатации;

6) соотношение газового и дизельного топлива в газодизельном цикле;

7) расходы, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом АТТ после перевода на газомоторное топливо;

8) расходы, связанные с перепробегом АТТ из-за удаленного расположения АГНКС или криоАЗС;

9) расходы, связанные с обучением (повышением квалификации) водителей и механиков правилам эксплуатации, технического обслуживания и текущего ремонта АТТ, работающей на газомоторном топливе;

10) наличие федеральных и региональных субсидий на переоборудование АТТ на КПГ и СНГ, льготных ставок транспортного налога и иных дополнительных мер по стимулированию развития рынка газомоторного топлива.

Порядок оценки эффективности переоборудования АТТ для работы на природном газе следующий.

Величина высвобожденных финансовых ресурсов, достигаемая за счет переоборудования АТТ для работы на природном газе в *j*-м году, р., рассчитывается по формулам:

– для АТТ с бензиновым двигателем

$$\Phi B_{\text{эф}} = Q_t^{\phi} (\bar{U}_b - \beta \bar{U}_{\text{ПГ}}) + \Delta Z^{\text{запр}} - Q_{\text{доп}} \bar{U}_b; \quad (1)$$

– для АТТ с дизельным двигателем

$$\Phi B_{\text{эф}} = k Q_t^{\phi} (\bar{U}_d - \beta \bar{U}_{\text{ПГ}}) + \Delta Z^{\text{запр}}, \quad (2)$$

где  $Q_t^{\phi}$  – фактический расход топлива (бензина или дизельного топлива) АТТ за отчетный период, л;  $\bar{U}_b$ ,  $\bar{U}_d$  – средняя (фактическая на момент расчета эффективности) по региону цена бензина и дизельного топлива соответственно, р./л;  $\beta$  – переводной коэффициент, учитывающий снижение расхода топлива при работе АТТ на СНГ (принимается равным 0,73 кг/л, учитывается только при переоборудовании АТТ на СНГ);  $\bar{U}_{\text{ПГ}}$  – средняя по региону цена КПГ, р./м<sup>3</sup>, или СНГ, р./кг;  $\Delta Z^{\text{запр}}$  – разница в затратах на за-

правку топливом до и после переоборудования АТТ для работы на природном газе, обусловленная изменением расстояния до заправочной станции, р.;  $Q_{\text{доп}}$  – дополнительный расход бензина, необходимый для запуска и работы двигателя газобаллонного автомобиля; в соответствии с [9, п. 6] принимается равным до 20 л бензина в месяц на один автомобиль в летний и весенне-осенний сезоны, в зимнее время дополнительно учитываются зимние надбавки согласно [9, прил. № 2];  $k$  – коэффициент замещения дизельного топлива газовым, который выбирается из диапазона 0,5–0,9 в зависимости от загрузки двигателя (при отсутствии информации о загрузке двигателя принимается равным 0,5).

Величина  $\Delta Z^{\text{запр}}$  определяется следующим образом:

– для АТТ с бензиновым двигателем

$$\Delta Z^{\text{запр}} = \frac{2Q_t^\phi ql_b \omega \bar{U}_{1б}}{(1 - k_{v\text{ост}})V_b} - \frac{2Q_t^\phi ql_{\text{ПГ}} \omega \bar{U}_{1\text{ПГ}} \beta}{(1 - k_{v\text{ост}})V_{\text{ПГ}}}; \quad (3)$$

– для АТТ с дизельным двигателем

$$\Delta Z^{\text{запр}} = \frac{2Q_t^\phi ql_d \omega \bar{U}_{1д}}{(1 - k_{v\text{ост}})V_d} - \frac{2Q_t^\phi ql_{\text{ПГ}} \omega \bar{U}_{1\text{ПГ}} \beta}{(1 - k_{v\text{ост}})V_{\text{ПГ}}}, \quad (4)$$

где  $q$  – нормативное значение удельного расхода топлива на пробег (бензина, дизельного топлива) АТТ, л/км; данный показатель может быть либо принят по данным статистических отчетных форм (в ОАО «РЖД» это форма № ФАУ-31), либо рассчитан по выражениям (5), (6);  $l_b, l_d$  – расстояние от места базирования АТТ до используемой бензиновой, дизельной заправочной станции соответственно, км;  $\omega$  – коэффициент, учитывающий порожний пробег АТТ до заправочной станции [5];  $k_{v\text{ост}}$  – коэффициент, учитывающий остаток топлива в баке на момент заправки АТТ, принимается равным 0,2;  $V_b, V_d$  – объем бензинового, дизельного бака АТТ соответственно, л;  $l_{\text{ПГ}}$  – расстояние от места базирования АТТ до газонаполнительной компрессорной станции, криоАЗС или собственного метанового топливозаправочного пункта (мини-АГНКС), планируемых к использованию, км;  $V_{\text{ПГ}}$  – вместимость газотопливного баллона, устанавливаемого на АТТ, для КПГ – в м<sup>3</sup>, для СНГ – в кг;

Величина  $q$  составляет:

– для автомобилей, согласно [9], с учетом поправочного коэффициента (надбавки или снижения):

$$q = 0,01H_s(1 + 0,01D); \quad (5)$$

– для тракторов и спецтехники, у которых не нормируется базовая норма топлива на пробег:

$$q = H_m / V, \quad (6)$$

где  $H_s$  – базовая норма расхода топлива на пробег АТТ, л/100 км;  $D$  – поправочный коэффициент (суммарная относительная надбавка или снижение) к норме, учитывающий работу АТТ в условиях, перечисленных в [9, п. 5, 6], %;  $H_m$  – базовая норма расхода топлива в расчете на 1 мото-час, л/мото-час;  $V$  – средняя скорость движения трактора или спецтехники до заправочной станции, км/ч.

Коэффициент «2» в формулах (3) и (4) используется для учета пробега АТТ до заправочной станции и обратно.

Расходы на покупку, установку и обслуживание устанавливаемого на АТТ газобаллонного оборудования (ГБО), а также оборудование места хранения АТТ в рамках периода планирования, р., рассчитываются по формуле

$$S_{\text{ПГ}} = S_{\text{кан}} + S_{\text{обуч}} + S_{\text{экспл}} + S_{\text{об}} - S_{\text{суб}}, \quad (7)$$

где  $S_{\text{кан}}$  – расходы на покупку и установку ГБО, р.;  $S_{\text{обуч}}$  – годовые расходы, связанные с обучением (повышением квалификации) водителей и механиков правилам эксплуатации, технического обслуживания и текущего ремонта АТТ, работающей на ГМТ (при отсутствии данных принимаются равными нулю), р.;  $S_{\text{экспл}}$  – годовые эксплуатационные расходы в  $j$ -м году на обслуживание устанавливаемого на АТТ ГБО, р.;  $S_{\text{об}}$  – расходы, связанные с оборудованием помещений для хранения, технического обслуживания и ремонта АТТ системами контроля утечек газа и вентиляционными системами необходимой производительности, а также постов выпуска газа, при отсутствии необходимости доработки принимаются равными нулю, р. (затраты на переоборудование помещений для газомоторной АТТ делятся пропорционально на количество автомобилей на ГМТ, базирующихся в данном помещении, поэтому наиболее целесообразным является перевод на ГМТ нескольких единиц АТТ, расположенных в одном месте);  $S_{\text{суб}}$  – размер разовых субсидий на переоборудование АТТ для работы на КПГ и СНГ (покупку нового АТТ, работающего на КПГ и СНГ), льготных ставок транспортного налога и иных дополнительных мер по стимулированию

нию развития ГМТ (при отсутствии данных принимаются равными нулю), р.

Значение  $S_{\text{экспл}}$  определяется как

$$S_{\text{экспл}} = \frac{L_{\text{отч}}}{L_{\text{ТО}}} C_{\text{ТО}} + C_{\text{осв}}, \quad (8)$$

где  $L_{\text{отч}}$  – фактический пробег АТТ за отчетный период, км;  $L_{\text{ТО}}$  – нормативный пробег между плановым техническим обслуживанием устанавливаемого на АТТ ГБО, км;  $C_{\text{ТО}}$  – стоимость технического обслуживания устанавливаемого на АТТ ГБО, р.;  $C_{\text{осв}}$  – стоимость планового освидетельствования баллона ГБО (в случае, если оно предусмотрено в рассматриваемом  $j$ -м году, т. е.  $j = T_{\text{осв}}$ , или  $j = 2T_{\text{осв}}$ , или  $j = 3T_{\text{осв}}$  и т. д.), р.;  $T_{\text{осв}}$  – периодичность освидетельствования баллона ГБО, лет.

Расчет экономических показателей (чистого денежного потока  $NCF$ , дисконтированного чистого денежного потока  $DCF$ , чистой приведенной стоимости проекта  $NPV$ , дисконтированного индекса доходности  $DPI$ , дисконтированного срока окупаемости  $DPP$ ) осуществляется по известным методикам расчета ожидаемого экономического эффекта.

Дисконтирование осуществляется на период остаточного срока службы АТТ. Коэффициент дисконтирования рассчитывается по уровню ключевой ставки и уровню инфляции в соответствии с методикой, заданной в [10], с учетом поправки на риск:

$$d = d_i + \frac{P}{100} = \left(1 + \frac{r}{100}\right) / \left(1 + \frac{i}{100}\right) - \frac{P}{100}, \quad (9)$$

где  $d_i$  – коэффициент дисконтирования без учета риска, о. е.;  $P$  – поправка на риск, %;  $r$  – ключевая ставка, %;  $i$  – уровень инфляции, %.

В соответствии с приведенной в [10] классификацией рассматриваемый проект следует отнести к инвестициям в развитие производства на базе освоенной технологии, поэтому принимается  $P = 4\%$ .

### Результаты исследования

Рассмотрим пример расчета по представленной методике для следующих исходных условий: автомобиль марки КамАЗ 43253, год выпуска 2017, мощность дизельного двигателя 242 л. с., предназначен для работы в условиях эксплуатации, не требующих применения надбавок или снижений к норме рас-

хода топлива, на газомоторное топливо; вид топлива – КПГ; дополнительные затраты, связанные с дооборудованием помещений для хранения АТТ и с обучением персонала правилам эксплуатации, технического обслуживания и текущего ремонта АТТ, работающей на газомоторном топливе, не учитывались; субсидии на переоборудование не предусмотрены.

Расчеты, выполненные с применением предлагаемой методики, показывают, что наиболее значимыми факторами, влияющими на эффективность перевода АТТ на КПГ или СНГ, являются годовой пробег автомобиля, а также разница в стоимости топлива (в данном случае дизельного) и КПГ или СНГ (рис. 1).

Так, для рассматриваемого случая при годовом пробеге менее 20 000 км срок окупаемости превышает остаточный срок службы АТТ. Аналогичная ситуация наблюдается и при увеличении стоимости КПГ до уровня порядка 77 % от стоимости дизельного топлива: проект становится неокупаемым.

В то же время перепробег АТТ из-за удаленного расположения АГНКС или криоАЗС в сравнении с дизельной АЗС имеет не такое сильное влияние на результативность проекта (рис. 2). Так, увеличение расстояния между АЗС и АГНКС на 10 км приводит к увеличению срока окупаемости в среднем на три месяца.

### Выводы

По результатам проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Перевод автотракторной техники на работу на природном газе дает существенные технические (увеличение моторесурса на 25–50 %), экономические (снижение затрат на моторное топливо и расходов, связанных с выплатами за загрязнение окружающей среды) и экологические (снижение загрязняющих выбросов в окружающую среду) выгоды.

2. Существующая в настоящее время в Российской Федерации сеть газозаправочных станций ограничивает использование природного газа в качестве моторного топлива, особенно в виде сжиженного природного газа (на 2020 г. 580 АГНКС для КПГ и 10 действующих объектов газозаправочной инфраструктуры СНГ, к 2025 г. планируется увеличение до 1 273 и 58 соответственно).

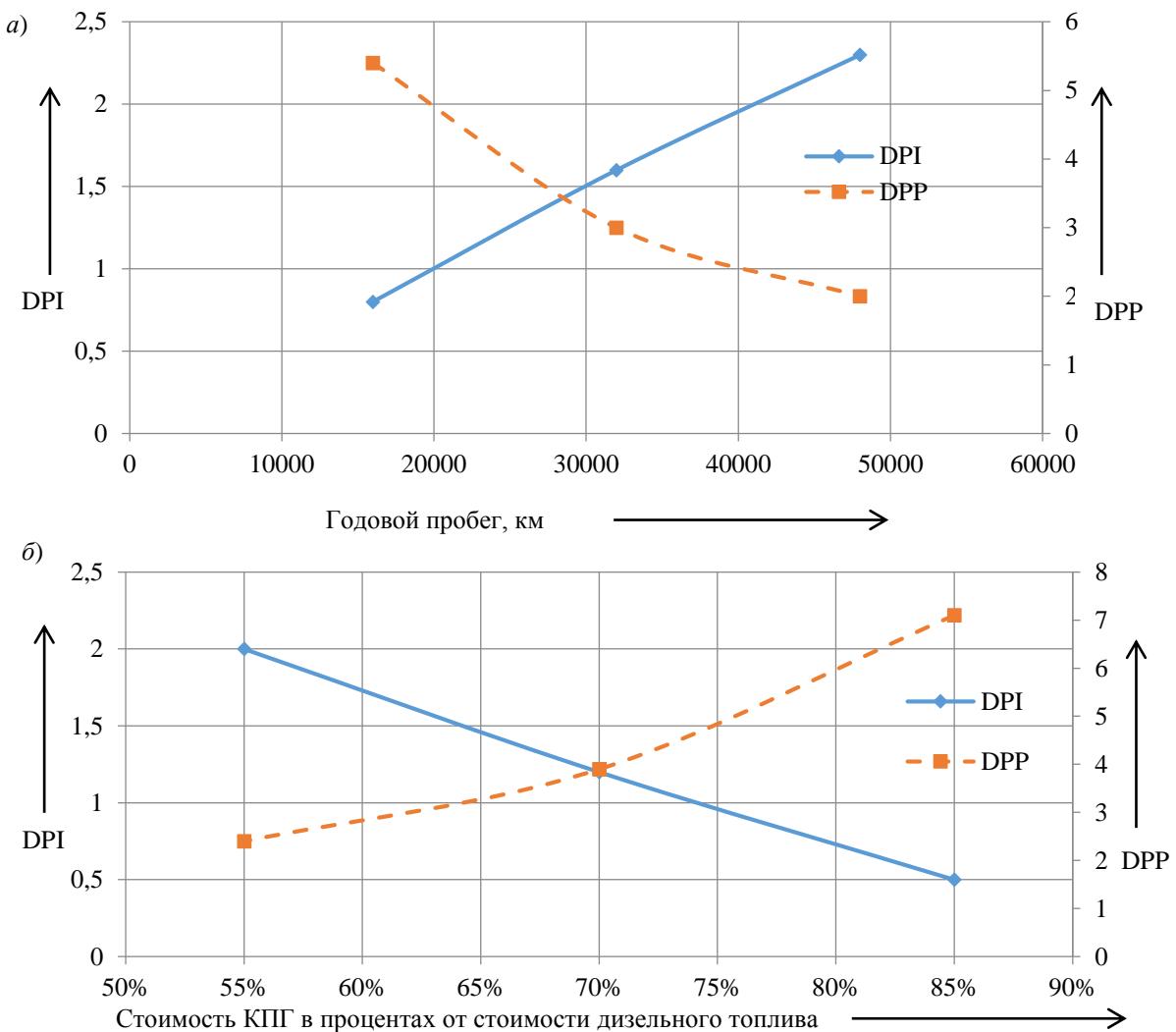


Рис. 1. Показатели эффективности проекта по переоборудованию автомобиля КамАЗ 43253 на газомоторное топливо:  
*а* – в зависимости от годового пробега; *б* – в зависимости от разницы стоимости КПГ и дизельного топлива

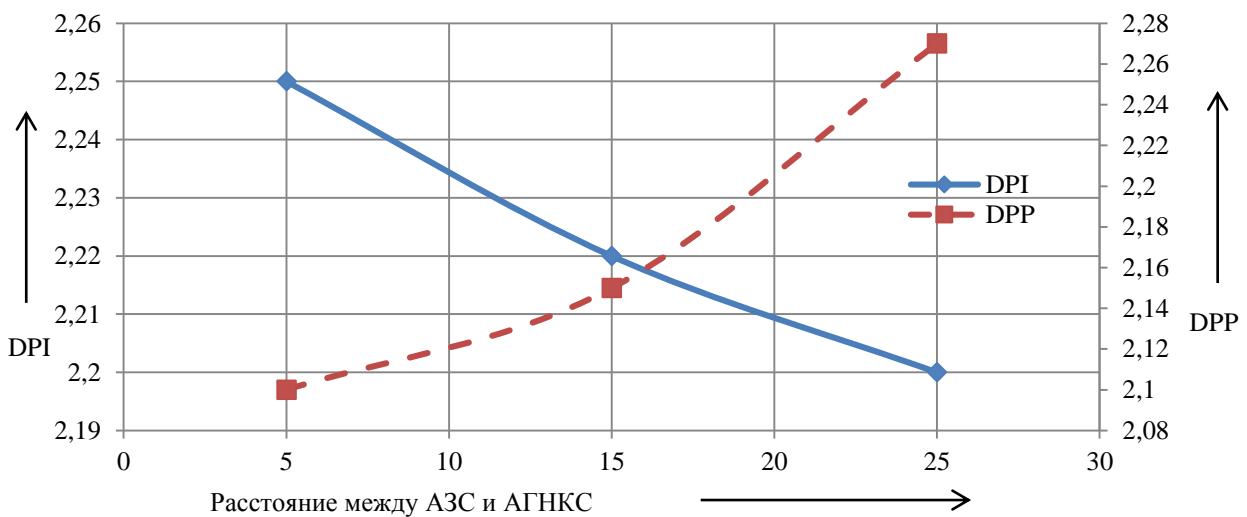


Рис. 2. Показатели эффективности проекта по переоборудованию автомобиля КамАЗ 43253 на газомоторное топливо в зависимости от расстояния между АЗС и АГНКС

3. Не во всех случаях существует возможность перевода автотракторной техники для работы на природном газе. Исключение составляет техника, предназначенная для устранения аварийных ситуаций и с круглосуточным режимом работы, находящаяся на гарантии завода-изготовителя; с истекшим сроком, базирующаяся на стоянках, не предназначенных для эксплуатации техники с газобаллонным оборудованием.

4. Определен перечень факторов, которые необходимо учитывать при расчете технико-экономической эффективности перевода автотракторной техники для работы на природном газе, в том числе: характеристики автотракторной техники; нормативный и фактический расход топлива; стоимость переоборудования для работы на природном газе; стоимость моторного топлива в регионе эксплуатации; расходы, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом техники после перевода на газомоторное топливо, переобучением обслуживающего персонала, а также перепробегом из-за удаленного расположения АГНКС или криоАЗС; наличие федеральных и региональных субсидий, льготных ставок транспортного налога и иных дополнительных мер по стимулированию развития рынка газомоторного топлива.

5. Показано влияние таких факторов, как годовой пробег, соотношение стоимости мо-

торных топлив и увеличение расстояния до заправочных станций, на сроки окупаемости проекта. Из числа рассчитанных проектов более 90 % являются окупаемыми, т. е. срок окупаемости меньше остаточного срока службы АТТ. Для эффективных проектов сроки окупаемости варьируются от 0,18 до 10,4 года, при этом 32,5 % проектов имеют срок окупаемости до одного года. Определены предельные значения указанных факторов для рассматриваемого случая, необходимые для достижения приемлемого срока окупаемости: годовой пробег не менее 20 000 км, стоимость природного газа не более 77 % от стоимости дизельного топлива.

6. Необходимо проведение исследований, связанных с разработкой модели оптимального размещения стационарной и передвижной газозаправочной инфраструктуры для транспортных предприятий с территориально распределенной инфраструктурой для снижения временных затрат на поездку до заправочных станций.

7. Представленная методика расчета технико-экономической эффективности перевода автотракторной техники для работы на компримированном или сжиженном природном газе является одним из элементов системы поддержки принятия решений при формировании программ перевода автотракторной техники для работы на природном газе.

## Список источников

1. План мероприятий («дорожная карта») по развитию рынка малотоннажного сжиженного природного газа и газомоторного топлива в Российской Федерации на период до 2025 года : утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.02.2021 № 350-р. Москва, 2021. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Бухаров Д. Б. Экономический эффект переоборудования транспорта коммунального хозяйства на газомоторное топливо // Транспорт на альтернативном топливе. 2015. № 2 (44). С. 37–40.
3. Нестеренко И. С., Нестеренко Г. А., Талызин В. С. Об экономической эффективности перевода автомобилей на газовое топливо // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 12 (126). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.43>.
4. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2537р. Москва, 2016. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
5. Концепция управления и развития автохозяйства ОАО «РЖД» : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 25.08.2020 № 1303. Москва, 2020. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
6. Государственная программа РФ «Развитие энергетики» : утверждена Постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 № 321. Москва, 2014. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
7. Батталов А. Ф. Моделирование ресурсосберегающей транспортной подсистемы производства // Московский экономический журнал. 2024. № 1. С. 42–45.
8. Шамин М. В. Оценка экономической и экологической эффективности перевода подвижного состава УФПС Ханты-Мансийского автономного округа – Югры на альтернативные виды топлива // Транспорт на альтернативном топливе. 2020. № 3. С. 189–200.

9. Распоряжение Минтранса России от 14.03.2008 № АМ-23-р «О введении в действие методических рекомендаций “Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте”». Москва, 2008. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

10. Постановление Правительства РФ от 22.11.1997 № 1470 «Об утверждении Порядка предоставления государственных гарантий на конкурсной основе за счет средств Бюджета развития Российской Федерации и Положения об оценке эффективности инвестиционных проектов при размещении на конкурсной основе централизованных инвестиционных ресурсов Бюджета развития Российской Федерации» : (редакция от 03.09.1998). Москва, 1998. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

## References

1. Action plan (road map) for the development of the market for small-tonnage liquefied natural gas and natural gas motor fuel in the Russian Federation for the period until 2025, approved by Order of the Government of the Russian Federation dated February 13, 2021 No. 350-р. (In Russ.).
2. Bukharov D. B. Economic effect of converting municipal transport to gas engine fuel. *Transport on Alternative Fuels*. 2015;(44):37–40. (In Russ.).
3. Nesterenko I. S., Nesterenko G. A., Talyzin V. S. On the economic efficiency of converting cars to gas fuel. *International Scientific Research Journal*. 2022;(126). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.43>. (In Russ.).
4. Energy strategy of the Russian Railways holding for the period until 2020 and for the future until 2030, approved by the order of Russian Railways dated 14.12.2016 No. 2537r. (In Russ.).
5. The concept of management and development of the motor vehicle fleet Russian Railways, approved by the order of Russian Railways dated 25.08.2020 No. 1303. (In Russ.).
6. State program of the Russian Federation Energy Development, approved by Decree of the Government of the Russian Federation of 15.04.2014 No. 321. (In Russ.).
7. Battalov A. F. Modeling of a resource-saving transport subsystem of production. *Competence*. 2024;(1):42–45. (In Russ.).
8. Shamin M. V. Assessment of the economic and environmental efficiency of transferring the rolling stock of the Federal Postal Administration of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra to alternative fuels. *Transport on Alternative Fuels*. 2020;(3):189–200. (In Russ.).
9. Order of the Ministry of Transport of Russia dated 14.03.2008 No. AM-23-р On the implementation of methodological recommendations. Consumption standards for fuels and lubricants in road transport. (In Russ.).
10. Decree of the Government of the Russian Federation of 22.11.1997 No. 1470 On approval of the Procedure for providing state guarantees on a competitive basis at the expense of the Development Budget of the Russian Federation and the Regulations on assessing the effectiveness of investment projects when placing centralized investment resources of the Budget on a competitive basis development of the Russian Federation (with amendments and additions). (In Russ.).

## Информация об авторах

А. Л. Каштанов – директор Института автоматики, телемеханики и информационных технологий Омского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент.

А. А. Комяков – руководитель учебно-методического центра по энергосбережению и повышению энергоэффективности Омского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, доцент.

М. М. Никифоров – директор центра бизнес-проектов Омского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент.

А. В. Малышева – аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения.

## Information about the authors

A. L. Kashtanov – Candidate of Engineering, Associate Professor, Director of the Institute of Automation, Telemechanics and Information Technologies of the Omsk State Transport University.

A. A. Komyakov – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Educational and Methodological Center for Energy Saving and Energy Efficiency Improvement, Omsk State Transport University.

M. M. Nikiforov – Candidate of Engineering, Director of the Center for Business Projects of the Omsk State Transport University.

A. V. Malysheva – Postgraduate of the Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University.

Статья поступила в редакцию 16.04.2024; одобрена после рецензирования 29.04.2024; принята к публикации 24.06.2024.

The article was submitted 16.04.2024; approved after reviewing 29.04.2024; accepted for publication 24.06.2024.

## ТРАНСПОРТ

Научная статья  
УДК 656.224(-214)  
doi 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_20

### Критические объекты транспортной инфраструктуры мегаполисов и агломераций

Валерий Иванович Хабаров<sup>1✉</sup>, Михаил Аркадьевич Беков<sup>2</sup>,  
Владислав Евгеньевич Квашнин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия  
<sup>1,2,3</sup> Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> khabarov51@mail.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup> gyro105@yandex.ru

<sup>3</sup> mihailbekov@mail.ru

**Аннотация.** Целью работы является исследование качества функционирования транспортной сети (ТС) в зависимости от внешних и внутренних факторов, поиск узких мест в ТС, рассмотрение сети с точки зрения соответствия транспортного спроса и предложения. Случайный поток событий, таких как ДТП, перегрузка магистралей, ремонтно-строительные работы и пр., порождает явления волнового характера, распространяющиеся по сети и создающие производные проблемы. Ставится задача выявления объектов транспортной инфраструктуры, значение которых становится критическим с точки зрения их влияния на устойчивость работы ТС в целом. Специфика транспортных систем больших городов и агломераций заставляет рассмотреть эту проблему более пристально с учетом их особенностей в различных аспектах: с точки зрения безопасности ТС необходимо найти наиболее уязвимые элементы транспортной сети как среди множества узлов, так и среди множества коммуникаций; с точки зрения надежности необходимо обеспечить штатное функционирование ТС в допустимых пределах; с точки зрения устойчивости необходима такая структурная и функциональная организация ТС, которая позволит при внешних и внутренних возмущениях сохранять жизнеспособность системы. На практике результаты исследований могут быть использованы при транспортном планировании, разработке генеральных планов развития городов, реконструкции существующей транспортной инфраструктуры, для совершенствования систем транспортной безопасности, разработки интеллектуальных транспортных систем.

**Ключевые слова:** транспортная система, транспортная инфраструктура, критические объекты, устойчивость транспортной системы, транспортный спрос, транспортное предложение

**Для цитирования:** Хабаров В. И., Беков М. А., Квашнин В. Е. Критические объекты транспортной инфраструктуры мегаполисов и агломераций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 20–27. DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_20.

## TRANSPORT

Original article

### Critical objects of transportation infrastructure in megacities and agglomerations

Valeriy I. Khabarov<sup>1✉</sup>, Mikhail A. Bekov<sup>2</sup>, Vladislav E. Kvashnin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<sup>1,2,3</sup> Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> khabarov51@mail.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup> gyro105@yandex.ru

<sup>3</sup> mihailbekov@mail.ru

**Abstract.** The purpose of the work is to study the quality of the transportation network (TN) functioning depending on external and internal factors, to search for bottlenecks in the TN, to consider the network from the point of view of matching transportation supply and demand. Random flow of events, such as traffic accidents, overloading of highways, repair and construction works, etc. generates phenomena of wave character, spreading through the network and creating derivative problems. The task is to identify the objects of transport infrastructure, the importance of which is critical from the point of view of their significant impact on the stability of the transport system as a whole. The specificity of transport systems of large cities and agglomerations makes it necessary to

consider this problem more closely, taking into account their peculiarities in various aspects: from the point of view of TN security it is necessary to find the most vulnerable elements of the transport network both among the many nodes and among the many communications; from the point of view of reliability it is necessary to ensure the normal operation of TN within the permissible limits; from the point of view of sustainability it is necessary to have such a structural and functional organization of TN, which will allow for external and internal disruptions in the transport network. Practical application of the research results can be used in transportation planning, development of master plans for urban development, reconstruction of existing transport infrastructure, to improve transportation security systems, development of intelligent transportation systems.

**Keywords:** transport system, transport infrastructure, critical facilities, transport system stability, transport demand, transport supply

**For citation:** Khabarov V. I., Bekov M. A., Kvashnin V. E. Critical objects of transportation infrastructure in megacities and agglomerations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):20–27. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_20.

## Введение

В данной работе внимание концентрируется на проблемах *надежности, устойчивости и живучести транспортных сетей* (ТС) мегаполисов, поскольку их решение, в силу сложности сетевой структуры, нетривиально. Вместе с тем опыт использования традиционных потоковых методов транспортного моделирования [1] показывает их ограниченность.

Вопросы надежности, устойчивости и живучести тесно связаны [2, 3]. Понятие «устойчивость системы» трактуется как способность системы выполнять требуемые функции в условиях, создаваемых воздействиями *дестабилизирующих факторов*. Следует уточнить, что под дестабилизирующими факторами далее будет пониматься «разрушение» отдельных узлов или связей. Для ТС «разрушение» имеет широкий смысловой спектр, предполагающий выключение данного объекта из ТС. Отсюда следует, что необходимым условием для анализа устойчивости сети является *оценка влияния* узлов или связей на систему в целом. Такая оценка есть функция, позволяющая ранжировать узлы и связи. Ранжирование узлов и связей сети можно произвести по различным основаниям:

- по устойчивости системы к целенаправленным воздействиям профилактического характера (ремонтные работы, реконструкция);
- по устойчивости к случайным воздействиям (аварии на дорогах, перегрузка сетей и пр.);
- по уязвимости для злонамеренных действий.

Таким образом, проблема *идентификации критических элементов сетей*, существенно влияющих на их свойства, является одной из важнейших. Можно отметить работы [4, 5], в которых формулируется общая постановка

задачи выявления степени влияния узлов в сетях на основе различных метрик. Специфика транспортных сетей обсуждается в [4]. Методологические вопросы уязвимости инфраструктуры ТС обсуждаются в [6, 7].

Для ТС можно выделить следующие *задачи идентификации критических объектов*:

1. Сформулировать локальные и интегральные критерии критичности состояния ТС (топологические, метрические).
  2. Ранжировать узлы ТС по степени влияния и центральности.
  3. Изучить влияние перекрытия или снижения пропускной способности определенного узла или связи ТС на общую пропускную способность транспортной сети, транспортную доступность.
  4. Определить критические маршруты в транспортной сети города, учитывая их важность для обеспечения мобильности жителей и развития экономики.
  5. Определить проблемные места ТС и причины концентраций ДТП, возникновения заторов.
  6. Определить предел катастрофических изменений ТС, при которых возникает потеря связности сети, спонтанное распространение заторов по сети, транспортный коллапс на значительном участке сети.
  7. Определить риски и уязвимости в узлах ТС, на связях, маршрутах, кластерах.
- В связи с задачами идентификации возникают следующие *задачи управления и развития ТС*:
1. Изучить влияние различных неблагоприятных событий на динамику потоков в ТС и разработать стратегии управления для смягчения возможных проблем.
  2. Оценить возможные пути обхода критических точек в транспортной сети города для

минимизации отрицательного воздействия на потоки движения.

3. Оценить эффективность различных стратегий управления транспортным потоком в условиях изменения пропускной способности на участках городской транспортной сети.

4. Определить оптимальное распределение ресурсов для поддержания устойчивости транспортной сети города при различных условиях эксплуатации и внешних факторах.

5. Оценить потенциал развития интеллектуальных транспортных систем (ИТС) для обеспечения эффективности и безопасности городской транспортной сети.

6. Исследовать возможные сценарии развития города и их влияние на потребности в транспортной инфраструктуре, чтобы адаптировать городскую транспортную сеть под будущие изменения.

7. Определить оптимальное размещение дополнительных ресурсов (например, служб экстренной помощи) в городе с учетом критических точек в транспортной сети для минимизации времени реагирования на аварийные ситуации.

8. Исследовать влияние строительства новых объектов инфраструктуры на пропускную способность и устойчивость городской транспортной сети.

9. Оценить потенциальные экономические потери, вызванные вероятными сбоями ТС и разработать стратегии для минимизации этих потерь, в том числе путем резервирования инфраструктуры.

10. Изучить влияние изменений в ТС на плотность населения и распределение городских районов для оптимизации городского планирования и развития.

11. Определить оптимальное размещение новых узлов и связей ТС.

Все сформулированные выше задачи в рамках одной работы вряд ли могут быть решены. Поэтому главной целью данной работы является *анализ возможностей совместного использования потоковых методов, основанных на моделях транспортного равновесия, и топологических методов для идентификации критических объектов в транспортных сетях*.

## Материалы и методы исследования

Рассмотрим основные подходы к исследованию ТС с целью их применимости к проблеме устойчивости.

### 1. Методы, основанные на равновесных потоках

Предполагается рассматривать процесс, в котором каждый участник дорожного движения стремится минимизировать свои затраты на проезд, т. е. удовлетворить свой спрос на перемещение, используя имеющееся транспортное предложение (возможности проезда). В такой бескоалиционной игре многих лиц решением является ситуация транспортного равновесия в смысле Нэша – Вардропа [1]. На этой идеи основаны методы транспортного моделирования потокового типа.

Транспортная сеть представляется в виде ориентированного графа  $G(V, E)$ , где  $V$  – множество узлов (вершин);  $E$  – множество связей сети (дуг). Пусть  $S \subseteq V$ , содержит узлы (истоки), порождающие потоки, а  $D \subseteq V$ , содержит узлы (стоки), поглощающие потоки, тогда

$$\mathbf{W} = S \times D = \{w = (i, j) : i \in S, j \in D\} \quad (1)$$

есть множество потокообразующих пар.

Маршрутом  $P_w$ , соединяющим пару  $w \in \mathbf{W}$  в сети, является путь, представляющий собой последовательность сostenкованных в неповторяющихся узлах неповторяющихся дуг графа  $G$ . Тогда множество всех путей есть

$$\mathbf{P} = \bigcup_{w \in \mathbf{W}} P_w. \quad (2)$$

Загрузка сети есть матрица  $\mathbf{x} = \{x_p, p \in \mathbf{P}\}$ ,  $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ , где  $x_p$  – объем перевозок по пути  $p$ ;  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x} \geq 0, \sum_{p \in P_w} x_p = \rho_w, w \in \mathbf{W}\}$ ,  $\rho_w$  – объем транспортных корреспонденций для пары  $w \in \mathbf{W}$ .

Стоимость пути  $C_p, \forall p \in \mathbf{P}$ , характеризует затраты на перемещение по пути  $p$ . В общем случае  $C_p = C_p(\mathbf{x})$  есть функция от загрузки. Пользователи сети выбирают путь с наименьшими транспортными затратами. Поэтому там, где пути имеют ненулевой поток  $x^*$ , затраты минимальны, т. е. если  $x^* \geq 0$ , то

$$C_p(x^*) = \min_{q \in P} C_q(x^*). \quad (3)$$

Потоки  $\mathbf{x}^* = \{x_p^*, p \in \mathbf{P}\}$ , удовлетворяющие (1), называются *равновесными* [1].

Условие (3) сводится к вариационному неравенству

$$C^T(\mathbf{x})(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \geq 0, \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbf{X},$$

позволяющему находить равновесные потоки [1].

Теория равновесных потоков предлагает методы, лежащие в основе известных систем транспортного макромоделирования [1]. Такие методы позволяют делать предсказания распределения потоков в ТС при изменении конфигурации транспортной сети. Однако они слишком затратны в вычислительном отношении. Поэтому обычно транспортную сеть «гранулируют», разбивая ее на фрагменты или так называемые транспортные районы [8], делая их узлами более простой сети. Такой процесс упрощения сети может привести к потере информации, «глубоко спрятанной» в топологии сети. В связи с этим кажется целесообразным сначала провести структурный анализ всей сети, указав наиболее влиятельные ее компоненты, и далее выделять зону влияния каждого. Это оказывается полезным для анализа сети на предмет ее устойчивости к возмущениям.

Таким образом, в дополнение к потоковым методам моделирования следует обратиться к структурным методам, в которых акцент делается на топологию сети, а сети имеют масштаб, позволяющий назвать их сложными (complex networks) [9].

## 2. Структурные методы анализа сложных сетей

Сетевые структуры, в силу их распространенности (транспортные, телекоммуникационные, энергетические, социальные, биологические и пр.), достаточно активно изучаются с использованием аппарата теории графов. Отдельно следует выделить так называемые *сложные сети* (СС), исследованию которых в последние годы уделяется много внимания [9]. Транспортные системы больших городов и их агломераций можно отнести к сложным сетям.

В СС интерес представляют такие проблемы, как выделение «тесных миров», анализ устойчивости к случайным и намеренным повреждениям, каскадные повреждения и явления перекола, самоорганизованная критичность, безмасштабные сети, фазовые переходы в сетях, синхронизация в сетях, центральность вершин. СС проявляют ряд феноменов прежде всего в силу своих топологических свойств.

**Устойчивость сетей.** Рассмотрим СС, в которых относительно малое число узлов

имеет большое число связей (узлы-хабы), а большая часть узлов – маленькое количество связей. Показано, что для большинства реальных СС вероятностный закон распределения числа связей  $q$  для узлов имеет степенной характер:  $P(q) \propto q^{-\gamma}$  и  $2 < \gamma < 3$ . Такие сети называют *безмасштабными (scale free networks)* [9]. Если в общем рассматривать отношение числа удаленных узлов ко всему числу узлов в сети, то существует определенное критическое значение, выше которого сеть распадается на отдельные фрагменты. Для безмасштабных сетей, когда показатель степени  $\gamma \leq 3$ , такого явления в целом не наблюдается. Эта устойчивость объясняется неоднородной топологической структурой этих сетей. Однако целенаправленное повреждение одного или нескольких хабов ведет к дезинтеграции сети.

**Индексы центральности.** Меры влияния (важности) узла или связи часто связывают с центральностью (centrality) [10]. Концепция центральности первоначально возникла в социальных сетях для выявления наиболее влиятельных лиц. Многие термины оттуда перешли в прикладные исследования сетей различной природы. Ключевые узлы инфраструктуры физических сетей, в том числе транспортных, многие авторы рассматривают с этих позиций, давая им соответствующие интерпретации. Однако, как показано в [11], степень влияния узла сети связана с мерой центральности.

**Индекс доступности.** Индексы центральности могут хорошо оценивать узлы-хабы, но менее информативны для большей части нехабовых узлов [11], поскольку точность меры центральности существенно зависит от топологии сети. Наиболее общей мерой является *доступность* узла при случайному блуждании по сети.

Обратимся вновь к графу  $G = (V, E)$  с вершинами  $V$  и дугами  $E$ . Определим матрицу  $\mathbf{Q} = \{q_{ij}\}$ , где  $(i, j) = w \in W$  (см. п. 1), которая совпадает с матрицей корреспонденций  $\mathbf{X}$  для маршрутов, состоящих из только из одной дуги графа, соединяющей соседние узлы. Рассмотрим процесс случайногоневозвратного блуждания [12], описываемый марковской цепью со случайным вектором начальных состояний  $\boldsymbol{\pi} = \{\pi_i \geq 0, \sum_{i \in D} \pi_i = 1\}$  и матрицей переходных вероятностей

$$\mathbf{P} = \left\{ p_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_{k \in D} q_{ik}} \right\}, \quad (4)$$

где  $q_{ij} = p_w, w \in \mathbf{W}$  – транспортные корреспонденции соседних узлов.

Поскольку ТС города представляет собой связный граф, то марковская цепь *эргоидична*, и для любого вектора начальных состояний процесс блуждания, описываемый уравнением

$$\boldsymbol{\pi}^{(k+1)} = \mathbf{P}\boldsymbol{\pi}^{(k)} = \mathbf{P}^k \boldsymbol{\pi}, k = 0, \dots, \infty, \quad (5)$$

сходится к некоторому предельному вектору  $\boldsymbol{\pi}$ , являющемуся собственным вектором, удовлетворяющим уравнению  $\mathbf{P}\boldsymbol{\pi} = \lambda\boldsymbol{\pi}$ . *Транспортная интерпретация* такова: финальный вектор распределения вероятностей состояний узлов сети характеризует вероятности попадания в них транспортных средств независимо от их начального состояния. Таким образом, *важность* узла определяется тем, насколько он часто посещаем, а следовательно *доступен*. Эта мера доступности относится к классу мер, основанных на собственных векторах.

В [13, 14] предлагается другой вариант меры доступности следующего вида:

$$h_i^{(k)} = \exp(-\sum_{j \in D} p_{ij}^{(k)} \log p_{ij}^{(k)}), i \in S, \quad (6)$$

где  $k$  – число шагов;  $p_{ij}^{(k)} \in \mathbf{P}^k$ .

Эту меру можно интерпретировать как энтропийную, поскольку показатель доступности примет минимальное значение, если распределение вероятностей перехода в соседние состояния будет равномерным, что характеризует узел с максимальной неопределенностью.

**Индекс влиятельности.** Данный показатель большее значение придает связям, которые ведут к другим влиятельным узлам, т. е. к узлам с высоким показателем связности [10]. С точки зрения ТС это означает, что хабы образуют систему с высокой степенью связности. Показатель влиятельности для каждого узла выражается уравнением

$$y_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j \in D} q_{ij} y_j, i \in S, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – константа.

В матричном виде это выглядит таким образом:

$$\mathbf{Q}\mathbf{y} = \lambda\mathbf{y}. \quad (8)$$

Собственный вектор  $\mathbf{y}$  соответствует максимальному собственному числу. Поскольку все элементы матрицы  $\mathbf{Q}$  положительны, то максимальное собственное число будет ве-

ственным и единственным согласно теореме Фробениуса – Перрона [15, 16].

**Индекс посредничества.** Данный показатель выражает для некоторого узла  $v_k \in S$  транспортной сети степень его участия в качестве посредника при транспортных коммуникациях [10]. При разрушении такого узла может существенно увеличиться общая стоимость перевозок, поскольку придется использовать более дорогие обходные пути.

Для каждой пары вершин  $w(k) \in \mathbf{W}$  вычисляется путь с наименьшей стоимостью:

$$p_{w(k)} = \arg \min_{p_w \in P_w} C_{p_w}, \quad (9)$$

проходящий через узел  $v_k$ .

Далее рассчитывается количество всех таких путей через данный узел:  $\sigma(k) = |p_{w(k)}, \forall w(k) \in \mathbf{W}|$  и количество всех путей:  $\sigma = |p_w, \forall w \in \mathbf{W}|$ . Тогда индекс посредничества есть

$$I_m = \frac{\sigma(k)}{\sigma}. \quad (10)$$

Следует заметить, что вычислительная сложность задачи (7) существенна и равна  $O(|V|^3)$  при использовании алгоритма Флойда – Уоршелла. Однако на разреженных сетях можно использовать алгоритм Джонсона, для которого  $O(|V|^2 \log V + VE)$  [17].

**Индекс связности.** Этот показатель характеризует узел  $v_k \in S$  по количеству входящих и выходящих связей. Он является наиболее простым с точки зрения вычисления. Формально индекс связности представляется следующим выражением:

$$I_D(v_k) = \sum_{j \in D} q_{kj} + \sum_{i \in S} q_{ik}. \quad (11)$$

Для ТС его можно интерпретировать как меру участия узла в связности сети. Высокое значение индекса связности характеризует узел как хаб. Разрушение хаба может повлечь для безмасштабных сетей ТС коллапс сети в целом. Временная вычислительная сложность –  $O(V^2)$ .

Обобщением индекса связности является индекс центральности узла по Кацу [10, 18]:

$$y_k = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{|V|} \alpha^i (\mathbf{Q}^i)_{jk}, \alpha \in [0, 1]. \quad (12)$$

В [11] показано, что (12) эквивалентно

$$y_k = \alpha \sum_{j=1}^{|V|} q_{jk} (y_j + 1), \quad (13)$$

и главный собственный вектор  $\lambda$  матрицы  $\mathbf{Q}$  является пределом центральности по Кацу при  $\alpha \rightarrow 1/\lambda$ .

С формальной точки зрения индекс центральности по Кацу характеризует *влиятельность узла*, поскольку выражение (13) близко к выражению к (7). Однако он интересен также с точки зрения связности ТС, поскольку  $i$ -я степень матрицы  $Q$  в (12) отражает пути длиной  $i$ , связывающие  $k$ -й узла с другими узлами.

### Результаты исследования

1. В данной работе показано, что потоковые методы анализа ТС следует дополнить структурными методами, в которых акцент делается на топологию транспортных сетей. Целесообразно сначала провести структурный анализ всей сети, указав наиболее влиятельные ее компоненты и далее выделять зону влияния каждого. Это оказывается полезным не только для моделирования потоков, но и для анализа сети на предмет ее устойчивости к возмущениям. Понятие влиятельного элемента приводит к понятию критического элемента и в связи с этим к понятию устойчивой системы.

2. Устойчивая транспортная система является важной концепцией для разработки и внедрения интеллектуальных транспортных систем. Она включает в себя понятия надежности и безопасности. Ключевыми элементами устойчивой ТС являются так называемые критические объекты транспортной инфраструктуры, которые проявляют ряд особых свойств. При разрушении таких элементов происходит критическое изменение характеристик ТС. В данной работе для ТС выявлены наиболее важные свойства такого типа.

3. ТС имеют свои особенности. Необходимо среди многочисленных способов выбора критических объектов остановиться на наиболее приемлемых с точки зрения интерпретируемости для ТС и вычислительной сложности.

4. Критические объекты – предмет прикладных исследований в теории графов, используется в различных предметных областях (социальные сети, связь, Веб, эпидемиология, биология, транспорт и пр.). Для них имеется богатый арсенал инструментов. Транспортные сети проявляют свойства сложных сетей. Исследования в области теории СС позволяют анализировать их современными методами, ранее не используемыми в ТС. Предлагаемые методы являются полезными при транспортном планировании, обслуживании ТС, проектировании объектов транспортной инфраструктуры, создании интеллектуальных транспортных сетей.

5. Явление распространения заторов на сети не нашло должного отражения в данной работе и предполагает отдельное исследование.

### Заключение

Приведенный анализ индексов критичности узлов транспортной сети позволяет использовать их в качестве критериев для оценки их важности для сети в целом с точки зрения топологии сложной сети. Вместе с тем наличие инструментов анализа равновесных транспортных потоков дает возможность проверить их влияние на характеристики потоков в случае разрушения узлов или отдельных связей.

Применимость данного подхода апробирована на ряде объектов транспортной сети г. Новосибирска.

### Список источников

1. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский [и др.] ; под ред. А. В. Гасникова. Москва : Московский физико-технический институт (государственный университет), 2010. 360 с.
2. Загидуллин Р. Формирование устойчивой транспортной системы на основе функциональной модели «среда – участник – транспорт инфраструктура» // International Journal of Advanced Studies. 2021. № 11 (3). Р. 7–34. doi.org/10.12731/2227-930X-2021-11-3-7-34.
3. Завьялов Д. В. Концепция устойчивой мобильности в современных мегаполисах // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2021. Т. 12, № 3. С. 288–305. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2021.12.3.288-305>.
4. Крыгин А. А., Куприянов Б. В. Определение критических узлов транспортной сети // Управление большими системами. 2022. № 100. С. 194–215. DOI 10.25728/ubs.2022.100.9.
5. Хабаров В. И., Петров С. М., Макаров Р. И. Решение локальных проблем адаптации транспортной инфраструктуры в условиях развития крупного города и его агломерации // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 85–92. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_64\_85.

6. Complexity and Vulnerability Analysis of Critical Infrastructures: A Methodological Approach / Y. Deng, L. Song, Z. Zhou, P. Liu // Hindawi Mathematical Problems in Engineering. 2017. Vol. 2. P. 1–12. Article ID8673143.
7. Mattsson L., Jenelius E. Vulnerability and resilience of transport systems A discussion of recent research // Transportation Research Part A-policy and Practice. 2015. Vol. 81. P. 16–34.
8. Якимов М. Р., Попов Ю. А. Транспортное планирование: практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в программном комплексе PTV Vision® VISUM. Москва : Логос, 2014. 200 с.
9. Евин И. А. Введение в теорию сложных сетей // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. Т. 2, № 2. С. 121–141.
10. Щербакова Н. Г. Меры центральности в сетях // Проблемы информатики. 2015. № 1. С. 18–30.
11. Borgatti S., Everett M. A graph-theoretic perspective on centrality // Social Networks. 2006. Part 28. DOI 10.1016/j.socnet.2005.11.005.
12. Хабаров В. И., Теселкин А. А. Марковские модели в задачах оценивания транспортных корреспонденций // Научный вестник НГТУ. 2016. Т. 62, № 1. С. 91–105. DOI 10.17212/1814-1196-2016-1-91-105.
13. Viana M. P., Batista J. L., Costa L. da F. Effective number of accessed nodes in complex networks // Physical Review E. 2012. Vol. 85, Iss. 3, March. P. 036105. DOI 10.1103/PhysRevE.85.036105. PMID 22587147.
14. Travencolo B. A. N., Costa L. da F. Accessibility in complex networks // Physics Letters A. 2008. Vol. 373, Iss. 1, 22 December. P. 89–95. DOI 10.1016/j.physleta.2008.10.069.
15. Newman M. E. J. The mathematics of networks. URL: <http://wwwpersonal.umich.edu/~mejn/papers/palgrave.pdf> (дата обращения: 06.06.2024).
16. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. Москва: Наука, 1966. 576 с.
17. Белоусов А. И., Ткачев С. Б. Дискретная математика. Москва : МГТУ, 2006. 744 с.
18. Bonacich P. Simultaneous group and individual centralities // Social Networks. 1991. Vol. 13. P. 155–168.

## References

1. Gasnikov A. V., Klenov S. L., Nurminsky E. A. [et al.]. Ed. by A. V. Gasnikov. Introduction to mathematical modeling of traffic flows. Moscow: Moscow Institute of Physics and Technology (State University); 2010. 360 p. (In Russ.).
2. Zagidullin R. Formation of a sustainable transportation system based on the functional model environment – participant – transportation infrastructure. *International Journal of Advanced Studies*. 2021;11(3):7–34. (In Russ.). doi.org/10.12731/2227-930X-2021-11-3-7-34.
3. Zavyalov D. V. Concept of sustainable mobility in modern megacities. *MID (Modernization. Innovation. Development)*. 2021;12(3):288–305. (In Russ.). <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2021.12.3.288-305>.
4. Krygin A. A., Kupriyanov B. V. Determination of critical nodes of a transportation network. 2022;(100):194–215. (In Russ.). DOI 10.25728/ubs.2022.100.9
5. Khabarov V. I., Petrov S. M. M., Makarov R. I. Solution of local problems of transport infrastructure adaptation in the conditions of development of a large city and its agglomeration. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(64):85–92. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_64\_85.
6. Deng Y., Song L., Zhou Z., Liu P. Complexity and Vulnerability Analysis of Critical Infrastructures: A Methodological Approach. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*. 2017;2:1–12. Article ID8673143.
7. Mattsson L., Jenelius E. Vulnerability and resilience of transportation systems A discussion of recent research. *Transportation Research Part A-policy and Practice*. 2015;81:16–34.
8. Yakimov M. R., Popov Yu. A. Transport planning: practical recommendations for creating transportation models of cities in the PTV Vision® VISUM software package. Moscow: Logos; 2014. 200 p. (In Russ.).
9. Evin I. A. Introduction to the theory of complex networks. *Computer research and modeling*. 2010;2(2):121–141. (In Russ.).
10. Scherbakova N. G. Centrality measures in networks. *Problems of Informatics*. 2015;(1):18–30. (In Russ.).
11. Borgatti S., Everett M. A graph-theoretic perspective on centrality. *Social Networks*. 2006. Part 28. DOI 10.1016/j.socnet.2005.11.005.
12. Khabarov V. I., Teselkin A. A. Markov models in problems of transportation correspondence estimation. *Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*. 2016;62(1):91–105. (In Russ.). DOI 10.17212/1814-1196-2016-1-91-105.
13. Viana M. P., Batista J. L., Costa L. da F. Effective number of accessed nodes in complex networks. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*. 2012 Mar; 85 (3 Pt 2):036105. DOI 10.1103/PhysRevE.85.036105. Epub 2012 Mar 12. PMID 22587147.

14. Travencolo B. A. N., Costa L. da F. Accessibility in complex networks. *Phys Lett A*. 2008. Vol. 373, Iss. 1, 22 December. P. 89–95. DOI 10.1016/j.physleta.2008.10.069.
15. Newman M. E. J. The mathematics of networks. URL: <http://wwwpersonal.umich.edu/~mejn/papers/palgrave.pdf>.
16. Gantmacher F. R. Theory of matrices. Moscow: Nauka; 1966. 576 p. (In Russ.).
17. Belousov A. I., Tkachev S. B. Discrete Mathematics. Moscow: Moscow State Technical University; 2006. 744 p. (In Russ.).
18. Bonacich P. Simultaneous group and individual centralities. *Social Networks*. 1991;13:155–168.

### **Информация об авторах**

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

*М. А. Беков* – аспирант кафедры «Информационные технологии на транспорте» Сибирского государственного университета путей сообщения.

*В. Е. Квашнин* – аспирант кафедры «Информационные технологии на транспорте» Сибирского государственного университета путей сообщения.

### **Information about the authors**

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

*M. A. Bekov* – Postgraduate of the Information Technologies in Transport Department, Siberian Transport University.

*V. E. Kvashnin* – Postgraduate of the Information Technologies in Transport Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 20.06.2024; одобрена после рецензирования 03.07.2024; принята к публикации 09.07.2024.

The article was submitted 20.06.2024; approved after reviewing 03.07.2024; accepted for publication 09.07.2024.

## ТРАНСПОРТ

Научная статья  
УДК 656.222.6  
doi 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_28

### Формирование многофакторных матриц эксплуатационных показателей при различных вариантах конфигурации однопутного полигона и системах интервального регулирования движения поездов

Николай Игоревич Осипов

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

**Аннотация.** На современном этапе значительное развитие систем автоматики и телемеханики обусловило многообразие режимов эксплуатации сети железных дорог, в связи с чем более детального исследования требует определение потенциала систем интервального регулирования движения поездов для повышения эффективности перевозочного процесса на однопутных железнодорожных полигонах. Целью работы является оценка эффективности применения различных вариантов интервального регулирования на однопутных полигонах в условиях роста размеров движения и сочетаний дестабилизирующих факторов при сопоставлении с переходом на двухпутную конфигурацию полигона. Для симуляции работы полигона за действовано многоподходное моделирование, включающее применение процессного подхода для имитации действий дежурного персонала по пропуску поездов, агентного моделирования для имитации выбора режима движения поезда и системной динамики для проведения тяговых расчетов в режиме реального времени. Предложен подход к оценке эффективности применения интервального регулирования на основе анализа матриц показателей и конфигурации однопутного полигона. При двухпутной конфигурации полигона растущие размеры движения вкупе с дестабилизирующими факторами снижают маршрутную скорость, а при однопутной, помимо замедления поездопотока, вызывают дефицит пропускной способности, ведущий к увеличению объема требуемой инфраструктуры. Значительное улучшение показателей и снижение потребности в дополнительной инфраструктуре при однопутной конфигурации обеспечивают переходы от традиционной автоблокировки с «фиксированными» блок-участками к виртуальной сцепке и от автоблокировки с «подвижными» блок-участками к координатной системе интервального регулирования. Интервальное регулирование на однопутном полигоне может стать одним из действенных инструментов интенсификации перевозочного процесса, позволяющим сократить экстенсивное увеличение инфраструктуры полигона. При этом следует отметить отсутствие универсального для однопутных полигонов варианта интервального регулирования и необходимость изменения существующей инфраструктуры для максимальной реализации потенциала данной технологии.

**Ключевые слова:** системы интервального регулирования движения поездов, однопутные железнодорожные полигоны, многоподходное имитационное моделирование, матрицы показателей и конфигурации, технологическая эффективность

**Для цитирования:** Осипов Н. И. Формирование многофакторных матриц эксплуатационных показателей при различных вариантах конфигурации однопутного полигона и системах интервального регулирования движения поездов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 28–39. DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_28.

## TRANSPORT

Original article

### Formation of operational indicators multi-factor matrices under different variants of single-track polygon configuration and interval train control systems

Nikolay I. Osipov

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

**Abstract.** At the present stage, the significant development of automation and telemechanics systems has led to a variety of railway network operation modes, in connection with that a more detailed study is required to determine the potential of interval train control systems to improve the efficiency of the transportation process on

single-track railway polygons. The aim of the work is to evaluate the efficiency of different variants of interval regulation on single-track polygons in conditions of traffic size growth and destabilising factors combinations in comparison with transition to a double-track configuration of the polygon. Multi-approach modelling is used to simulate the operation of the polygon, including application of process approach for simulation of on-duty personnel actions on train passing, agent-based modelling for simulation of train mode selection and system dynamics for real-time traction calculations. The approach to estimation of interval regulation efficiency application on the basis of indicators and configuration matrices analysis of single-track polygon is offered. In a double-track configuration of the polygon, increasing traffic sizes, coupled with destabilising factors reduce the route speed, while in a single-track configuration, in addition to slowing down the train flow, they cause a capacity deficit leading to an increase in the amount of required infrastructure. Significant improvement of indicators and reduction of requirements in additional infrastructure at single-track configuration provide transitions from traditional autoblocking with «fixed» blocks to virtual coupling and from autoblocking with «moving» blocks to coordinate system of interval regulation. Interval regulation on a single-track polygon can become one of the effective tools of transport process intensification, allowing to reduce extensive increase of the polygon infrastructure. It should be noted that there is no universal variant of interval regulation for single-track polygons and it's necessary to change the existing infrastructure to maximise the potential of this technology.

**Keywords:** interval train control systems, single-track railway polygons, multi-approach simulation modelling, indicators and configuration matrices, technological efficiency

**For citation:** Osipov N. I. Formation of operational indicators multi-factor matrices under different variants of single-track polygon configuration and interval train control systems. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):28–39. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_28.

## Введение

Значительный рост грузопотоков в восточном и южном направлениях обусловил работу транспортной инфраструктуры России в условиях дефицита резервов инфраструктуры, в связи с чем требуется внедрение инноваций. Актуальным способом повышения пропускной способности железнодорожных полигонов является сокращение межпоездных интервалов, что обуславливает востребованность работ по проектированию, оценке эффективности и внедрению систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП).

Значительное внимание при оценке эффективности различных вариантов интервального регулирования удалено анализу устойчивости поездопотока к сбоям, отклонениям и инфраструктурным ограничениям. Так, на данный момент специалистами УрГУПС на основе комплекса «ИМЕТРА» определена степень положительного влияния виртуальной сцепки на восстановление движения после отказа с перерывом в движении [1, с. 71]; учеными НИИАС проведена графическая оценка пропускной способности участка для различных длин зон (и величин) ограничения скорости, на основе которой сделан вывод о положительном влиянии применения виртуальной сцепки поездов на пропускную способность [2, с. 39]; сотрудниками ДонИЖТ проведен расчет допустимого времени отсутствия радиосвязи в СИРДП на базе цифрового радиоканала [3, с. 131]. Анализ достижений в области оценки эффективности СИРДП показывает, что детальной оценки тре-

буют как многие другие дестабилизирующие перевозочный процесс факторы (например, различного вида неравномерности), так и варианты СИРДП (до предполагающих координатное интервальное регулирование включительно).

Внедрение СИРДП, ввиду их дороговизны, приоритетно на двухпутных особо грузонапряженных линиях, где на данный момент имеет место острый дефицит пропускной способности [4, с. 40]. Однако на данный момент в отечественных теории и практике становится актуальным внедрение СИРДП на однопутных линиях в качестве альтернативы возведению вторых главных путей [5, с. 22]. В связи с достаточной степенью проработанности научный интерес представляют теоретические аспекты оценки эффективности СИРДП на зарубежных однопутных полигонах.

Учеными США выполнено имитационное моделирование однопутного участка при различных вариантах его конфигурации, СИРДП, структуры поездопотока, технологии организации его движения и доказана эффективность «подвижных» блок-участков как меры по повышению качества движения грузовых поездов наименьшего приоритета [6, с. 155]) благодаря ускорению процесса скрещения поездов на промежуточных станциях [7]. Вместе с тем результаты заграничных исследований не могут быть перенесены на отечественные железные дороги без адаптации ввиду отличий как технико-экономических характеристик СИРДП [8, с. 19], так и размеров резервов инфраструктуры железнодорожного транспорта

[9, с. 27], вплоть до наличия специализированных для грузовых перевозок линий [10, с. 16] с менее строгими требованиями к системам автоматики и телемеханики.

Отечественные исследования в области оценки эффективности сокращения межпоездных интервалов на однопутных линиях главным образом затрагивают определение положения автоблокировки с «фиксированными» блок-участками (без ранжирования других СИРДП) в иерархии мероприятий по освоению возрастающих размеров движения [11, с. 27], оценку потенциала традиционной автоблокировки в сравнении с полуавтоблокировкой в качестве инструмента для нейтрализации негативного влияния суточной неравномерности на перевозочный процесс [12, с. 69].

Другим направлением является исследование характеристик поездопотока при устранении скрещений (одного из ключевых факторов, снижающих эффективность СИРДП на однопутных линиях) и переходу к безостановочному движению, характерному для двухпутных полигонов. Указанный переход возможен при наличии значительной непарности размеров движения (вплоть до специализации однопутных участков для пропуска поездов в одном из направлений [13, с. 11]) или при внедрении блок-пакетного типа графика движения [14, с. 203]. Однако если первый вариант в некоторых случаях возможен, то второй окажет серьезное негативное влияние на срок доставки грузов и ухудшит показатели использования локомотивного парка, сбои в работе которого способны полностью нивелировать эффект от сокращения межпоездного интервала.

Целью данного исследования является сравнение технологической эффективности текущих, передовых, перспективных СИРДП на эксплуатируемом однопутном полигоне между собой и с вариантом, предполагающим его перевод на двухпутную конфигурацию при сохранении автоблокировки с «фиксированными» блок-участками.

### Материалы и методы

Для исследования задействовано многоподходное моделирование работы однопутного полигона в течение суток в среде AnyLogic (предполагающее процессный подход, системную динамику и агентное моделирование) с целью

компенсации недостатков одних подходов достоинствами других и получения более достоверной имитации продвижения поездопотока по полигону. Детальное описание авторской методики моделирования перевозочного процесса на однопутном полигоне при различных СИРДП, уровне инфраструктуры и применяемом типе графика движения поездов изложено в работе [5].

Процессный подход задействован для принятия пользователем решений о приеме или проследовании поездов по каждой из станций линии и имитации логики работы участковых станций. При следовании поезда с помощью диаграмм состояний и переходов между ними для каждого из агентов-поездов симулируется логика действий машиниста по выбору режимов ведения, работа локомотивной сигнализации и соединение по цифровой радиосвязи. Посредством системной динамики с помощью взаимосвязей между накопителем, параметрами, табличными функциями, простыми и динамическими переменными методом Эйлера решается основное уравнение движения поезда в режиме реального времени.

Валидация авторской модели и оценка эффективности интервального регулирования проведена на одном из однопутных полигонов железной дороги, на котором, в соответствии со Стратегией развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года, планируется возведение сплошных вторых главных путей (табл. 1). Сопоставление количественных и качественных показателей работы реального полигона и его имитационной модели позволяет судить о допустимости применения многоподходного моделирования для достоверной оценки качества продвижения поездопотоков.

В данном исследовании оценено влияние ограничений скорости (рис. 1), суточной неравномерности (пиковые значения коэффициента неравномерности на практике могут достигать значения 1,3 [15, с. 9]; аналогичное значение используется и при проведении теоретических исследований [12, с. 69]) и поступления на полигон поездов с отклонением от нормативного графика на 30 мин (на величину, являющуюся достаточно репрезентативной для оценки эффективности различных решений по нагону поездами ниток нормативного графика [16, с. 32]).

Таблица 1

## Характеристики исследуемого полигона, закладываемые в модель

Параметр	Базовое значение
Количество участков	2
Протяженность	169 км
Установленная скорость движения: грузовых поездов	80 км/ч
пассажирских поездов	120 км/ч
Количество приемо-отправочных путей на промежуточных (участковых) станциях	34 (10)
Руководящий уклон	9 ‰
Количество кривых	220
Количество промежуточных станций	14
Количество участковых станций	1
Унифицированный межпоездной интервал по условиям энерго- снабжения (нечетное направление/четное направление)	10 мин /13 мин
Род тяги	Электровозная (94 км постоянного тока, 61 км переменного тока)
Эксплуатируемая СИРДП	Автоблокировка АБТЦ
Серия грузовых локомотивов: на участке постоянного тока	2ЭС6
на участке переменного тока	ВЛ80С
Серия пассажирских локомотивов (электропоездов): на участке постоянного тока	ЭП2К (ЭД4)
на участке переменного тока	ЭП1 (ЭД9М)
Норма массы и длины грузовых поездов	4 000 т, 62 ваг.
Норма массы и длины контейнерных поездов	2 500 т, 45 ваг.
Норма массы пассажирских поездов	1 100 т
Размеры движения пассажирских (пригородных) поездов	5 пар (23 пары)

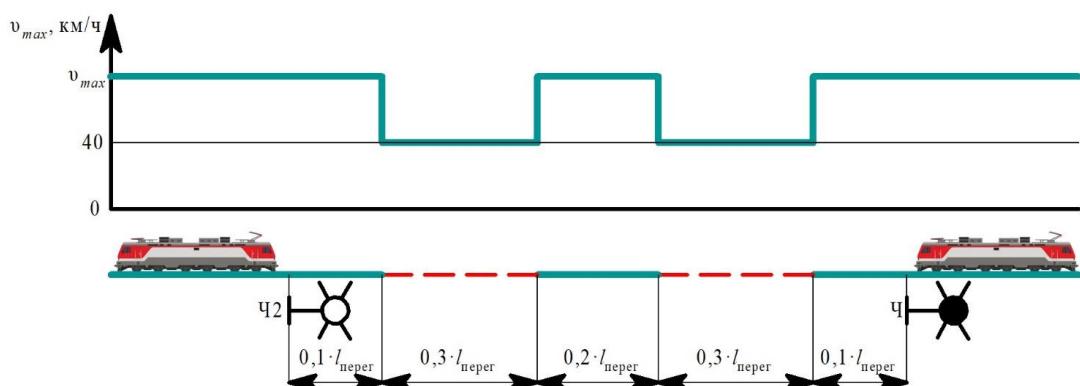


Рис. 1. Расположение зон действия ограничений скорости на перегонах

Рассмотрена эксплуатационная работа однопутного полигона в условиях действия автоблокировки с «фиксированными» блок-участками АБТЦ, виртуальной сцепки пяти поездов (ВСЦ), автоблокировки с «подвижными» блок-участками АБТЦ-МШ, координатной системы интервального регулирования КСИР (в форме перспективной системы «Анаконда» [17, с. 31], разработанной в НИИАС).

Для удобства анализа результатов данного исследования задействованы матричное их представление и наличие двух акторов – ха-

рактерных элементов раздела теории игр, называемого играми с природой, при которых сознательно действует только один из участников (игрок), а второй участник (природа) выполняет функции генератора случайных чисел (табл. 2).

При предлагаемой методике главным результатом проведения суточных прогнозов является система матриц показателей и конфигурации однопутного полигона (рис. 2), помимо табличного формата возможно их графическое отображение.

Таблица 2

**Параметры стратегий игрока и состояний природы**

Параметр	Принимаемые значения
<i>Стратегия игрока</i>	
Количество главных путей на перегоне	1; 2
Система интервального регулирования (для однопутной конфигурации)	АБТЦ; ВСЦ; АБТЦ-МШ; КСИР
Система интервального регулирования (для двухпутной конфигурации)	АБТЦ
Планируемые размеры движения, пар грузовых поездов	16; 28; 40
Доля контейнерных поездов от общего количества грузовых поездов	0,25; 0,75
<i>Состояние природы</i>	
Доля движения поездопотока при действии временных ограничений скорости (до 40 км/ч) относительно протяженности полигона	0; 0,6
Доля грузовых поездов, поступивших на полигон с отклонением от нормативного графика на 30 мин	0; 0,3
Коэффициент суточной неравномерности поступления поездов на полигон	1; 1,3
Доля выполненной средней массы грузовых поездов брутто от нормы массы	0,95; 0,7

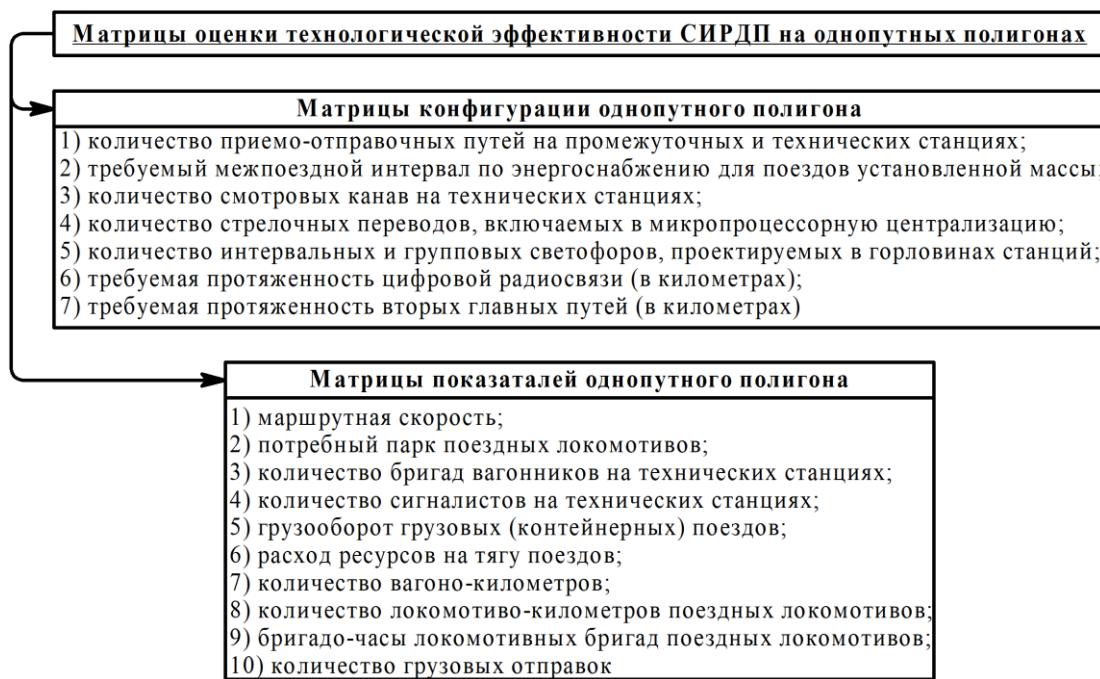


Рис. 2. Схема совокупности матриц для оценки эффективности СИРДП

**Результаты и обсуждение**

Значения маршрутной скорости (рис. 3), числа дополнительных путей на промежуточных и участковой станциях (рис. 4), минимального межпоездного интервала по условиям энергоснабжения (табл. 3) и грузооборота (табл. 4) отражают различия между сочетаниями стратегий игрока и состояний природы.

При однопутной конфигурации полигона часть поездопотока не успела преодолеть всю

его протяженность в течение моделируемых суток, при этом по мере перехода от АБТЦ к КСИР количество таких поездов сокращалось. Вследствие сокращения простоя поездов под скрещением при более совершенной СИРДП становится возможным увеличение маршрутной скорости. Двухпутная конфигурация полигона позволяет освоить рассмотренные размеры движения в полном объеме с обеспечением более высокой скорости их движения.

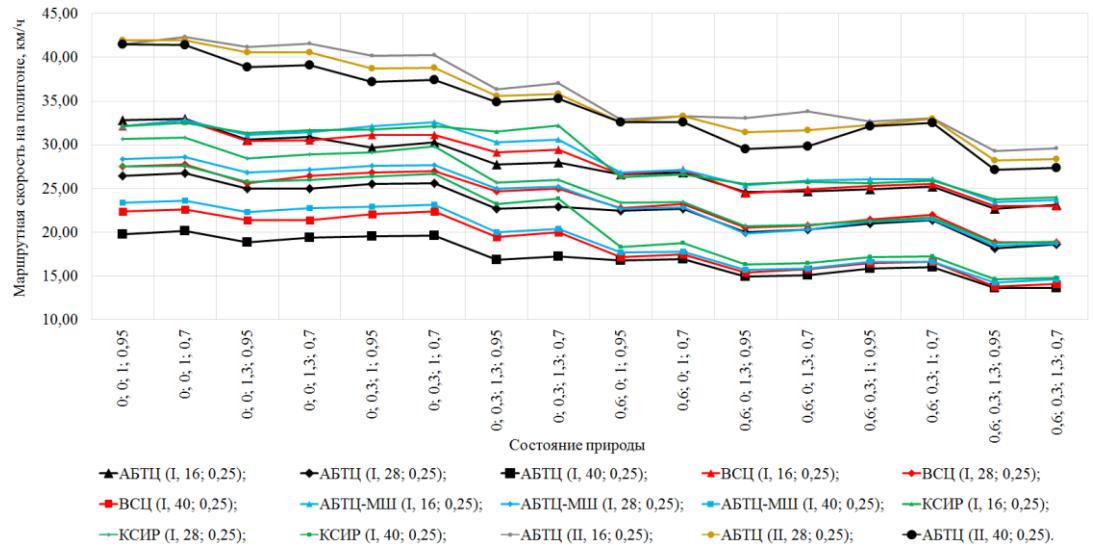


Рис. 3. Маршрутная скорость по результатам моделирования:

0,6; 0,3; 1,3; 0,7 – состояние природы, при котором ограничениями скорости охвачено 0,6 протяженности полигона, доля поступивших с опозданием поездов составляет 0,3, коэффициент суточной неравномерности равен 1,3, масса брутто грузового поезда составляет 0,7 от нормы; АБТЦ (I, 16; 0,25) – стратегия, предполагающая использование АБТЦ, один сплошной главный путь, 16 пар грузовых поездов, из которых 0,25 составляют контейнерные поезда

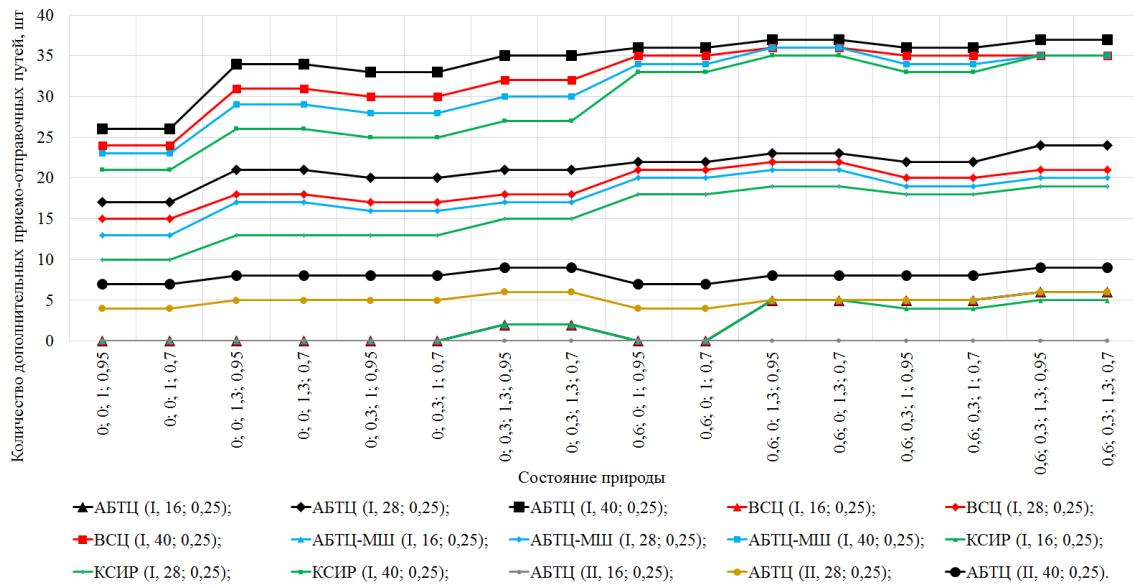


Рис. 4. Потребное количество дополнительных приемо-отправочных путей:

0,6; 0,3; 1,3; 0,7 – состояние природы, при котором ограничениями скорости охвачено 0,6 протяженности полигона, доля поступивших с опозданием поездов составляет 0,3, коэффициент суточной неравномерности равен 1,3, масса брутто грузового поезда составляет 0,7 от нормы; АБТЦ (I, 16; 0,25) – стратегия, предполагающая использование АБТЦ, один сплошной главный путь, 16 пар грузовых поездов, из которых 0,25 составляют контейнерные поезда

За счет сокращения простоев под скрещением на полигоне, позволяющего минимизировать количество конфликтных ситуаций между транзитным поездопотоком и местными грузовыми и пассажирскими поездами, при более совершенной СИРДП требуется

меньшее количество приемо-отправочных путей на промежуточных станциях. При двухпутной конфигурации, вследствие движения грузовых поездов в безостановочных зонах, приемо-отправочные пути необходимо добавлять только на участковой станции.

Таблица 3

Матрица минимальных интервалов по условиям энергетики в нечетном и четном направлении, мин

		Стратегия игрока				Состояние природы			
		0; 0; 1; 0,95		0; 0; 1; 0,95		0,6; 0; 1; 0,95		0,6; 0; 1; 0,95	
		0; 0; 1; 0,95	0; 0; 1; 0,95	0; 0; 1; 0,95	0; 0; 1; 0,95	0,6; 0; 1; 0,7	0,6; 0; 1; 0,7	0,6; 0; 1; 0,7	0,6; 0; 1; 0,7
АБТЦ (I, 16; 0,25)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)
АБТЦ (I, 28; 0,25)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)
АБТЦ (I, 28; 0,75)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)
АБТЦ (I, 40; 0,25)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)
АБТЦ (I, 40; 0,75)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)
ВСЦ (I, 16; 0,25)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)
ВСЦ (I, 28; 0,25)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)
ВСЦ (I, 28; 0,75)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)	8 (8)
ВСЦ (I, 40; 0,25)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)
ВСЦ (I, 40; 0,75)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)
АБТЦ-МШ (I, 16; 0,25)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)
АБТЦ-МШ (I, 28; 0,25)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)
АБТЦ-МШ (I, 28; 0,75)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)
АБТЦ-МШ (I, 40; 0,25)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)
АБТЦ-МШ (I, 40; 0,75)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)
КСИР (I, 16; 0,25)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)
КСИР (I, 28; 0,25)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)
КСИР (I, 28; 0,75)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)	6 (6)
КСИР (I, 40; 0,25)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)
КСИР (I, 40; 0,75)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)
АБТЦ (II, 28; 0,25)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)
АБТЦ (II, 40; 0,25)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)
АБТЦ (II, 40; 0,75)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)	10 (13)

*Примечание.* Вне скобок приведен интервал для нечетных поездов, в скобках – для четных; 0,6; 0,3; 1,3; 0,7 – состояния природы, при котором действием временных ограничений скорости до 40 км/ч охвачено 0,6 протяженности полигона, доли попавших на полигон с опозданием в 30 мин грузовых поездов составляет 0,3, коэффициент суюточной неравномерности – 1,3, реализованная масса брутто грузового поезда – 0,7 от установленной нормы массы; АБТЦ (I, 16; 0,25) – стратегия игрока, предполагающая на полигоне использование системы АБПЦ, один сплошной главный путь, 16 пар грузовых поездов, из которых 0,25 составляют контейнерные поезда.

Таблица 4

## Матрица дополнительного грузооборота на однопутном полигоне, млрд т·км нетто

		Состояние природы									
Стратегия игрока		0; 0,3; 1; 0,7	0; 0,3; 1; 0,95	0; 0,3; 1; 0,7	0; 0,3; 1; 0,95	0; 0,3; 1; 0,7	0; 0,3; 1; 0,95	0; 0,3; 1; 0,7	0; 0,3; 1; 0,95	0; 0,3; 1; 0,7	0; 0,3; 1; 0,95
АБГЦ (I, 28; 0,25)	2,39 (0,60)	1,76 (0,44)	3,45 (1,00)	2,54 (0,74)	2,39 (0,60)	1,76 (0,44)	3,45 (1,00)	2,54 (0,74)	2,39 (0,60)	1,76 (0,44)	2,65 (0,80)
АБГЦ (I, 40; 0,25)	4,77 (1,20)	3,51 (0,88)	7,16 (1,80)	5,28 (1,33)	4,77 (1,20)	3,51 (0,88)	7,16 (1,80)	5,28 (1,33)	3,45 (0,60)	2,54 (0,44)	4,24 (0,80)
АБГЦ (I, 40; 0,75)	1,20 (4,77)	0,88 (3,51)	1,80 (7,16)	1,33 (5,28)	1,20 (4,77)	0,88 (3,51)	1,80 (7,16)	1,33 (5,28)	0,60 (3,45)	0,44 (2,54)	3,12 (4,24)
ВСЦ (I, 28; 0,25)	2,39 (0,60)	1,76 (0,44)	3,45 (1,00)	2,54 (0,74)	2,39 (0,60)	1,76 (0,44)	3,45 (1,00)	2,54 (0,74)	2,39 (0,60)	1,76 (0,44)	3,45 (0,80)
ВСЦ (I, 28; 0,75)	0,60 (2,39)	0,44 (1,76)	1,00 (3,45)	0,74 (2,54)	0,60 (2,39)	0,44 (1,76)	1,00 (3,45)	0,74 (2,54)	0,60 (1,76)	0,44 (1,18)	0,59 (2,39)
ВСЦ (I, 40; 0,25)	4,77 (1,20)	3,51 (0,88)	7,16 (1,80)	5,28 (1,33)	4,77 (1,20)	3,51 (0,88)	7,16 (1,80)	5,28 (1,33)	2,93 (0,60)	5,04 (0,44)	3,71 (1,00)
ВСЦ (I, 40; 0,75)	1,20 (4,77)	0,88 (3,51)	1,80 (7,16)	1,33 (5,28)	1,20 (4,77)	0,88 (3,51)	1,80 (7,16)	1,33 (5,28)	0,60 (3,98)	0,44 (2,93)	0,74 (3,71)
АБГЦ-МШ	2,39 (1,28; 0,25)	1,76 (0,60)	3,45 (0,44)	2,54 (1,00)	2,39 (0,60)	1,76 (0,44)	3,45 (1,00)	2,54 (0,74)	2,39 (0,60)	1,76 (0,44)	3,98 (0,44)
АБГЦ-МШ	4,77 (1,40; 0,25)	3,51 (1,20)	7,16 (0,88)	5,28 (1,33)	4,77 (1,20)	3,51 (0,88)	7,16 (1,20)	5,28 (1,33)	2,93 (0,60)	5,30 (0,44)	3,91 (1,00)
АБГЦ-МШ	1,20 (4,77)	0,88 (3,51)	1,80 (7,16)	1,33 (5,28)	1,20 (4,77)	0,88 (3,51)	1,80 (7,16)	1,33 (5,28)	0,60 (3,98)	0,44 (2,93)	0,74 (3,71)
КСИР (I, 40; 0,25)	4,77 (1,20)	3,51 (0,88)	7,16 (1,80)	5,28 (1,33)	4,77 (1,20)	3,51 (0,88)	7,16 (1,80)	5,28 (1,33)	2,93 (0,60)	5,30 (0,44)	3,91 (1,00)
КСИР (I, 40; 0,75)	1,20 (4,77)	0,88 (3,51)	1,80 (7,16)	1,33 (5,28)	1,20 (4,77)	0,88 (3,51)	1,80 (7,16)	1,33 (5,28)	0,59 (4,24)	1,00 (4,10)	0,74 (5,57)
АБГЦ (II, 40; 0,25)	4,77 (1,20)	3,51 (0,88)	7,16 (1,80)	5,28 (1,33)	4,77 (1,20)	3,51 (0,88)	7,16 (1,80)	5,28 (1,33)	4,77 (1,20)	5,28 (1,80)	4,77 (1,20)

*Примечание.* Вне скобок приведен грузооборот неконтейнерных поездов, в скобках – контейнерных поездов; 0,6; 0,3; 1,3; 0,7 – состояние природы, при котором ограничениями скорости до 40 км/ч охвачено 0,6 длины полигона, доля попавших на полигон с опозданием грузовых поездов составляет 0,3, коэффициент суточной неравномерности – 1,3, реализованная масса грузового поезда – 0,7 от нормы АБГЦ (1,28; 0,25) – стратегия игрока, предполагающая АБГЦ, один сплошной главный путь, 28 пар грузовых поездов, из которых 0,25 составляют контейнерные поезда; жирным шрифтом выделены сочетания, при которых не все поезда преодолели полигон в течение модельных суток (грузооборот таких поездов не учтен).

Уплотнение поездопотоков на однопутном полигоне требует развития системы тягового энергоснабжения, поскольку существующая инфраструктура не может обеспечить поддержание необходимого межпоездного интервала. На рассматриваемом полигоне устранение данной проблемы возможно при замене медно-стального несущего троса контактной подвески на медный марки М120 для увеличения сечения подвески (на 39 %) на участке постоянного тока, а на участке переменного тока может потребоваться обустройство дополнительных постов секционирования или строительство новой тяговой подстанции (при этом достаточность данных мероприятий должна проверяться в соответствии с методикой, основанной на оценке расхода энергии, потерь в тяговой сети, ограничивающего коэффициента нагрузки, температур в контактной сети [18, с. 178]). При двухпутной конфигурации для рассмотренных размеров движения развитие энергетической инфраструктуры полигона не требуется.

Среди рассмотренных дестабилизирующих факторов наиболее негативным влиянием обладают участки с ограничениями скорости. При двухпутной конфигурации полигона данный фактор резко снижает маршрутную скорость, а при однопутной, помимо замедления

поездопотока, является причиной нехватки пропускной способности, ведущей к увеличению потребности в приемо-отправочных путях для размещения «избыточных» поездов. Наибольший прирост между сценариями обеспечивают переходы от АБТЦ к ВСЦ и от АБТЦ-МШ к КСИР, требующей проведения испытаний с целью гарантирования ее безопасной эксплуатации.

Таким образом, до определенных размеров движения применение СИРДП на однопутных полигонах может быть полноценной альтернативой возведению вторых главных путей (рис. 5). Следует отметить необходимость развития инфраструктуры и повышения технологической дисциплины для наиболее полной реализации потенциала данной инновации. В работе рассмотрено влияние дестабилизирующих факторов (как каждого в отдельности, так и их совокупности). Достоинство предлагаемой методики заключается в существенном сокращении неопределенности касательно оценки эффективности СИРДП, при этом формирование матриц является трудоемким процессом, в связи с чем требуется выделение приоритетных сочетаний, на основе которых будут формироваться границы значений рассматриваемых параметров однопутного полигона.

		Низкая интенсивность дестабилизирующих факторов		Высокая интенсивность дестабилизирующих факторов	
		Эффективность в качестве «уплотнителя» поездопотока	Эффективность в качестве «ускорителя» поездопотока	Влияние на пропускную способность в качестве «буфера»	Влияние на скорость потока поездов в качестве «буфера»
Низкие размеры движения	СИРДП, один путь	Минимальная эффективность	Минимальная эффективность	Наибольшая минимизация потерь	Частичная минимизация потерь
	Два пути	Минимальная эффективность	Минимальная эффективность	Наибольшая минимизация потерь	Наибольшая минимизация потерь
Высокие размеры движения	СИРДП, один путь	До избыточных размеров движения – значительная	Относительно значительная эффективность	Значительная минимизация потерь	Частичная минимизация потерь
	Два пути	Максимальная эффективность	Максимальная эффективность	Наибольшая минимизация потерь	Наибольшая минимизация потерь

Рис. 5. Матрица сравнительной эффективности однопутной конфигурации при действии перспективных СИРДП и двухпутной конфигурации

## **Выводы**

Результаты исследования позволяют сформулировать выводы:

1. Использование СИРДП на однопутных полигонах в качестве мероприятия по отдалению потребности возведения вторых главных путей обладает потенциалом для значительного повышения качества эксплуатационной работы железнодорожной сети, при этом проблема исследования влияния дестабилизирующих факторов на перевозочный процесс при различных вариантах оснащения однопутного полигона требует детального исследования.

2. Неотъемлемым элементом оценки эффективности СИРДП при различных отклонениях в продвижении поездопотоков является имитационное моделирование. Предлагаемый метод многоподходного моделирования позволяет достичь синергии процессного моделирования, агентной парадигмы и системной динамики. Группировка результатов прогонов модели в матрицы показателей и конфигурации обеспечивает наглядность сравнения различных сочетаний стратегии игрока (ОАО

«РЖД») и состояний природы (перевозочного процесса).

3. При двухпутной конфигурации полигона дестабилизирующие факторы (в особенности ограничение скорости) снижают маршрутную скорость, а при однопутной, помимо замедления поездопотока, обуславливают дефицит пропускной способности, ведущий к увеличению объема дополнительной инфраструктуры. Значительное улучшение показателей и снижение потребностей в инфраструктуре обеспечивают переходы от АБТЦ к ВСЦ и от АБТЦ-МШ к КСИР.

4. СИРДП на однопутном полигоне могут стать одним из действенных инструментов интенсификации перевозочного процесса, позволяющим сократить (но не исключить) экспансивное увеличение инфраструктуры полигона. При этом следует отметить отсутствие универсальной для однопутных полигонов СИРДП, проведенное исследование представляет наглядное сравнение каждого из них, его инструментарий может быть задействован для других полигонов.

## **Список источников**

1. Бушуев С. В., Ковалев И. А. Восстановление движения после отказов с применением виртуальной сцепки поездов // Автоматика на транспорте. 2024. Т. 10, № 1. С. 64–73. DOI 10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73.
2. Сравнительная оценка параметров движения поездов для различных вариантов виртуальной сцепки / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, В. И. Кузнецов, С. С. Тихонов // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 4 (107). С. 30–39. DOI <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-4>.
3. Чепцов М. Н., Сорокин В. Е. Расчет максимального времени отсутствия радиосвязи в системах интервального регулирования движения поездов на базе цифрового радиоканала // Известия Транссиба. 2020. № 4 (44). С. 127–134.
4. Бессоненко С. А., Климова Е. В., Осипов Н. И. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов // Транспорт Урала. 2023. № 3 (78). С. 35–45. DOI 10.20291/1815-9400-2023-3-35-45.
5. Бессоненко С. А., Осипов Н. И., Медведев В. И. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов как альтернативы сооружению вторых главных путей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 21–29. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_67\_21.
6. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Evans L. E. Improving Railway Operational Efficiency with Moving Blocks, Train Fleeting, and Alternative Single-Track Configurations // Transportation Research : Journal of the Transportation Research Board. 2020. Vol. 2674, Iss. 2. P. 146–157. DOI 10.1177/0361198120905842.
7. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Evans L. E. Potential for Moving Blocks and Train Fleets to Enable Faster Train Meets on Single-Track Rail Corridors // Journal of Transport Engineering, Part A: Systems. 2020. Vol. 146, Iss. 8. P. 1–13. DOI 10.1061/JTEPBS.0000403.
8. Батурина А. П., Осипов А. П. Современные системы интервального регулирования движения поездов железных дорог мира // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 2 (105). С. 18–26. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-2>.
9. Черняк А. Р., Карасев С. В. Разработка структуры модели специализированной грузовой железнодорожной линии с группировкой функциональных задач // Транспорт: наука, техника, управление : научный информационный сборник. 2024. № 2. С. 24–34. DOI 10.36535/0236-1914-2024-02-4.

10. Черняк А. Р., Каравеев С. В. Особенности путевого развития специализированных железнодорожных линий для обеспечения бесшовных технологий перевозки тяжеловесных грузов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 15–27. DOI 10.52170/1815-9265\_2022\_63\_15.
11. Методика увеличения пропускной способности линии при росте объема перевозок / Г. М. Грошев, А. В. Сугоровский, А. А. Грачев [и др.] // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 5 (84). С. 26–29.
12. Корниенко Н. В., Мехедов М. И. Выбор системы интервального регулирования движения поездов в условиях возрастающих потребностей освоения прогнозируемых объемов перевозок // Вестник ВНИИЖТ. 2022. Т. 81, № 1. С. 63–70. DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70.
13. Левин Д. Ю. Расчет и оценка эффективности использования перевозочных возможностей железных дорог // Наука и технологии железных дорог. 2023. Т. 7, № 3 (27). С. 8–17.
14. Правдина Е. Н. Комплексное увеличение пропускной способности однопутной линии во взаимодействии с работой станций : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Правдина Елена Николаевна. Москва, 1984. 223 с.
15. Сотников Е. А., Шенфельд К. П. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на потребную пропускную способность участков // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 5. С. 3–9.
16. Бадажков М. А. Повышение эффективности использования графика движения грузовых поездов : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бадажков Михаил Александрович. Новосибирск, 2022. 182 с.
17. Белоголов Ю. И., Гозбенко В. Е. Моделирование поездопотоков на участке Усть-Илимск – Хребтовая с целью увеличения пропускной способности // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 28–35. DOI 10.52170/1815-9265\_2022\_63\_28.
18. Оценка совместимости системы тягового электроснабжения при внедрении интервального регулирования движения поездов по технологии «виртуальная сцепка» / Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич, Ю. И. Белоголов, В. В. Кашковский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 3 (67). С. 173–180. DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).173-180.

## References

1. Bushuev S. V., Kovalev I. A. Restoration of traffic after failures using a virtual train coupling. *Transport Automation Research*. 2024;10(1):64–73. (In Russ.). DOI 10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73.
2. Rozenberg E. N., Ozerov A. V., Kusnetsov V. I., Tikhonov S. S. Comparison of Train Traffic Parameters for Various Virtual Coupling Use Cases. *World of Transport and Transportation*. 2023;21(4):176–185. (In Russ.). DOI <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-4>.
3. Cheptsov M. N., Sorokin V. E. Calculation of the maximum admissible time of radio communication absence in the systems of interval regulation of train traffic on the basis of a digital radio channel. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2020;4(44):127–134. (In Russ.).
4. Bessonenko S. A., Klimova E. V., Osipov N. I. Evaluating the efficiency of interval train control. *Transport of the Urals*. 2023;(78):35–45. (In Russ.). DOI 10.20291/1815-9400-2023-3-35-45.
5. Bessonenko S. A., Osipov N. I., Medvedev V. I. Evaluating the effectiveness of interval train control as an alternative to the constructing second main tracks. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(67):21–29. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_67\_21.
6. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Evans L. E. Improving Railway Operational Efficiency with Moving Blocks, Train Fleeting, and Alternative Single-Track Configurations. *Transportation Research: Journal of the Transportation Research Board*. 2020;2674(2):146–157. DOI 10.1177/0361198120905842.
7. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Evans L. E. Potential for Moving Blocks and Train Fleets to Enable Faster Train Meets on Single-Track Rail Corridors. *Journal of Transport Engineering. Part A: Systems*. 2020;146(8):1–13. DOI 10.1061/JTEPBS.0000403.
8. Baturin A. P., Osipov A. P. Modern Systems of Train Traffic Interval Control on World Railways. *World of Transport and Transportation*. 2023;21(2):164–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-2>.
9. Chernyak A. R., Karasev S. V. Development the model structure of a specialized freight railway line with grouping of functional tasks. *Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection*. 2024;(2):24–34. (In Russ.). DOI 10.36535/0236-1914-2024-02-4.
10. Chernyak A. R., Karasev S. V. Features of specialized railway lines track development to ensure seamless technologies for the heavy cargo transportation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):15–27. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2022\_63\_15.

11. Groshev G. M., Sugorovsky A. V., Grachev A. A. [et al.]. A method for increasing line throughput capacity in the instance of traffic volume increase. *Transport of the Russian Federation*. 2019; (84):26–29. (In Russ.).
12. Kornienko N. V., Mekhedov M. I. Choice of the interval traffic control system in terms of increasing demands for the coverage of forecast traffic volumes. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):63–70. (In Russ.). DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70.
13. Levin D. Yu. Calculation and evaluation of the effectiveness of the use of transportation capabilities of railways. *Science and Technology of Railways*. 2023;7(3): 8–17. (In Russ.).
14. Pravdina E. N. Integrated increase of single-track line capacity in interaction with station operations. Speciality 05.22.08 Transportation process management. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Pravdina Elena Nikolaevna. Moscow; 1984. 223 p. (In Russ.).
15. Sotnikov E. A., Shenfeld K. P. Irregularity of freight transportation under contemporary conditions and its influence on required traffic capacity of line sections. *Russian Railway Science Journal*. 2011;(5):3–9. (In Russ.).
16. Badazhkov M. A. Improving the efficiency of freight train schedule utilisation. Speciality 05.22.08 Transportation process management. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Badazhkov Mikhail Alexandrovich. Novosibirsk; 2022. 182 p. (In Russ.).
17. Belogolov Yu. I., Gozbenko V. E. Simulation of train flows on the section Ust-Ilimsk – Khrebtovaya to increase throughput. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):28–35. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2022\_63\_28.
18. Astashkov N. P., Olentsevich V. A., Belogolov Yu. I., Kashkowsky V. V. Evaluation of the compatibility of the traction power supply system during implementation of train traffic separation using the «virtual coupling» technology. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2020;(67):173–180. DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).173-180.

### **Информация об авторе**

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

### **Information about the author**

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

Статья поступила в редакцию 12.08.2023; одобрена после рецензирования 22.08.2024; принята к публикации 27.08.2024.

The article was submitted 12.08.2023; approved after reviewing 22.08.2024; accepted for publication 27.08.2024.

## ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.225.073.436.08:614.84

doi 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_40

### Обоснование новой методики прогноза экологических последствий техногенных чрезвычайных ситуаций (пожаров и взрывов) с опасными грузами на железнодорожном транспорте

Владимир Ильич Медведев<sup>1</sup>✉, Сергей Анатольевич Бессоненко<sup>2</sup>,  
Марк Евгеньевич Корягин<sup>3</sup>, Михаил Дмитриевич Сурков<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> ПК Дельта, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> MedvedevVI2017@yandex.ru✉

<sup>2</sup> bessonenko@stu.ru

<sup>3</sup> markkoryagin@yandex.ru

<sup>4</sup> surkovnd@yandex.ru

**Аннотация.** Для экономики Российской Федерации перевозка (транспортировка) опасных грузов в международном и внутреннем сообщении играет чрезвычайно важную роль. В десятки стран мира поставляются природный газ (опасный груз класса 2), аммиачно-нитратные удобрения (опасные грузы класса 5), тепловыделяющие элементы (опасные грузы класса 7) и многие другие грузы. В этот процесс вовлечены все виды транспорта: трубопроводный, железнодорожный, автомобильный, речной и морской, авиационный. Инциденты, аварии и катастрофы с опасными грузами, имеющие тяжелые последствия, продолжают происходить на всех видах транспорта практически во всех регионах мира.

Анализ ряда актуальных аварий и чрезвычайных ситуаций, в результате которых был нанесен не только критический или существенный ущерб важным объектам транспортной инфраструктуры, но и экологический ущерб населению прилегающих территорий, привел нас к выводу о недостаточности существующей системы защиты и необходимости разработки новых значимых ее элементов.

Учет новых обстоятельств системы защиты при чрезвычайных ситуациях с опасными грузами заключается, по нашему мнению, прежде всего в прогнозе и управлении режимами горения и взрыва высокопасных веществ с целью снижения экологических и иных негативных последствий. Опасные грузы классов 1, 2 и 3, как правило, обладают высокопасными свойствами. Выявлены методологические изъяны в оценке воздействия последствий взрыва и пожаров опасных грузов, а также минимизации их последствий. На характерных примерах предпринята попытка моделирования горения и взрыва опасного груза винилхлорида, расчет количества образующихся токсичных продуктов и формируемый ими опасных концентраций в воздушной среде аварийной зоны. Рассмотрены возможные режимы (горение, взрыв) и предложен оценочный параметр – расчетный относительный индекс токсичности при различных режимах деструкции, а также условиях горения и рассеивания продуктов.

Обоснована целесообразность создания «Методики прогноза экологических последствий техногенных чрезвычайных ситуаций (пожаров и взрывов) с опасными грузами», назначением которой является разработка дополнительных мер защиты при чрезвычайных ситуациях, в том числе защиты жителей селитебных территорий, на основе модели образования в химической реакции токсичных продуктов и их распространения в воздушной среде.

**Ключевые слова:** аварийные ситуации, безопасность перевозки, железнодорожный транспорт, методика прогноза, опасные грузы, чрезвычайные ситуации, экологические последствия

**Для цитирования:** Обоснование новой методики прогноза экологических последствий техногенных чрезвычайных ситуаций (пожаров и взрывов) с опасными грузами на железнодорожном транспорте / В. И. Медведев, С. А. Бессоненко, М. Е. Корягин, М. Д. Сурков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 40–48. DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_40.

# TRANSPORT

Original article

## Substantiation of a new methodology for forecasting the environmental consequences of man-made emergencies (fires and explosions) with dangerous goods in railway transport

Vladimir I. Medvedev<sup>1✉</sup>, Sergey A. Bessonenco<sup>2</sup>, Mark E. Koryagin<sup>3</sup>, Mikhail D. Surkov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup> PC Delta, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> MedvedevVI2017@yandex.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup> bessonenco@stu.ru

<sup>3</sup> markkoryagin@yandex.ru

<sup>4</sup> surkovmd@yandex.ru

**Abstract.** For the economy of the Russian Federation, the transportation of dangerous goods in international and domestic traffic plays an extremely important role. Natural gas (dangerous goods of class 2), ammonium nitrate fertilizers (dangerous goods of class 5), fuel elements (dangerous goods of class 7) and many other cargoes are supplied to dozens of countries around the world. All types of transport are involved in this process: pipeline, railway, automobile, river and sea, aviation. Incidents, accidents and catastrophes involving dangerous goods with severe consequences continue to occur on all modes of transport in almost all regions of the world.

An analysis of a number of current accidents and emergencies, as a result of which not only critical or significant damage was caused to important transport infrastructure facilities, but also environmental damage to the population of adjacent territories, led us to the conclusion that the existing protection system is insufficient and it is necessary to develop new significant elements of it.

Taking into account the new circumstances of the protection system in emergency situations with dangerous goods is, in our understanding, primarily in the prediction and management of fire and explosion modes of highly dangerous substances in order to reduce environmental and other negative consequences. Dangerous goods of Classes 1, 2 and 3, as a rule, have highly dangerous properties. Methodological flaws have been identified in assessing the impact of explosion and fire consequences of dangerous goods and minimizing their consequences. Based on characteristic examples, an attempt has been made to simulate the combustion and explosion of a dangerous cargo of vinyl chloride, calculate the amount of toxic products formed and the dangerous concentrations formed by them in the air of the emergency zone. Possible modes are considered and an estimated parameter is proposed – the calculated relative index of toxicity under various modes of destruction and conditions of combustion and dispersion of products.

The expediency of developing a methodology for predicting the environmental consequences of man-made emergencies (fires and explosions) with dangerous goods is justified, the purpose of which is to develop additional protection measures in emergency situations, including protection of residents of residential areas, based on a model of formation of toxic products in a chemical reaction and their spread in the air.

**Keywords:** emergencies, transportation safety, railway transport, forecasting methodology, dangerous goods, emergencies, environmental consequences

**For citation:** Medvedev V. I., Bessonenco S. A., Koryagin M. E., Surkov M. D. Substantiation of a new methodology for forecasting the environmental consequences of man-made emergencies (fires and explosions) with dangerous goods in railway transport. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):40–48. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_40.

### Введение

Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года [1] предполагает решение комплекса важных задач. Среди них – «развитие системы автоматизированного формирования маршрутов пропуска опасных... грузов»; снижение «угрозы совершения актов незаконного вмешательства в работу железнодорожного транспорта, приводящих к причинению вреда жизни и здоровью граждан, а также нанесению материального ущерба; угрозы экологической безопасности». На наш взгляд, такие

проблемы решаются медленно и результаты в современных условиях можно оценить как недостаточные.

Настоящая работа посвящена обоснованию новой методики прогноза экологических последствий техногенных чрезвычайных ситуаций (пожаров и взрывов) с опасными грузами на железнодорожном транспорте. Постановка такой задачи связана с результатами анализа состояния безопасности транспортировки опасных грузов в Российской Федерации и в мире на текущий период (2022–2023 гг.), а также выявлению новых обстоятельств, характерных для изучаемого периода. Кроме

того, принят во внимание 2013 г., частота и характер неблагоприятных событий в течение которого показались нам аномальными. Для изучения и предотвращения таких аварий, по-видимому, недостаточно общепризнанных подходов, основанных на международных рекомендациях и национальных правилах, в частности [2, 3]. Прежде всего, речь идет о совершенствовании системы защиты населения и работников транспорта от чрезвычайных и нестандартных ситуаций с опасными грузами, несущих угрозу безопасности и устойчивости железнодорожного транспорта.

### **Материалы и методы исследования**

В основе работы лежит методический аппарат, разработанный и используемый в цикле исследований научного коллектива по обеспечению безопасных условий перевозки опасных грузов. Он состоит из поэтапного решения взаимосвязанных задач, включая анализ номенклатуры опасных грузов, допущенных к перевозке Типовыми правилами ООН [4, 5], и ее изменений. Необходима актуализация списка грузов и грузооборота на сети железнодорожных дорог Российской Федерации; статистического материала по инцидентам, аварийным и чрезвычайным ситуациям на полигоне страны и выборочно на полигоне других стран. Важной составляющей выступает контент-анализ федеральных законов, нормативно-правовых и нормативно-технических актов, действующих в Российской Федерации, например стандартов [6, 7], и в международном железнодорожном грузовом сообщении [4, 5]. Теория проектирования условий перевозки и оценки риска основана на методах сравнительной типологии и круговых экспертиз оценок. Методический аппарат предусматривает оценку сравнительной эффективности элементов проекта. Методы анализа техногенных опасностей и рисков для объектов железнодорожного транспорта [8] удовлетворительно сочетаются с применяемыми нами методами.

### **Результаты исследования**

Задача учета техногенных, антропогенных и природных факторов, несущих угрозу безопасности и устойчивости железнодорожного транспорта, является одной из приоритетных [9]. Необходимость совершенствования си-

стемы защиты транспортной инфраструктуры, населения и работников транспорта от чрезвычайных и нестандартных ситуаций с опасными грузами обусловлена как концептуальной стратегией [1, 10], так и конкретными актуальными обстоятельствами [11, 12]. Выявлены новые обстоятельства при перевозке опасных грузов в Российской Федерации и в мире за 2022–2023 гг., нанесшие значительный ущерб транспортной инфраструктуре.

В последние годы разного рода аварии на железных дорогах США не считаются экстраординарными событиями. Начало 2023 г. ознаменовалось серией аварийных ситуаций с опасными грузами в разных штатах США. Составленная на основе данных [11] характеристика части таких событий представлена в табл. 1. По нашему заключению, такую частоту (интенсивность) можно признать аномальной [12]. Наибольший резонанс в мировых СМИ получило крушение, при котором несколько вагонов поезда Norfolk Southern сошли с рельсов на железнодорожном переезде с шоссе «Огайо 41» в округе Кларк, штат Огайо. Последствия для природной среды эксперты квалифицировали как «экологическую катастрофу» и даже сравнивали с последствиями ядерной аварии на энергетическом блоке атомной станции («Чернобыль в Огайо»). Продолжительное расследование обстоятельств привело экспертов к выводу о том, что последствия коснулись 16 штатов страны, практически трети от их числа. Представляется, что отечественные специалисты должны использовать фактологическую базу подобных чрезвычайных событий с целью анализа, прогноза и проектирования дополнительных защитных мер.

С этих позиций предпринята попытка обоснования целесообразности разработки дополнительных мер на основе предлагаемого методического подхода. Опасный груз с надлежащим транспортным наименованием «винилхлорид ингибирированный» допущен к перевозке в Российской Федерации под кодами ЕТСНГ и ГНГ 71209 и 290321 соответственно. Это один из важнейших полупродуктов крупнотоннажного органического синтеза, используется для производства поливинилхлорида (ПВХ). Характеристика вещества и продуктов его горения и взрыва представ-

лена в табл. 2, состав ингибитора не принят во внимание, поскольку его содержание не превышает 0,25 % по массе. Все продукты токсичны в разной степени (ПДК от  $10^{-6}$  до 3,0 мг/м<sup>3</sup>) и канцерогенны. Некоторые из них являются опасными грузами. Нами рассмотрены различные сценарии протекания аварии и выделены три режима химического превращения винилхлорида ингибирированного, в зависимости от соотношения реагента и кислорода воздуха:

- 1) горение при достатке кислорода;
- 2) горение при недостатке кислорода;

3) взрыв при небольшом содержании кислорода.

Характеристика продуктов деструкции винилхлорида на основе уравнений химических реакций горения и взрыва винилхлорида (ВХ) в трех вышеприведенных режимах представлена в табл. 3.

На основе данных табл. 2 и 3 нами рассчитаны показатели загрязнения атмосферного воздуха в зоне аварии ВХ в трех выбранных режимах (реакции горения и взрыва) и на их основе – индексы токсичности относительные: ИТО-1,

*Таблица 1*

**Характеристика серии аварийных ситуаций с опасными грузами в США за февраль – апрель 2023 г.**

Дата, место происшествия, перевозчик	Обстоятельства, наименование опасного груза и класс опасности (в случае идентификации)	Ущерб, пострадавшие, КОР*
03.02.2023, г. Ист-Палистайн (штат Огайо), железнодорожная компания Norfolk Southern Railway	Крушение поезда из 141 груженого и 9 порожних вагонов (длиной 2,8 км), взрыв и возгорание 7 вагонов-цистерн с винилхлоридом	Ущерб инфраструктуре и экологический, пострадавших нет, КОР = 4
28.02.2023, округ Манати, штат Флорида, железнодорожная компания Seminole Gulf Railroad	Крушение поезда, сход нескольких вагонов, в том числе цистерн (пропан)	
23.03.2023, штат Массачусетс, железнодорожная компания Norfolk Southern Railway	Крушение поезда	Ущерб инфраструктуре, пострадавших нет, КОР = 1
27.03.2023, г. Уиндмир, штат Северная Дакота	Крушение поезда, сход 30 вагонов	
30.03.2023, Рэймонд, штат Миннесота, железнодорожная компания BNSF	Крушение поезда из 40 вагонов, из них 14 с опасными грузами (этанол)	Ущерб инфраструктуре и экологический, пострадавших нет, КОР = 1
17.04.2023, г. Чико, штат Техас, железнодорожная перевозка	Крушение поезда с опасными грузами	Ущерб инфраструктуре, пострадавших нет, КОР = 1
21.04.2023, штат Коннектикут, автомобильная перевозка	Авария бензовоза	Ущерб – 1 чел. погиб и 1 чел. пострадал, КОР = 2

\* КОР – коэффициент общественного реагирования, оценивается по относительной частоте упоминания в научных публикациях и СМИ.

*Таблица 2*

**Характеристика опасного груза – винилхлорида ингибирированного, продуктов его горения и взрыва при аварии 04.02.2023 в штате Огайо**

Наименование (синонимы)	Химическая формула	Номер ООН	Номер аварийной карточки	Молекулярная масса, г/моль	ПДК <sub>с.с.</sub> , мг/м <sup>3</sup> (канцерогенен)
Винилхлорид ингибирированный (хлорэтилен)	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	1086	205	62,5	0,01 (+)
Фосген (дихлорангидрид угольной кислоты)	COCl <sub>2</sub>	1076	203	99,0	0,5 (-)
Водорода хлорид безводный (хлороводород)	HCl	1050	203	36,5	0,1 (-)
Углерода (II) оксид (угарный газ, углерода монооксид)	CO	–	–	28,0	3,0 (-)
Сажа (углерод ультрадисперсный)	C <sub>n</sub>	1361	405	12,0	0,05 (-)
Хлор	Cl <sub>2</sub>	1017	203	71,0	0,03 (-)
Бензопирен	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	–	–	252,0	10 <sup>-6</sup> (+)

ИТО-2 и ИТО-3. Полученные значения позволили сформулировать ряд теоретических положений и практических рекомендаций. Исходя из стехиометрического соотношения числа молей реагентов  $C_2H_3Cl : O_2 = 2,50; 1,50$  и  $0,50$ , рассчитаны мольные доли продуктов (статвеса мольного соотношения продуктов реакции) продуктов  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_8$  (см. табл. 3). Образующаяся масса каждого  $i$ -го в веществе в  $j$ -м режиме за время  $t$  определяется по соотношению

$$M_{ji}(t) = \frac{M_{BX-j}(t)\alpha_{ji}M_{mol-i}}{M_{mol BX}}, \quad (1)$$

где  $M_{BX-j}(t)$  – количество прореагировавшего BX в  $j$ -м режиме;  $\alpha_{ji}$  – мольная доля  $i$ -го в веществе в  $j$ -м режиме;  $M_{mol-i}$  – молекулярная масса  $i$ -го в веществе;  $M_{mol BX}$  – молекулярная масса BX.

Суммарная масса продуктов – загрязняющих веществ (ЗВ) – в каждый момент времени  $t$  равна убыли реагентов в соответствии со стехиометрическим соотношением

$$M_{BX-j}(t)(1 + 0,512b_j) = \sum_{i=1}^8 \alpha_{ji}M_{mol-i}. \quad (2)$$

Действующим фактором, однако, является фактическая концентрация каждого газообразного вещества  $C_{факт ji}$ , определяемая по соотношению

$$C_{факт ji}(t) = \frac{M_{ji}(t)}{V_{OZA-j}(t)}. \quad (3)$$

где  $V_{OZA-j}(t)$  – объем опасной атмосферной зоны, формирующейся в процессе горения и взрыва.

Условный индекс загрязнения  $P_j$  определим как фактор, связанный с кратностью пре-

вышения фактической концентрации продуктов над предельно допустимой:

$$\begin{aligned} P_j &= \sum_{i=1}^8 \frac{C_{факт ji}(t)}{C_{ПДК-i}} = \sum_{i=1}^8 \frac{M_{ji}(t)}{C_{ПДК-i} V_{OZA-j}(t)} = \\ &= \sum_{i=1}^8 \frac{M_{BX-j}(t)\alpha_{ji}M_{mol-i}}{C_{ПДК-i} V_{OZA-j}(t) M_{mol BX}} = \\ &= \frac{M_{BX-j}(t)}{M_{mol BX} V_{OZA-j}(t)} \sum_{i=1}^8 \frac{\alpha_{ji}M_{mol-i}}{C_{ПДК-i}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Полученная по соотношению (4) величина характеризует опасность загрязненной воздушной среды и полезна для дальнейшего анализа. Однако для разработки практических мероприятий, как нам представляется, релевантным является показатель ИТО – индекс токсичности относительный, определяемый как отношение условных индексов загрязнения:

$$\begin{aligned} ITO_j &= \frac{P_j}{P_i} = \frac{M_{BX-j}(t)M_{BX-i}(t)^{-1}}{V_{OZA-j}(t)V_{OZA-i}(t)^{-1}} \times \\ &\times \sum_{i=1}^8 \frac{\alpha_{ji}M_{mol-i}}{C_{ПДК-i}} \left[ \sum_{i=1}^8 \frac{\alpha_{ji}M_{mol-i}}{C_{ПДК-i}} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Расчетные индексы токсичности, относительные при различных режимах деструкции, условиях горения и рассеивания продуктов, представлены в табл. 4. В первом приближении принимаем эквивалентность условий так, что  $M_{BX-j}(t)$  одинаковы,  $V_{OZA-j}(t)$  одинаковы для всех режимов. Значения ИТО-1 соответствуют условиям, при которых вариации массы  $M_{BX-j}(t)$  и объема  $V_{OZA-j}(t)$  одинаковы во всех трех случаях. Значения ИТО-2, ИТО-3 и

**Характеристика продуктов деструкции винилхлорида на основе уравнений химических реакций горения и взрыва в трех выделенных режимах**

Режим химического превращения винилхлорида	Мольное соотношение кислорода $O_{2(r)}$ , моль/моль BX	$CO_{2(r)}$	$H_2O_{(r)}$	$COCl_{2(r)}$	$Cl_{2(r)}$	$C_{(a)}$	$HCl_{(r)}$	$CO_{(r)}$	Бензопирен
Мольная доля $\alpha_{ji}^*$	–	$\alpha_{j1}$	$\alpha_{j2}$	$\alpha_{j3}$	$\alpha_{j4}$	$\alpha_{j5}$	$\alpha_{j6}$	$\alpha_{j7}$	$\alpha_{j8}$
Горение при достатке кислорода, $j = 1$	2,50	1,5	1,5	0,5	0	0	0	0	0
Горение при недостатке кислорода, $j = 2$	1,50	0,5	1,0	0,5	0	0,5	1,0	0,5	сл**
Взрыв, $j = 3$	0,50	0	1,0	0	0	2,0	1,0	0	0

\*  $\alpha_{ji}$  – стехиометрический коэффициент продукта в химической реакции.

\*\* сл – количество бензопирена относительно других продуктов незначительное, следовое, в данных расчетах не учитывается.

ИТО-4 отвечают условиям, при которых скорость горения и увеличения объема увеличивается вдвое относительно базового варианта  $j = 1$ . Приведенные в табл. 4 данные показывают, что максимальное загрязнение воздушной среды возникает при взрыве винилхлорида. Снижение «недостатка» кислорода при горении снижает токсичность газовой среды.

Полагаем, что предложенный методический подход открывает путь к разработке режимов тушения взрыво- и пожароопасных грузов классов опасности: 2, 3, 9 и других – сжиженных углеводородных газов, легковоспламеняющихся жидкостей, горючих жидкостей соответственно. Управление режимами

горения позволит снизить негативное воздействие токсичных продуктов на объекты природной среды и здоровье населения прилегающих территорий, обеспечить экологическую безопасность региона.

Полученный результат может быть применен в тех сферах, в которых обращаются взрыво- и пожароопасные вещества. Аналогичные аварийные ситуации происходят на других видах транспорта и объектах экономики. В табл. 5 представлена выборка аварийных ситуаций с опасными грузами классов 2 и 3, произошедших в мае 2013 г. Полагаем, что табл. 1 и 5 могут свидетельствовать о наличии периодов «аномальной аварийности» и необ-

**Таблица 4**  
**Расчетные индексы токсичности относительные при различных режимах деструкции, горения и рассеивания продуктов**

Режим $j$	ИТО-1	ИТО-2	ИТО-3	ИТО-4
Горение, $j = 1$	1	1	1	1
Горение, $j = 2$	5,4	2,7	1,35	0,67
Взрыв, $j = 3$	8,5	8,5	4,25	2,12

**Таблица 5**  
**Аварийные ситуации с опасными грузами классов 2 и 3 на транспорте и объектах экономики в мае 2013 г.**

Дата, место происшествия, перевозчик / вид транспорта	Обстоятельства, наименование опасного груза и класс опасности (в случае идентификации)	Ущерб, пострадавшие, КОР*
04.05.2013, Бельгия, г. Шеллебелле, железнодорожный	Сход вагона-цистерны с последующим взрывом. Акрилонитрил, UN 1093, класс опасности 3(+6.1)**	Ущерб инфраструктуре, погибли 2 чел., пострадали 14 чел., эвакуированы 300 чел., КОР = 1
07.05.2013, Мексика, муниципия Экатепек, г. Мехико, автомобильный городской пассажирский	Сход 51 вагона-цистерны с последующим взрывом и пожаром. Пропан-бутан, UN 1978, класс опасности 2	Ущерб инфраструктуре, пострадали 52 чел., госпитализированы 17 чел., эвакуированы более 300 чел., КОР = 3
07.05.2013, Российская Федерация, г. Москва, автомобильный городской пассажирский	Взрыв газового баллона в автобусе. Метан, UN 1971, класс опасности 2	Ущерб инфраструктуре, пострадали 2 чел. (женщина и ребенок), КОР = 1
09.05.2013, Российская Федерация, Ростовская область, пос. Белая Калитва, ОАО «РЖД», железнодорожный	Оторвалась и перевернулась автоцистерна с газом, затем произошел взрыв. Пропан-бутан, UN 1978, класс опасности 2	Ущерб инфраструктуре, погибли 18 чел., пострадали 36 чел. Разрушено взрывной волной 20 жилых домов и 15 автомобилей, КОР = 2
10.05.2013, околоземное космическое пространство, международная космическая станция МКС	Утечка аммиака из системы терморегулирования, резервуар. Аммиак, UN 1005, класс опасности 2	Ущерба инфраструктуре и пострадавших нет, КОР = 0
17.05.2013, США, штат Техас, г. Вэст, резервуар на промышленном предприятии	Утечка аммиака из резервуара с последующим взрывом. Аммиак, UN 1005, класс опасности 2	Ущерб инфраструктуре, погибли 14 чел., пострадали более 200 чел., КОР = 2

\* КОР – коэффициент общественного реагирования, оценивается по относительной частоте упоминания в научных публикациях и СМИ.

\*\* Данный опасный груз «исторически» был отнесен к классу опасности 2, но, когда выяснилась необходимость перевозки его в стабилизированном состоянии, произошла переклассификация.

ходимости разработки вопроса оценки экологических последствий на основе данных о случившихся аварийных и чрезвычайных ситуациях с опасными грузами, а также совершенствовании системы защиты.

Полученные результаты расчетов по формулам (1)–(5) положены в основу начала разработки «Методики прогноза экологических последствий техногенных чрезвычайных ситуаций (пожаров и взрывов) с опасными грузами» (рабочее наименование, может измениться при согласовании, например, с Министерством транспорта Российской Федерации или ОАО «Российские железные дороги»). Назначением методики является разработка дополнительных мер защиты при ЧС, в том числе жителей селитебных территорий. Дополнительно отметим, что, помимо экологического ущерба, аварии на объектах инфраструктуры наносят существенный экономический ущерб. Ущерб инфраструктуре может составить миллиарды рублей при небольших затратах на предотвращение нештатных ситуаций, аналогичных тем, которые рассмотрены в данной работе.

По результатам расследования обстоятельств чрезвычайной ситуации, имевшей место 03.02.2023 в штате Огайо, США, нами предложен ряд практических мероприятий по дополнительной защите населения прилегающих территорий, таких как обеспечение потенциально опасных станций и перегонов аварийными датчиками температуры, давления и звука. Впервые подобное событие имело мощный резонанс, как в США, так и по всему миру. В связи с чем предложен новый показатель – коэффициент общественного реагирования КОР, который оценивается по относительной частоте упоминания в научных публикациях и СМИ, по шкале возрастающих величин от 0 до 5. При КОР, равном 3 и более, органы государственной и местной власти должны, по нашему мнению, организовать прием претензий жителей в части компенсации морального вреда и материального

ущерба. Целью данного предложения является научное обоснование совершенствования системы защиты от чрезвычайных ситуаций с опасными грузами и социально-политическое мотивирование собственников инфраструктуры к таким преобразованиям.

## Выводы

Обоснована необходимость учета актуальных обстоятельств при проектировании системы защиты от чрезвычайных ситуаций с опасными грузами. Показано, что разработка новой «Методики прогноза экологических последствий техногенных чрезвычайных ситуаций (пожаров и взрывов) с опасными грузами» (рабочий вариант наименования) открывает путь внедрению дополнительных мер защиты населения и природной среды прилегающих территорий за счет, в частности, транспортных компаний. Методика разрабатывается инициативно в интересах Министерства транспорта Российской Федерации и ОАО «Российские железные дороги» и предполагает согласование с ними концепции на следующем этапе разработки.

Методологической основой послужила чрезвычайная ситуация, имевшая место 03.02.2023 в штате Огайо (США), с возгоранием и взрывом опасного груза винилхlorida ингибиированного, ликвидация непосредственных последствий которой заняла не менее трех дней и была квалифицирована экспертами как «экологическая катастрофа». В связи с этим предложен комплекс дополнительных мер защиты, разработка которых является предметом наших дальнейших исследований. Предложен подход и разработаны показатели снижения концентрации загрязняющих веществ на примере винилхlorida, например расчетный индекс токсичности при различных режимах деструкции, горения и рассеивания продуктов, позволяющий прогнозировать уровень экологической безопасности территории и управлять им.

## **Список источников**

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года : (Белая книга) : утверждена Распоряжением ОАО «Российские железные дороги от 17.04.2018 № 769/р. Москва, 2018.
2. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году». Москва : МЧС России : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2021. 264 с.
3. Медведев В. И. Методы управления безопасностью перевозочного процесса опасных грузов и пути повышения экологической безопасности на железнодорожном транспорте : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Медведев Владимир Ильич. Новосибирск, 2001. 287 с.
4. Рекомендации по перевозке опасных грузов. Типовые правила. ST/SG/AC.10/1/Rev.21 (Vol. I) / Организация Объединенных Наций. Нью-Йорк ; Женева, 2019. 506 с.
5. Recommendations on the transport of dangerous goods. Manual of tests and criteria. Fifth revised edition. ST/SG/AC.10/11/Rev.5 / United Nations. New York ; Geneva, 2009. 450 p.
6. ГОСТ Р 57478–2017. Грузы опасные. Классификация : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 мая 2017 г. № 454-ст. Москва, 2018.
7. ГОСТ Р 57477–2017. Грузы опасные. Маркировка : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 мая 2017 г. № 455-ст. Москва, 2018.
8. Развитие методов анализа техногенных опасностей и рисков для объектов железнодорожного транспорта / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, А. М. Соколов, Е. Ю. Титов // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 6. С. 3–12.
9. О железнодорожном транспорте в Российской Федерации : Федеральный закон № 17-ФЗ : [принят Государственной думой 24 декабря 2002 г. : одобрен Советом Федерации 27 декабря 2002 г.] : (с изменениями на 13 июня 2003 г.). Москва, 2003.
10. Об утверждении Правил проведения досмотра, дополнительного досмотра, повторного досмотра в целях обеспечения транспортной безопасности : приказ Минтранса России от 23.07.2015 № 227 : (ред. от 07.09.2020) : (зарегистрировано в Минюсте России 24.03.2016 № 41529). Москва, 2020.
11. East Palestine, Ohio Train Derailment // EPA is committed to protecting the health and safety of the East Palestine, Ohio community. URL: <https://www.epa.gov/east-palestine-oh-train-derailment> (дата обращения: 25.05.2024).
12. White noise: How conspiracists exploited an information gap after a derailment in Ohio. URL: <https://www.logically.ai/articles/white-noise-how-conspiracists-exploited-an-information-gap-after-a-derailment-in-ohio> (дата обращения: 25.05.2024).

## **References**

1. Strategy of scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book). Approved by the Order of Russian Railways 17.04.2018 No. 769/p. Moscow; 2018. (In Russ.).
2. State report. On the state of protection of the population and territories of Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2020. Moscow: Ministry of Emergency Situations of Russia; 2021. 264 p. (In Russ.).
3. Medvedev V. I. Methods of managing the safety of the transportation process of dangerous goods and ways to improve environmental safety in railway transport. Speciality 05.22.08 ‘Transportation Processes Management’. Dissertation for the Degree of Doctor of Engineering. Novosibirsk; 2001. 287 p. (In Russ.).
4. Recommendations for the transportation of dangerous goods. Model Regulations. ST/SG/AC.10/1/Review 21 (Vol. I). United Nations, New York and Geneva; 2019. 506 p. (In Russ.).
5. Recommendations on the transport of dangerous goods. Manual of tests and criteria. Fifth revised edition. ST/SG/AC.10/11/Rev.5. United Nations: New York and Geneva; 2009. 450 p.
6. GOST Р 57478–2017. Dangerous goods. Classification. Approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology in 30.05.2017 No. 454-st. Moscow; 2018. URL: <http://www.docs.cntd.ru>. (In Russ.).
7. GOST Р 57477–2017. Dangerous goods. Labelling. Approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology in 30.05.2017. No. 455-st. Moscow; 2018. URL: <http://www.docs.cntd.ru>. (In Russ.).

8. Makhutov N. A., Gadenin M. M., Sokolov A. M., Titov E. Yu. Development of methods for analysing technogenic hazards and risks for railway transport facilities. *Russian Railway Science Journal*. 2014;(6):3–12. (In Russ.).

9. On Railway Transport in the Russian Federation. Federal Law No. 17-FZ: [adopted by the State Duma on 24.12.2002. Approved by the Federation Council on 27.12.2002] (as amended on 13 June 2003). Moscow; 2003. (In Russ.).

10. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 23.07.2015 № 227 (edition dated 07.09.2020). On Approval of the Rules for Inspection, Additional Inspection, Re-Inspection in Order to Ensure Transport Security (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 24.03.2016 No. 41529). (In Russ.).

11. East Palestine, Ohio Train Derailment. EPA is committed to protecting the health and safety of the East Palestine, Ohio community. URL: <https://www.epa.gov/east-palestine-oh-train-derailment>.

12. White noise: How conspiracists exploited an information gap after a derailment in Ohio URL: <https://www.logically.ai/articles/white-noise-how-conspiracists-exploited-an-information-gap-after-a-derailment-in-ohio>.

### **Информация об авторах**

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

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

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

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

### **Information about the authors**

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

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

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

*M. D. Surkov* – Design Engineer of OOO PC Delta.

Статья поступила в редакцию 09.07.2023; одобрена после рецензирования 11.07.2024; принята к публикации 09.09.2024.

The article was submitted 09.07.2023; approved after reviewing 11.07.2024; accepted for publication 09.09.2024.

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 49–61.  
The Siberian Transport University Bulletin. 2024. No. 3 (70). P. 49–61.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Обзорная статья

УДК 624.21.09-15.43

doi 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_49

### О взаимодействии речного льда с опорами мостов (обзор)

Александр Николаевич Донец<sup>1✉</sup>, Александр Денисович Ветошкин<sup>2</sup>,  
Лев Евгеньевич Казанов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> donetsan@me.com✉

<sup>2</sup> muskaru2013@yandex.ru

<sup>3</sup> 4563500@mail.ru

**Аннотация.** В рамках государственной программы по освоению Арктической зоны Российской Федерации планируется строительство новых мостов и различных гидротехнических сооружений. Для освоения данных территорий ежегодно сооружается большое количество ледовых переправ и зимников, поскольку большинство низовьев больших (судоходных) рек Сибирского и Дальневосточного регионов находятся в суровых климатических (северных) условиях. В связи с этим в статье выполнен обзор работ по оценке ледовых воздействий на опоры мостов и других искусственных сооружений.

Кроме того что пресноводный лед по своим физико-механическим свойствам и кристаллическому строению значительно отличается от морского, лед в верховье и низовье одной и той же реки также может различаться ввиду неопределенного количества притоков различного химического состава. По этой причине проблема взаимодействия ледяных полей и опор мостов, подходов к оценке прочности речного и «технического» льда весьма актуальна и обширна.

В статье рассмотрены различные механизмы разрушения пресноводного льда при его контакте с поверхностью опоры моста на реках, протекающих по территории Российской Федерации. Приведены схемы образования вертикальных и горизонтальных трещин в зоне контакта льда и опоры. Также отмечена необходимость учета масштабного эффекта, оказывающего значительное влияние на результаты оценки прочностных характеристик льда.

Рассмотрены как существующие инженерные методы расчета и моделирования работы льда по нормативной документации, так и уточненные методы, учитывающие анизотропию физических свойств льда, его упругопластическую работу и фазовые переходы при деформировании. Отмечены перспективные подходы к построению критериев прочности льда, показаны возможные пути дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** пресноводный лед, опоры мостов, ледовые переправы, прочность льда, масштабный эффект, уточненные методы расчета, критерии прочности льда, упругопластическая работа, кратковременное нагружение, мгновенное нагружение, фазовые переходы, ледяное поле, разрушение речного льда

**Для цитирования:** Донец А. Н., Ветошкин А. Д., Казанов Л. Е. О взаимодействии речного льда с опорами мостов (обзор) // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 49–61. DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_49.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Review article

### On the interaction of river ice with bridge supports (review)

Alexandr N. Donets<sup>1✉</sup>, Alexandr D. Vetoshkin<sup>2</sup>, Lev E. Kazanov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> donetsan@me.com✉

<sup>2</sup> muskaru2013@yandex.ru

<sup>3</sup> 4563500@mail.ru

**Abstract.** Due to the state program of the Arctic zone development of the Russian Federation, it is planned to build new bridges and various hydraulic engineering structures. For the development of these territories, a large number of ice crossings and winter (ice) roads are built annually, since most of the large (navigable) rivers lower courses of in the Siberian and Far Eastern regions are located in hard climatic (northern) conditions. In connection

with the above, the article provides an overview of the works of ice impacts estimation on bridge piers and other railway and motorway engineering structures (R&M ES).

Not only does freshwater ice differ significantly from sea ice in its physico-mechanical properties and crystal habit, but ice in the same river in the upper and lower reaches may also differ due to an indefinite number of influxes of different chemical composition. For this reason, the problem of ice fields interaction and bridge piers, approaches to the strength assessment of river and technical ice is very relevant and extensive.

The article discusses various mechanisms of freshwater ice destruction in contact with the surface of the piers on the rivers flowing through the territory of the Russian Federation. There are given diagrams of the vertical and horizontal cracks formation in the contact zone of ice and supports. It is also pointed out that it is necessary to consider the scale effect, that has a significantly alleets on the results of the strength characteristics assessing of ice.

Both existing engineering methods for calculating and modeling ice behavior according to reference documents and refined calculation methods are considered, taking into account the anisotropy of the physical ice properties, its elastic-plastic behavior and elastic-plastic behavior during deformation. Prospective approach to the derivation of ice strength criteria are noted, and possible ways of further research are shown.

**Keywords:** freshwater ice, bridge piers, ice crossings and winter (ice) roads, ice strength, scale effect, refined calculation methods, of ice strength criteria, elastic-plastic behavior, short period loading, instantaneous loading, phase transfers, ice field, destruction of river ice

**For citation:** Donets A. N., Vетошkin A. D., Kazanov L. E. On the interaction of river ice with bridge supports (review). *The Siberian Transport University Bulletin.* 2024;(70):49–61. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_49.

## Введение

Территория России обширна, немалая ее часть покрыта льдами в различном их проявлении – от массивных ледников на суше до рек, которые, как и континентальный шельф морей, большую часть времени в году покрыты льдом. На континентальном шельфе Российской Федерации находятся огромные запасы природных ископаемых. Увеличение их добычи прямо связано с развитием объектов транспортной инфраструктуры – железных и автомобильных дорог, а также различных искусственных сооружений. Часто единственным способом доставки грузов в зимний период в некоторые отдаленные регионы являются ледовые переправы. Как правило, движение по ним осуществляется при толщине льда не менее 10 см, не имеющей точного теоретического обоснования.

В связи с данным обстоятельством изучение свойств пресноводного льда как поликристаллического тела, не имеющего стабильных физико-механических характеристик, представляет собой большой интерес и способствует уточнению значения толщины для обеспечения безопасного проезда транспорта по нему в тех или иных условиях. Различие характеристик объясняется особенностями его строения и структурой – кристаллической решеткой с разнообразием хаотично расположенных зерен, что зависит от температуры (в том числе воздуха) и возраста льда.

В первой половине прошлого века бытоваля точка зрения, что лед обладает свойствами вяз-

коупругого тела, затем – поликристаллического тела, деформирующегося подобно металлам. Известно, что при температуре от  $-3$  до  $-40$  °C и кратковременном (мгновенном) нагружении лед ведет себя как упругое тело, которое подчиняется закону Гука.

Лед обладает анизотропией физических свойств, является пористым и прочным, пластичным материалом, а его деформирование сопровождается фазовыми переходами.

По последним данным, лед имеет более 10 структурных модификаций, которые, кроме обычного льда, образуются в условиях космического пространства.

В конце прошлого века в Германии была организована международная лаборатория Ice Research Laboratory, которая занимается в том числе экспериментальными исследованиями физико-механических свойств льда [1]. Следует отметить, что в соответствии с информацией из открытых источников в настоящее время аналогичные лаборатории в России отсутствуют.

Изучением свойств льда под нагрузкой занимался ряд отечественных ученых: В. П. Афанасьев, Е. М. Беловицкий, В. В. Богородский, В. М. Брагов, А. В. Герасимов, Р. В. Гольдштейн, А. Ф. Глазовский, И. Д. Дучков, В. М. Козин, К. Н. Коржавин, В. М. Круглов, Г. М. Нигметов, С. А. Новиков, В. А. Могилев, В. И. Селиверстов, Н. М. Осипенко, П. М. Постников, Ф. И. Птухин, В. М. Самочкин, В. Ф. Толкачев, А. А. Шибков, В. Г. Цуприк и др.

Среди зарубежных исследователей следует отметить: T. Sain, R. Duddu, H. Waisman, J. Wells,

I. Jordaan, A. Derradji-Aouat, K. S. Carney, D. J. Benson, P. DuBois, R. Lee, R. Freeman, J. A. Sherburn, M. F. Horstemeyer, R. G. Kraus, S. T. Stewart, A. Seifert, J. Perron, D. M. Masterson, A. W. Obst, R. Narasimhan, M. Matbou Riahi, D. Marceau, C. Laforte, M. Kermani, M. Farzaneh, R. Gagnon, Ada H. V. Repetto-Llamazares, K. V. Hoyland, E. Kim, M. L. Rudolph, M. Manga, J. Dong, Z. Li, P. Lu, Q. Jia, G. Wang, G. Li, M. Yasui, M. Arakawa, G. J. Appleby-Thomas, A. Combescure, Y. Chuzel-Marmot, J. Fabis, A. C. Palmer, J. P. Dempsey, H. Loewe, T. C. Theile, M. Schneebeli, P. J. Hazell, G. Dahini, H. Park, H. Kim, R. Ritch, Zhenhui Liu, T. Theile, R. Juntikka, M. Johnston, R. Browne, J. Amdahl, S. Loset, L. E. Asp, R. Frederking и др.

Как отмечалось ранее, освоение северных территорий требует развития и создания различных видов искусственных сооружений, для строительства которых предлагается использовать легкодоступные для данных районов композиционные материалы из льда [2]. Для этого используется способ послойного намораживания, в результате которого получается так называемый «технический» лед, который, в свою очередь, усиливается мелким и крупным заполнителем в виде песка, гравия, стекловолокна, шариков и стружки из полиэтилена (дисперсное армирование из композитных полимеров), а также древесноволокнистых материалов. Таким образом, применяя упомянутые виды «наполнителей и арматуры» можно получить некоторый «аналог» железобетона или фибробетона, что позволяет, по нашему мнению, использовать сходные подходы к его расчету. В подтверждение данных слов в работе [3] на основе анализа исследований различных авторов было показано, что характер разрушения льда аналогичен другим материалам (бетонам, скальным трещиноватым породам грунтов), а значит, к математическому моделированию его работы под нагрузкой и разрушению можно применять модели механики сплошных сред.

Большое количество отечественных исследований посвящено расчету ледовых нагрузок на вертикальные опоры. Российские нормативные документы носят рекомендательный характер, при этом нагрузку предлагается определять по выражениям на основе метода, который был предложен профессором НИИЖТа (ныне –

СГУПС) К. Н. Коржавиным [4]. Но в нем не учитываются неоднородности льда. В Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте [5] предложена методика определения прочности льда на сжатие с учетом масштабного эффекта, что является прогрессивным шагом к решению задач о ледовых нагрузках.

Заслуживающие нашего внимания данные о статическом и динамическом пределе прочности на сжатие лабораторных образцов льда приведены в работе [6]. Они свидетельствуют, что динамическая прочность льда в некоторых случаях вдвое больше, чем при статических испытаниях. Также здесь отмечается влияние масштабного эффекта (коэффициента) на прочность образцов: «Предел прочности на сжатие для крупногабаритных образцов также в два раза превышал предел прочности на сжатие малогабаритных образцов».

В [7] приведены результаты лабораторных исследований образцов льда кубической формы при объемном нагружении (вдоль трех ортогональных направлений). Выявлены критические деформации, при которых лед ведет себя как хрупкое тело. Установлено, что главные напряжения в предельном состоянии испытуемого образца в гидростатическом режиме нагружения всегда больше, чем в двухосном. Установлены различные механизмы разрушения данных образцов.

### **Влияние масштабного эффекта**

В работе П. М. Постникова [8] рассматривается вопрос о влиянии масштабного коэффициента на результаты оценки прочностных характеристик льда. Сделан вывод о том, что масштабный коэффициент при оценке прочности льда – это параметр, который учитывает изменение его физико-механических свойств при изменении размеров экспериментальных образцов или их отличии от реальных размеров льдин при ледоходе.

При оценке прочности льда обычно проводятся его испытания на небольших образцах, например на кубиках или цилиндрах определенного размера. Однако в реальных условиях при вскрытии рек происходит увеличение расхода водного потока и повышение уровней воды в реке, что приводит в движение ледяные массы, начинается подвижка льда.

Большие массы льда, нагромождаясь в сужениях русла или около опор мостов, образуют заторы. Заторы, иногда весьма большой длины (известны случаи – 150 км), оказывают весьма значительное воздействие на сооружение и его элементы.

Масштабный коэффициент определяется путем сравнения результатов испытаний образцов льда разного размера с последующим его вычислением.

Автор [8] приводит результаты исследования Ф. И. Птухина [9, 10], который, основываясь на проведенных им экспериментах, предложил расчетную зависимость для учета явления масштабного коэффициента у льда в виде

$$P_v(\sigma_{p,i}) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma_{p,i}}{\sigma_{p,0}}\right)^m}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{p,i}$  – предел прочности  $i$ -го образца при сжатии;  $\sigma_{p,0}$  – характеристическая прочность;  $m$  – параметр однородности материала.

С целью проверки статистической гипотезы масштабного эффекта Ф. И. Птухиным были проведены испытания образцов льда на одноосное сжатие, результаты которых приведены на рис. 1.

В заключение П. М. Постников [8] приходит к выводу о том, что метод учета масштабного фактора на базе статистических закономерностей, предложенный Ф. И. Птухиным [9, 10], наиболее полно и обоснованно раскрывает физическую природу масштабного эффекта у льда.

Масштабный коэффициент может быть разным для различных свойств льда, таких как прочность на сжатие, растяжение или изгиб. Он может быть определен экспериментально или рассчитан на основе теоретических моделей.

Использование масштабного коэффициента при оценке прочности льда позволяет более точно предсказывать его свойства и поведение в больших масштабах, что важно для проектирования и строительства сооружений на льду, а также для безопасности людей, находящихся на ледяных поверхностях.

### Роль формы опоры в плане

В целях ослабления динамического воздействия льда на сооружения устраивают наклонные ледорезы с заостренной режущей гранью, облегчающие разрушение льда. Наиболее целесообразно их использование на реках в условиях тяжелого ледохода.

В работе [8] отмечается, что форма сооружения в плане с заостренной передней гранью в виде треугольника значительно влияет на уменьшение нагрузки от движущегося ледяного поля при его прорезании опорой. При угле заострения от 120 до 45° она уменьшается практически вдвое против прямоугольной в плане опоры.

При плавном очертании ледореза, что характерно для реальных форм опор, в исследовании [8] приводятся зависимости для определения силы воздействия движущихся ледяных полей на сооружение:

– при прорезании

$$F_{b,p} = m_1 R_b b h_d; \quad (2)$$

– при остановке

$$F_{c,p} = 0,04 V h_d^2 \sqrt{m_2 A R_b}, \quad (3)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – коэффициенты формы;  $R_b$  – предел прочности льда на сжатие;  $b$  – ширина опоры;  $h_d$  – расчетная толщина льда;  $V$  – скорость движения ледяного поля;  $A$  – площадь ледяного поля.

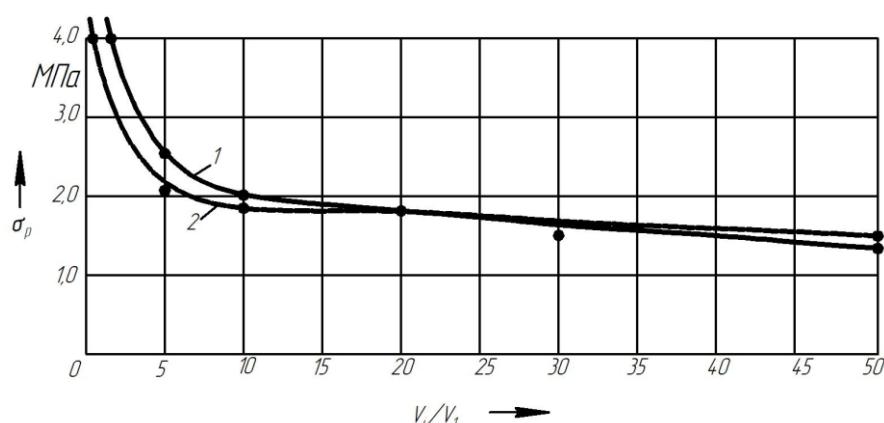


Рис. 1. Зависимость прочности льда от относительного объема при одноосном сжатии:  
1 – данные Ф. И. Птухина [9]; 2 – данные В. В. Лаврова [11]

Учитывая особенности весеннего ледохода крупных рек Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера, протекающего бурно и со значительной прочностью ледяного покрова, при определении динамического воздействия льда на сооружения для начальных стадий ледохода целесообразно принимать повышенный предел прочности льда на сжатие и для особо суровых условий считать его равным 0,75 МПа.

При воздействии ледяного поля на вертикальные опоры в качестве расчетной (наименьшей) в большинстве случаев принимается нагрузка, возникающая при его прорезании.

#### Схемы разрушения ледового покрова при взаимодействии с поверхностью опоры

В работе [12] приводится информация о законах разрушения ледового поля при его взаимодействии с опорами мостов. Одним из первых исследователей этого направления является К. Н. Коржавин [13], который отметил, что при ударе льдины в опору сначала появляются вертикальные радиальные трещины, а затем горизонтальные трещины. На рис. 2 показаны схемы разрушения ледового поля при его контакте с поверхностью опоры.

Отмечается, что при математическом описании механизма разрушения часто использовался аппарат теорий упругости и пластичности. При этом в качестве критерия разрушения применялись критерии для изотропных материалов. Кроме этого, наблюдалась схожесть механизмов образования вертикальных и горизонтальных трещин.

Отмечается, что горизонтальные трещины – результат влияния вертикальных растягивающих напряжений. К. Hirayama, I. Schwarz, H. C. Wu впервые выдвинули утверждение, что «горизонтальные трещины являются основой механизма разрушения кромки льда» [16]. На рис. 3 показан механизм образования горизонтальных трещин.

В заключение сделан вывод о недостаточности только одной расчетной характеристики – предела прочности льда на сжатие – для инженерной практики, поскольку массив льда может разделяться не только вертикальными, но и горизонтальными трещинами.

#### Инженерный метод расчета

В современных нормативных документах для расчетов нагрузок на опоры мостов используются нормативные сопротивления

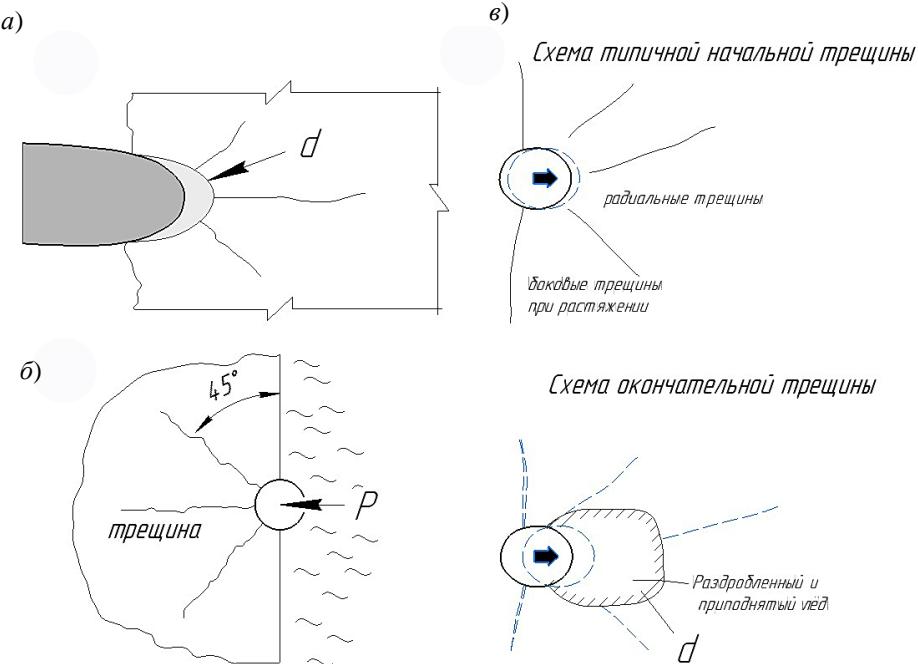
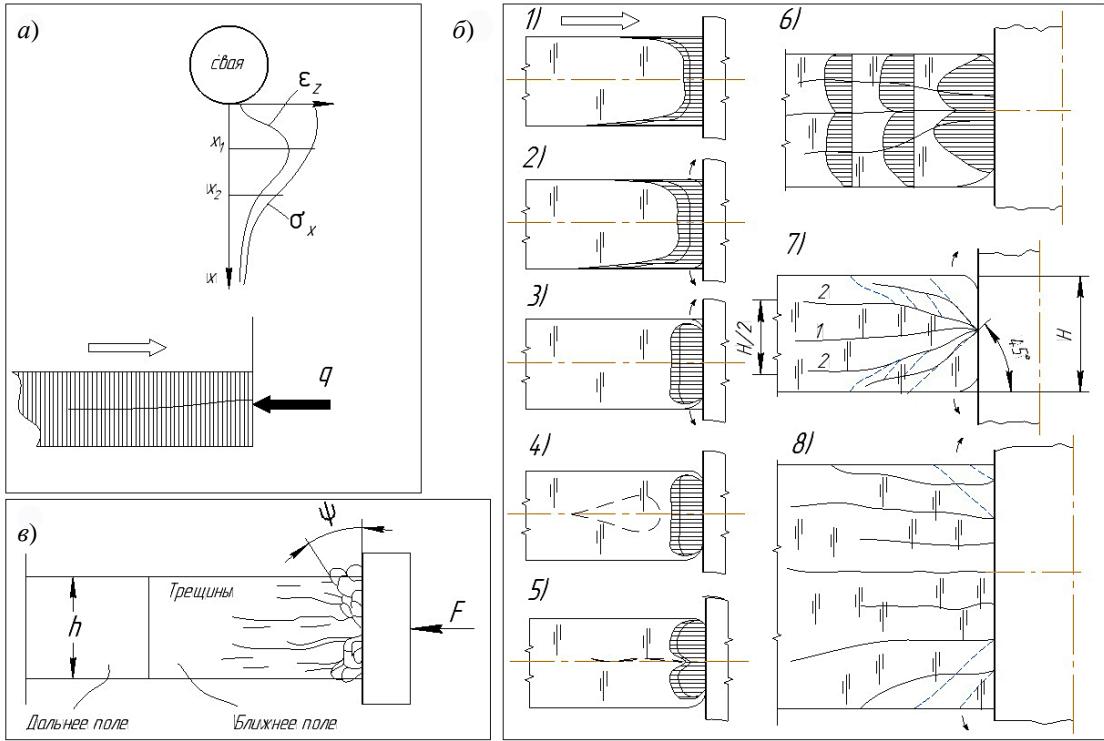


Рис. 2. Образование вертикальных радиальных трещин в ледовом поле в зоне контакта его кромки с поверхностью цилиндрической опоры сооружения:  
а – по К. Н. Коржавину [13]; б – по В. П. Афанасьеву и др. [14]; в – по К. R. Croasdale [15];  
 $d$  – зона спрессованных продуктов разрушения льда



*Rис. 3. Механизм образования горизонтальных трещин:*  
*а – схематичное изображение напряжений по «средней линии» для сжимающих напряжений  $\sigma_x$  в горизонтальной плоскости и растягивающих деформаций  $\varepsilon_z$  в вертикальной плоскости по К. Нугаяма, Н. Ву и др. [16]; б – теоретическое исследование В. Г. Цуприка [17]; в – типичное современное представление механизма разрушения льда у опоры по Кёрну и др. [18]*

(или пределы прочности) льда сжатию  $R_c$ , изгибу  $R_f$ , смятию  $R_{cm}$  и срезу  $R_{cp}$ .

По действующим нормативным документам рекомендуется прочностные характеристики льда определять «по опытным данным», хотя практически это выполнить нельзя из-за невозможности хранения и транспортировки образцов, маломобильности крупногабаритного оборудования для испытаний разрушающими методами, отсутствия приборов для получения прочностных характеристик неразрушающими методами и т. п.

В связи с отсутствием опытных данных «допускается принимать» приводимые в нормативных документах значения нормативных сопротивлений льда, полученные на основании массовых испытаний образцов при температуре льда в диапазоне от 0 до  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Методические указания по определению ледовых нагрузок на опоры мостов [19] составлены на основании разработанной методики, позволяющей более обоснованно определять ледовые нагрузки на опоры мостов за счет внесения ряда существенных корректив в требования действующих нормативных до-

кументов. Эти коррективы относятся как к определению ледовых нагрузок, так и к назначению расчетных прочностных характеристик льда. Методы определения данных по ледовой обстановке зависят от продолжительности периода наблюдений за изучаемым параметром и подразделяются на три группы, характеризуемые наличием, недостаточностью и отсутствием данных наблюдений.

Прочность льда на реках и водохранилищах к началу его движения (подвижек) и при ледоходе под влиянием поглощаемого льдом тепла солнечной радиации может оказаться существенно меньше прочности эталонных образцов, полученных при той же температуре в морозильных камерах. Это явление давно известно гидрохимикам и теоретически обосновано еще в 1970-х гг. С. Н. Булатовым [20]. На рис. 4 приведена зависимость прочности льда от температуры.

С учетом реальных условий поглощения льдом тепла солнечной радиации расчетную прочность льда перед его первой подвижкой следует определять по формуле

$$R_i = \varphi R_i^H, \quad (4)$$

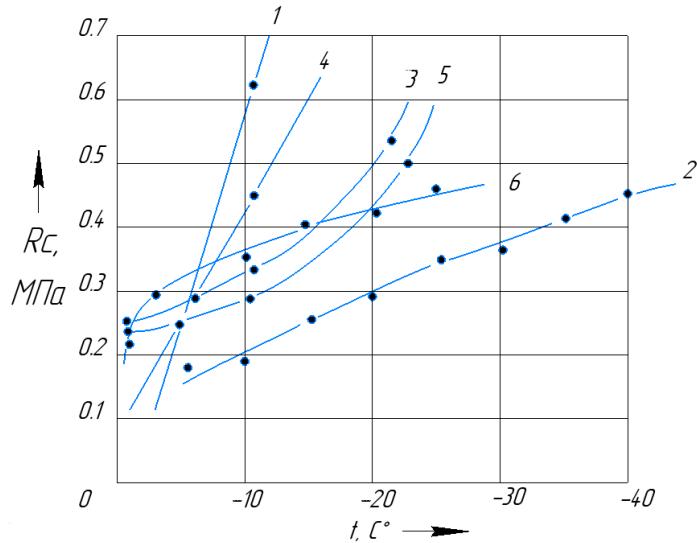


Рис. 4. Зависимость прочности льда от температуры:

1 – по К. Н. Коржавину [21]; 2 – по В. В. Витману и Н. П. Шандрикову [22]; 3 – по В. Н. Пинегину [23];  
4 – по В. И. Арнольд-Алябьеву [24]; 5 – по С. Н. Булатову [19]; 6 – по И. Г. Петрову [25]

где  $\phi$  – коэффициент снижения прочности льда под влиянием солнечной радиации у сооружений по сравнению с нормативным сопротивлением льда  $R_i^H$  при той же температуре.

Конечно, правильное определение величины давления на опоры является достаточно сложной функцией многих факторов, помимо температуры: размеров ледяных полей и скорости их движения, толщины и прочности ледяного покрова, эффекта местного смятия (упругого стеснения), скорости деформации, структуры льда, формы и материала опоры и т. д.

#### Уточненные методы расчета

Как ранее упоминалось, лед обладает анизотропией физических свойств, является пористым, пластичным и сравнительно прочным материалом, а его деформирование протекает совместно с фазовыми переходами. Кроме того, ледовый массив в виде пластины (ледового поля) находится в двухосном напряженном состоянии, а при контакте с препятствием в зонах контакта возникает и трехосное напряженное состояние. В этом случае прочность льда (как и других материалов в аналогичных напряженных состояниях) будет больше, чем при одноосном сжатии или растяжении, а значит, больше должна оцениваться и создаваемая льдом нагрузка.

Имеются отдельные исследования, в которых для оценки прочности льда применяются различные критерии прочности при неодноос-

ных напряженных состояниях. Следует выделить несколько заслуживающих внимания работ, выполненных разными авторами в этом направлении.

Модель поведения льда с использованием критерия прочности Мора – Кулона предложена и апробирована в работе [26]. В ней учитывается различное сопротивление материала на растяжение и сжатие, трещинообразование и ряд других особенностей работы льда. Отметим, что условие учитывает такое явление как контракция, что позволяет моделировать изотропное упрочнение материала при сдвиге (рис. 5). При этом отмечена недостаточность экспериментальных данных и в некоторых случаях схожий с бетоном механизм разрушения. Однако при этом не учитывается вид напряженного состояния.

На рис. 6 показано графическое представление условия прочности Мора – Кулона в плоском напряженном состоянии (ПНС).

В работе [27] рассматривается изотропная упругопластическая модель деформирования льда с учетом дилатации и трещинообразования, которая реализована при помощи метода конечных элементов.

В работе [28] на основе критерия Друккера – Прагера разработана определяющая модель поведения льда при высоких скоростях деформирования. Графическая интерпретация критериев Мора – Кулона и Друккера – Прагера в ПНС представлена на рис. 7.

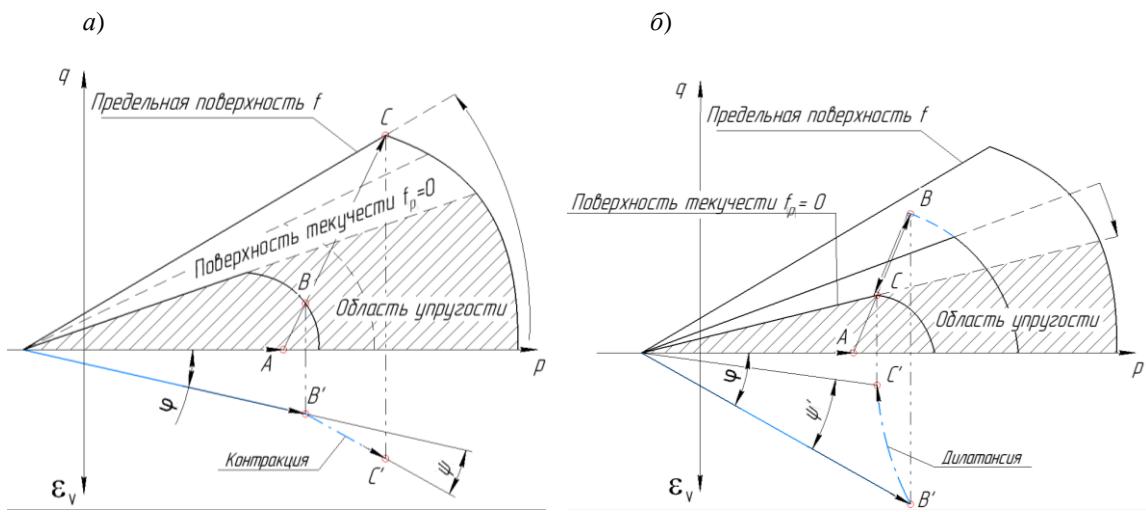


Рис. 5. Траектории нагружения в упрочняющихся моделях:  
а – явление контракции; б – явление дилатансии

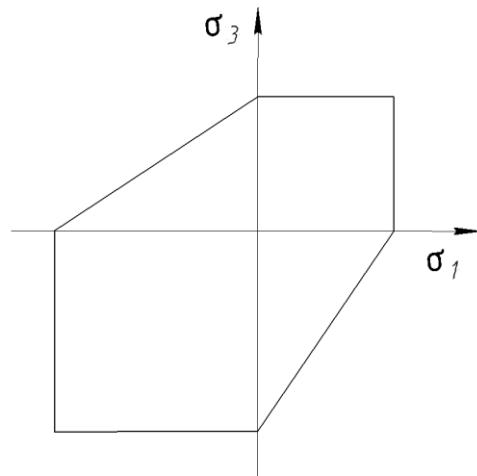


Рис. 6. Критерий Мора – Кулона в ПНС

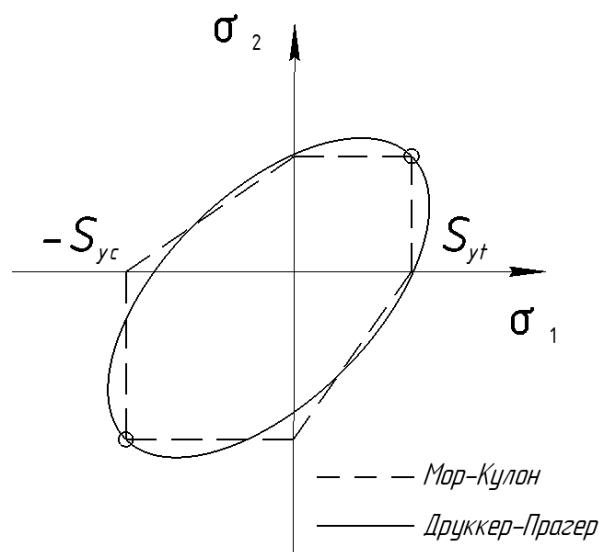


Рис. 7. Графическая интерпретация критериев прочности Мора – Кулона и Друккера – Прагера

Авторы отмечают необходимость проведения дополнительных экспериментов, так как энергия разрушения получилась меньшей, чем общая кинетическая энергия. При расчете разрушения льда использовались предположения из работы [29].

Таким образом из [26–29] следует, что для моделирования деформирования и оценки прочности льда используется весьма ограниченный и стандартный набор условий прочности. Подчеркнем, что эти условия построены с использованием двух инвариантов – тензора и девиатора напряжений. Более перспективны, на наш взгляд, критерии прочности, содержащие, помимо упомянутых выше двух, третий инвариант – угол вида напряженного состояния.

Вместе с тем необходимо отметить, что имеются отдельные исследования с использованием математической теории пластичности [30] и феноменологических подходов [31] к построению критериев прочности для описания взаимодействия ледяного поля и опор.

Учитывая свойства льда и характер ледовых режимов на реках: сезонность, замерзание, ледостав и вскрытие реки, относительно малую скорость движения льдин, а также вывод о схожести механизмов разрушения льда и бетона [26], по нашему мнению, заслуживают особого внимания работы [32, 33]. В них рассматриваются вопросы построения кrite-

риев прочности льда, зависимых от трех инвариантов напряжений  $I_1(T_\sigma)$ ,  $J_2(D_\sigma)$  и  $J(D_\sigma)$ . «Первый – инвариант тензора напряжений  $I_1(T_\sigma)$ , связан со средним напряжением  $\sigma_0 I_1(T_\sigma) = 3\sigma_0$ . Второй – инвариант девиатора напряжений  $J_2(D_\sigma)$ , связан с октаэдрическим касательным напряжением  $\tau_0$ . Третий – инвариант девиатора напряжений, характеризует угол вида напряженного состояния  $\psi_\sigma$  и связан с коэффициентом Лоде – Надаи по напряжениям  $\mu_\sigma$ » [32].

Таким образом, указанные инварианты позволяют достоверно определить напряженное состояние в любой точке при объемном напряженном состоянии. Графическое представление предельной поверхности прочности льда изображено на рис. 8 и 9.

Развивая мысль о схожести механизмов разрушения бетона и льда, можно предположить существование не только предельной поверхности, но и поверхности нагружения льда. Данное обстоятельство позволит использовать математический аппарат теории течения для построения модели деформирования с различными видами упрочнения льда при неодноосных напряженных состояниях, а использование теории упругости анизотропного тела и теории армированных материалов – получить основные физические нелинейные соотношения для «технического» льда.

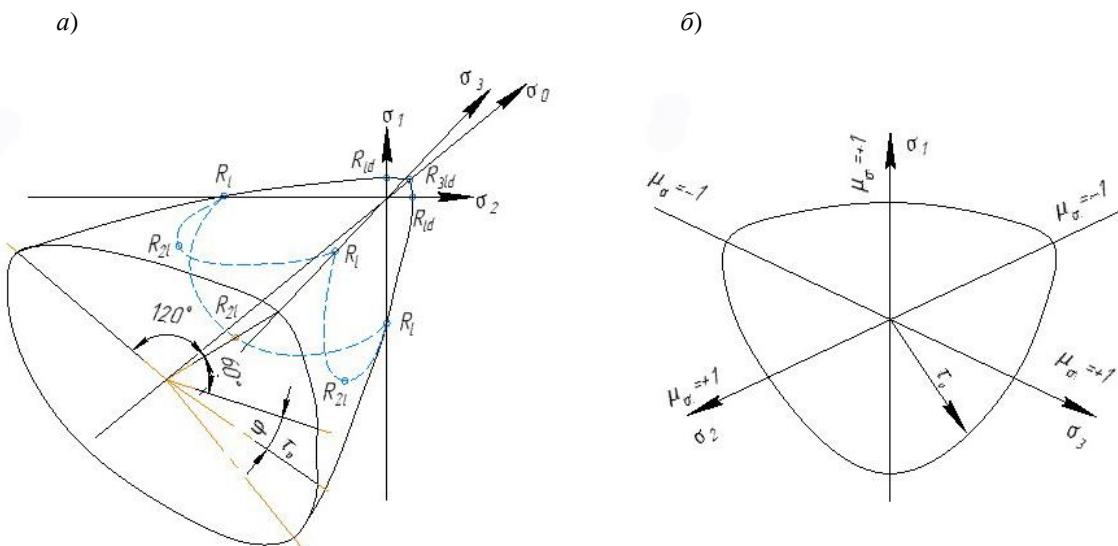


Рис. 8. Предельная поверхность прочности льда:  
а – общий вид поверхности; б – девиаторное сечение;  
 $\mu_\sigma$  – коэффициент Лоде – Надаи по напряжениям

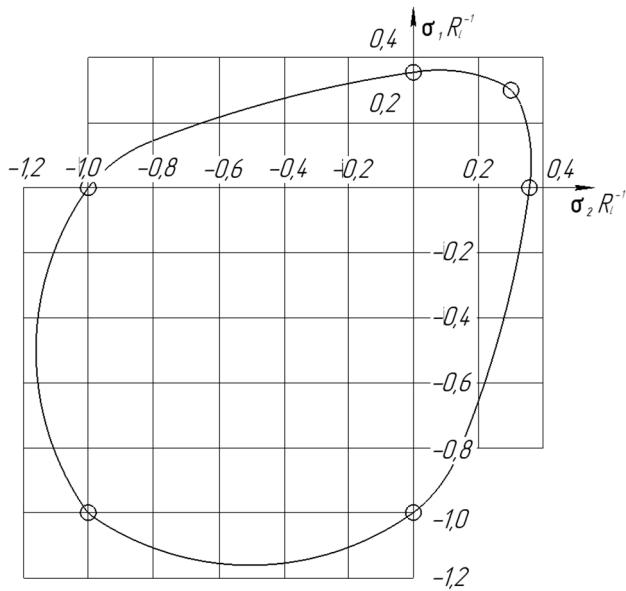


Рис. 9. Условие прочности льда в ПНС

### Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Взаимодействие речного льда с опорами мостов недостаточно изучено, и в первую очередь это касается малого количества экспериментальных исследований прочности льда при неодноосных нагрузлениях.

2. Инженерный подход к определению ледовых нагрузок на опоры мостов требует уточнения в части учета множества различных факторов, возникающих при реальном воздействии ледяного поля на опоры.

3. Разработка моделей деформирования льда (в том числе «технического») носит единичный характер.

4. Приведенный в статье обзор является обобщенным исследованием, которое поможет проектировщикам более полно оценить возможные расчетные схемы и, как следствие, правильно определить расчетные нагрузки на опоры сооружений.

5. В части развития существующих расчетных методов предлагается рассматривать механизм разрушения речного льда по аналогии с механизмом разрушения бетона, что позволит достоверно определить напряженное состояние в любой точке ледяного поля.

### Список источников

1. Ice Research laboratory // Tayer school engineering at Dartmouth : [сайт]. 2024. URL: [htths://icelab.engineering.dartmouth.edu](https://icelab.engineering.dartmouth.edu) (дата обращения: 18.03.2024).
2. Васильев Н. К., Иванов А. А., Шаталина И. Н. Методы упрочнения и армирования льда для конструкций гидротехнических сооружений из ледяных и льдогрунтовых композитов // Вестник НГУ. Серия математика, механика, информатика. 2013. Т. 13, № 3. С. 31–37.
3. Нелинейные модели механики сплошных сред в расчетах конструкций гражданских и транспортных объектов / В. М. Круглов, Л. Ю. Соловьев, К. В. Королев, А. Н. Донец ; Сибирский государственный университет путей сообщения. Новосибирск : Издательство СГУПС, 2024. 389 с.
4. Коржавин К. Н. Воздействие льда на инженерные сооружения. Новосибирск : Изд-во СО АН ССР, 1962. 203 с.
5. ААНИИ. Арктический и антарктический научно-исследовательский институт : [сайт]. URL: <https://www.aari.ru> (дата обращения: 18.03.2024).
6. Исследование влияния скорости деформирования при испытаниях пресноводного льда на прочность при раскалывании, сжатии и трещиностойкости / С. А. Новиков [и др.] // Сборник материалов III Научной конференции Волжского регионального центра РАФАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». Саров, 2004. Т. 2. С. 882–896.

7. Grats E. T., Schulson E. M. Preliminary observations of brittle compressive failure of columnar saline ice under triaxial loading // *Annals of Glaciology*. 1994. Vol. 19. P. 33–38.
8. Постников П. М. Взаимодействие ледяных полей с гидротехническими сооружениями и опорами мостов в низовьях рек Сибири и Севера : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Постников Павел Михайлович. Новосибирск, 1986. 195 с.
9. Птухин Ф. И. Статистический метод оценки масштабного эффекта у льда // *Известия СО АН СССР*. 1964. № 6, вып. 2. С. 70–79.
10. Птухин Ф. И., Бутягин И. П. О причинах и количественной оценке масштабного эффекта у льда // *Вопросы гидротехники*. Новосибирск, 1972. Вып. 47. С. 112–121.
11. Лавров В. В. Деформация и прочность льда. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1969. 206 с.
12. Цуприк В. Г. Законы разрушения кромки ледового покрова при его взаимодействии с поверхностью опоры // Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока. Москва : Горная книга, 2014. Вып. 6. С. 114–133.
13. Коржавин К. Н. Работы ледорезов мостовых опор в условиях ледохода сибирских рек // Труды НИИВТа. Томск, 1938. Вып. 3.
14. Афанасьев В. П., Долгополов Ю. В., Швайштейн З. И. Давление льда на морские отдельно стоящие опоры // Труды ААНИИ. 1971. № 300. С. 101–104.
15. Croasdale K. R., Morgenstern N. R., Nuttall J. B. Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers // *Journal of Glaciology*. 1977. Vol. 19, No. 81. P. 309–312.
16. Hyrayama K., Schwarz I., Wu H.C. Ice forces of vertical pile: indentation and penetration // Proc. IAHR Ice Symp. Hanover, New Hampshire, USA, 1975. P. 429–441.
17. Цуприк В. Г. Об учете влияния диаметра опор и толщины льда при определении ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения шельфа // Исследования морских гидротехнических сооружений для освоения шельфа. Ленинград : Издательство ЛПИ, 1980. С. 84–94.
18. Kärnä T., Järvinen E. Symmetric and asymmetric flaking processes // Proc. 15<sup>th</sup> Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Cond. (POAC-99). Helsinki, Finland, 1999. Vol. 3. P. 988–1000.
19. Методические указания по определению ледовых нагрузок на опоры мостов / АО ЦНИИС. Москва, 1993. 170 с.
20. Булатов С. Н. Прочность льда и ледяного покрова. Новосибирск : Наука, 1966. 154 с.
21. Коржавин К. Н. Исследование механических свойств речного льда // Труды НИИВТа. Новосибирск, 1940. Т. 4, вып. 2. 35 с.
22. Витман Ф. Ф., Шандриков Н. П. Некоторые исследования механической прочности льда // Труды Арктического института. Ленинград, 1938. Т. 110. С. 83–100.
23. Пинегин В. Н. Предварительное сообщение об исследовании прочности речного льда в связи с температурными изменениями // Вестник сибирских инженеров. Томск, 1924. Т. 4. С. 13–24.
24. Арнольд-Алябьев В. И. Исследование прочности льда Финского залива 1923, 1927 и 1928 гг. // *Известия ГГО*. Ленинград, 1929. № 2. С. 15–28.
25. Петров И. Г. Выбор наиболее вероятных значений механических характеристик льда // Труды ААНИИ. Ленинград, 1976. Т. 331. С. 4–41.
26. A phenomenological high strain rate model with failure for ice / K. S. Carney [et al.] // *International Journal of Solids and Structures*. 2006. No. 43. P. 7820–7839.
27. Sain T., Narasimhan R. Constitutive modeling of ice in the high strain rate regime // *International Journal of Solids and Structures*. 2011. No. 48. P. 817–827.
28. Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts / J. Pernas-Sanchez [et al.] // *International Journal of Solids and Structures*. 2012. No. 23. P. 32–45.
29. A phenomenological high strain rate model with failure for ice / K. S. Carney [et al.] // *International Journal of Solids and Structures*. 2006. No. 43. P. 7820–7839.
30. Хилл Р. Математическая теория пластичности. Москва, 1956. 467 с.
31. Филоненко-Бородич М. М. Механические теории прочности. Москва, 1961. 91 с.
32. Круглов В. М., Томилов А. А., Сачков И. В. Об оценке прочности льда в трехосном напряженном состоянии // Транспортное строительство. 2015. № 9. С. 13–17. URL: <https://rucont.ru/efd/487694> (дата обращения: 22.03.2024).
33. Круглов В. М., Смолянин А. Г. Критерий прочности льда в плоском напряженном состоянии // Гидротехническое строительство. 2017. № 10. С. 48–50. EDN ZQJLAN.

## References

1. Ice Research laboratory. *Tayer School Engineering at Dartmouth*. URL: [htths://icelab.engineering.dartmouth.edu](http://icelab.engineering.dartmouth.edu).
2. Vasiliev N. K., Ivanov A. A., Shatalina I. N. Methods of strengthening and reinforcing ice for structures of hydraulic structures made of ice and ice-ground composites. *Vestnik Novosibirsk State University. Series: Mathematics, Mechanics, Informatics*. 2013;13(3):31–37. (In Russ.).

3. Kruglov V. M., Solovyov L. Yu., Korolev K. V., Donets A. N. Nonlinear models of continuum mechanics in calculations of structures of civil and transport facilities. Siberian Transport University. Novosibirsk: Publishing house of Siberian Transport University 2024. 389 p. (In Russ.).
4. Korzhavin K. N. The effect of ice on engineering structures. Publishing house of the USSR Academy of Sciences. 1962. 203 p. (In Russ.).
5. AARI. Arctic and Antarctic Research Institute [Official site]. URL: <https://www.aari.ru/en>.
6. Novikov S. A. [et al.]. Investigation of the influence of the deformation rate during tests of freshwater ice on the strength during splitting, compression and crack resistance. *Collection of Materials of the III Scientific Conference of the Volga Regional Center of the Russian Academy of Sciences. Modern Methods of Designing and Testing Rocket and Artillery Weapons*. Sarov; 2004. Vol. 2. P. 882–896. (In Russ.).
7. Grats E. T., Schulson E. M. Preliminary observations of brittle compressive failure of columnar saline ice under triaxial loading. *Annals of Glaciology*. 1994;19:33–38.
8. Postnikov P. M. Interaction of ice fields with hydraulic structures and bridge supports in the lower reaches of the rivers of Siberia and the North. Dissertation for the degree of the Candidate of Engineering. Postnikov Pavel Mikhailovich. Novosibirsk, 1986. 195 p. (In Russ.).
9. Ptukhin F. I. Statistical method for estimating the large-scale effect of ice]. *Izvestiya SB of the USSR Academy of Sciences*. 1964. No. 6, Iss. 2. P. 70–79. (In Russ.).
10. Ptukhin F. I., Butyagin I. P. On the causes and quantitative assessment of the large-scale effect of ice. Issues of hydraulic engineering. Novosibirsk; 1972. Iss. 47. P. 112–121. (In Russ.).
11. Lavrov V. V. Deformation and strength of ice. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1969. 206 p. (In Russ.).
12. Tsuprik V. G. Laws of destruction of the edge of the ice cover in its interaction with the surface of the support. *Problems of Development of Geo-resources of the Far East. Issue 6: Mining Information and Analytical Bulletin. Selected articles (special issue)*. Moscow: Gornaya kniga; 2014. No. 12. P. 114–133. (In Russ.).
13. Korzhavin K. N. The work of ice cutters of bridge supports in conditions of ice drift of Siberian rivers. *Proceedings of NIIVT*. Vol. III. Tomsk; 1938. (In Russ.).
14. Afanasyev V. P., Dolgopolov Yu. V., Shvaishstein Z. I. Ice pressure on marine free-standing supports. *Proceedings of AANIA*. 1971;(300):101–104. (In Russ.).
15. Croasdale K. R., Morgenstern N. R., Nuttall J. B. Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers. *Journal of Glaciology*. 1977;19(81):309–312.
16. Hyrayama K., Schwarz I., Wu H. C. Ice forces of vertical pile: indentation and penetration. *Proceedings IAHR Ice Symp.* Hanover, New Hampshire, USA; 1975. P. 429–441.
17. Tsuprik V. G. On taking into account the influence of the diameter of the supports and the thickness of the ice in determining the ice load on the hydraulic structures of the shelf. *Studies of Marine Hydraulic Structures for the Development of the Shelf*. Leningrad: Publishing house of the Leningrad Polytechnic Institute; 1980. P. 84–94. (In Russ.).
18. Kärnä T. and Järvinen E. Symmetric and asymmetric flaking processes. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC-99)*. Helsinki, Finland; 1999. Vol. 3. P. 988–1000.
19. Methodological guidelines for determining ice loads on bridge supports. Research Institute of Transport Construction. Moscow; 1993. 170 p. (In Russ.).
20. Bulatov S. N. The strength of ice and ice cover. Novosibirsk; 1966. 154 p. (In Russ.).
21. Korzhavina K. N. Investigation of the mechanical properties of river ice. Proceedings of the NIIVT. Novosibirsk; 1940. Vol. 4, Iss. 2. 35 p. (In Russ.).
22. Wittman F. F., Shandrikov N. P. Some studies of the mechanical strength of ice. *Proceedings of the Arctic Institute*. Leningrad; 1938. Vol. 110. P. 83–100. (In Russ.).
23. Pinegin V. N. Preliminary report on the study of the strength of river ice in connection with temperature changes. *Bulletin of Siberian Engineers*. Tomsk; 1924. Vol. 4. P. 13–24. (In Russ.).
24. Arnold-Alyabyev V. I. Investigation of the ice strength of the Gulf of Finland in 1923, 1927 and 1928. *Proceedings of the GGO*. Leningrad; 1929. No. 2. P. 15–28. (In Russ.).
25. Petrov I. G. Selection of the most probable values of the mechanical characteristics of ice. *Proceedings of the AANII*. Leningrad; 1976. Vol. 331. P. 4–41.
26. Carney K. S. [et al.]. A phenomenological high strain rate model with failure for ice. *International Journal of Solids and Structures*. 2006;(43):7820–7839.
27. Sain T., Narasimhan R. Constitutive modeling of ice in the high strain rate regime. *International Journal of Solids and Structures*. 2011;(48):817–827.
28. Pernas-Sanchez J. [et al.]. Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts. *International Journal of Solids and Structures*. 2012;(23):32–45.
29. Carney K. S. [et al.]. A phenomenological high strain rate model with failure for ice. *International Journal of Solids and Structures*. 2006;(43):7820–7839.

30. Hill R. Oxford The mathematical theory of plasticity. Clarendon press; 1950.
31. Filonenko-Borodich M. M. Mechanical theories of strength. Moscow; 1961. 91 p. (In Russ.).
32. Kruglov V. M., Tomilov A. A., Sachkov I. V. On the assessment of the strength of ice in a triaxial stressed state. *Transport Construction*. 2015;(9):13–17. (In Russ.). URL: <https://rucont.ru/efd/487694>.
33. Kruglov V. M., Smolyanin A. G. Criterion of ice strength in a flat stressed state. *Hydrotechnical Construction*. 2017;(10):48–50. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

*А. Н. Донец* – доцент кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

*А. Д. Ветошкин* – студент факультета «Мосты и тоннели» Сибирского государственного университета путей сообщения.

*Л. Е. Казанов* – студент факультета «Мосты и тоннели» Сибирского государственного университета путей сообщения.

### **Information about the authors**

*A. N. Donets* – Associate Professor of the Bridges Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

*A. D. Vetroshkin* – student of the Bridges and Tunnels Faculty, Siberian Transport University.

*L. E. Kazanov* – student of the Bridges and Tunnels Faculty, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена после рецензирования 16.05.2024; принятая к публикации 24.06.2024.

The article was submitted 03.04.2024; approved after reviewing 16.05.2024; accepted for publication 24.06.2024.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.974:621.311.1

doi 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_62

### Исследование влияния геометрии и вида решетки металлической промежуточной опоры ЛЭП на ее прочность, жесткость и устойчивость

Алексей Анатольевич Новоселов<sup>1</sup>, Наталья Сергеевна Пичкурова<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup> Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> alex19732009@mail.ru

<sup>2</sup> nataliapich@mail.ru✉

**Аннотация.** Проектирование опор ЛЭП, обеспечивающих бесперебойное электроснабжение и безаварийную работу при минимальных затратах, является актуальной и важной задачей. В статье приведены результаты исследований по оптимизации конструктивной системы промежуточной опоры ЛЭП в металлическом исполнении. Вид опоры выбран на основании обзора статистических данных, который показал, что разрушение именно промежуточных опор составляет наибольший процент от общего числа разрушений всех опор в целом.

В статье приведены результаты исследований влияния вида решетки ствола металлической промежуточной опоры ЛЭП типа 1П220-2 на ее массу, количество узловых соединений, а также параметры надежности, такие как прочность, жесткость и устойчивость. По результатам расчетов оптимальными показателями обладает полураскосная и крестовая решетка из элементов гнутосварного квадратного профиля, который рекомендуется применять для элементов, работающих на условное центральное растяжение и сжатие.

Исследована зависимость ширины базы металлической опоры к ее общей высоте. Отмечено, что большая ширина базы затрудняет монтаж и транспортировку опоры, поскольку влияет на длину элементов ее решетки.

Рассмотрено влияние изменения ширины ствола по высоте на массу опоры в целом. Отмечено, что постоянная ширина ствола позволяет унифицировать элементы решетки, что уменьшает общие затраты на изготовление опоры.

**Ключевые слова:** промежуточная опора ЛЭП, квадратный профиль, решетка опоры, узлы соединения, масса опоры, экономичная конструктивная система

**Для цитирования:** Новоселов А. А., Пичкурова Н. С. Исследование влияния геометрии и вида решетки металлической промежуточной опоры ЛЭП на ее прочность, жесткость и устойчивость // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 62–70. DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_62.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

### The influence of the metal intermediate transmission line support geometry and type of grid study on its strength, rigidity and stability

Alexey A. Novoselov<sup>1</sup>, Natalya S. Pichkurova<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup> Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> alex19732009@mail.ru

<sup>2</sup> nataliapich@mail.ru✉

**Abstract.** Designing power transmission poles that ensure uninterrupted power supply and trouble-free operation at minimal cost is an urgent and important task. The article presents the results of research on the optimization of the structural system of an intermediate power line support in a metal design. The type of support was chosen based on a review of statistical data, which showed that the destruction of intermediate supports is the largest percentage of the total number of failures of all supports in the whole.

The article presents the results of studies of the effect of the type of lattice of the trunk of a metal intermediate transmission line support of type 1P220-2 on its mass, the number of nodal connections, as well as reliability parameters such as strength, rigidity and stability. According to the results of calculations, a semi-bevel and cross

lattice of bent-welded square profile elements has optimal parameters, which is recommended for elements operating on conditional central tension and compression.

The dependence of the width of the base of the metal support on its overall height is investigated. It is noted that the large width of the base makes it difficult to install and transport the support, since it affects the length of its lattice elements.

The effect of changing the width of the trunk in height on the weight of the support as a whole is considered. It is noted that the constant width of the trunk makes it possible to unify the lattice elements, which reduces the total cost of manufacturing the support.

**Keywords:** intermediate power line support, square profile, support grid, connection points, support weight, economical structural system

**For citation:** Novoselov A. A., Pichkurova N. S. The influence of the metal intermediate transmission line support geometry and type of grid study on its strength, rigidity and stability. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):62–70. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_62.

## Введение

Линии электропередач (ЛЭП) – это сложные системы, являющиеся важным элементом жизнеобеспечения. ЛЭП включают в себя такие составляющие, как опоры (промежуточные, анкерные, анкерно-угловые, концевые), кабельные изделия, изоляторы и арматура [1].

При строительстве опор их стоимость по разным источникам составляет от 35 до 45 % материальных затрат на всю линию электропередач [2, 3]. Опоры сложны в установке и ремонте и существенно влияют на надежность всей сети энергосистемы. По статистическим данным [4–8], отказы линий электропередач из-за разрушения опор составляют около 13 %, при этом примерно 70 % от общего числа разрушений приходится непосредственно на ствол опоры.

Повреждения опор обычно носят каскадный характер. Выход из строя одной опоры часто приводит к тому, что соседние опоры также подвергаются дополнительному воздействию, что может повлиять на их дальнейшую безопасную эксплуатацию.

Обзор необходимых теоретических материалов, статистический анализ аварийных ситуаций при отказе ЛЭП, вызванном обрушением металлических опор, позволили сделать следующий вывод: металлические опоры промежуточного типа наиболее подвержены полным или частичным разрушениям. На разрушение именно промежуточных опор приходится около 83 % от общего числа разрушений [9].

Задача проектирования промежуточных опор с минимальными затратами важна не только из-за того, что повреждение конструкций опор может снизить надежность передачи электроэнергии, но также по причине дорогостоящих и затратных по времени работ на ремонт или замену самих опор.

Таким образом, авторами статьи предпринята попытка определить для промежуточной опоры ЛЭП наиболее экономичную по материалу форму конструкции. В качестве предмета исследования была выбрана одноконтурная ЛЭП 220 кВ.

## Материалы и методы исследования

Типовая высота промежуточной опоры для межрегиональных и (или) межгосударственных ЛЭП классом напряжения 220 кВ варьируется от 15 до 55 м [2]. Форму, высоту и прочность ствола определяют прежде всего расположение опоры, уровень энергопотребления, прочность ее фундамента.

Для оптимизации конструктивных решений выбрана промежуточная опора 220 кВ типа 1П220-2, выполненная по типовой серии 3.407.2-145.1. Высота опоры – 43,5 м; база опоры – 4,34 м. В данной серии сечения элементов опоры запроектированы из одиночных равнополочных уголков.

В статье [10] отмечено, что уголковый профиль обладает рядом недостатков при применении его для элементов, работающих на сжатие и растяжение. В работах [11–13] отмечено, что для элементов, работающих на условное центральное растяжение и (или) сжатие, предпочтение следует отдавать гнутосварным квадратным профилям, а в [10, 14, 15] предпринята попытка заменить сечения конструктивных элементов опор ЛЭП на гнутосварной квадратный профиль.

Таким образом, в данном исследовании для рассматриваемой опоры была произведена замена сечений элементов из равнополочных уголков на сечения из квадратного профиля по ГОСТ 32931–2015.

Сечения гнутосварных профилей определялись по расчету на прочность, устойчивость и предельную гибкость. В общей сложности в

опорах было применено 14 типов сечений (групп конструктивных элементов). Пояса и решетка по высоте разбивались на пять типов сечений, распорки – на четыре.

Опора типа 1П220-2 решетчатая, состоит из ствола и траверс (рис. 1). Ствол опоры представляет собой четырехгранный усеченную пирамиду. Решетка ствола ромбическая.

Виды решеток ствола ЛЭП достаточно разнообразны [16], некоторые варианты приведены на рис. 2.

Одним из недостатков квадратного профиля является сложность конструирования узлов сопряжения элементов [10]. Все сущес-

твующие типовые стержневые стальные конструкции из гнутосварных профилей практически не имеют узлов, в которых сходятся три и более стержней. Связано это с тем, что при соединении в одном узле трех стержней происходит их расцентровка или сам узел становится сложным и имеет ограничения по применяемым сечениям. Поэтому для дальнейшего исследования приняты следующие варианты решетки ствола промежуточной опоры:

- ромбическая с совмещеными узлами (вариант 1, рис. 3, а);
- полураскосная (вариант 2, см. рис. 3, б);
- крестовая (вариант 3, см. рис. 3, в).

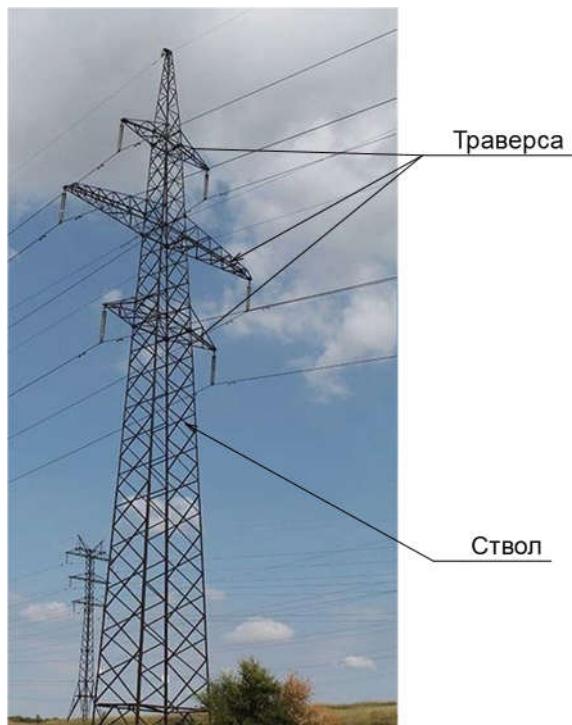


Рис. 1. Общий вид опоры ЛЭП типа 1П220-2

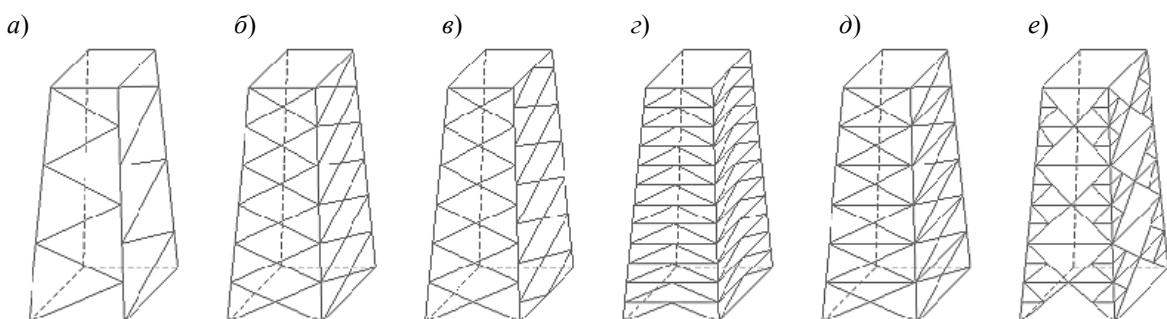


Рис. 2. Схемы решеток ствола опор ЛЭП:

- а – треугольная с несовмещенными узлами;
- б – ромбическая с совмещенными узлами;
- в – ромбическая с несовмещенными узлами;
- г – полураскосная;
- д – крестовая;
- е – шпренгельная

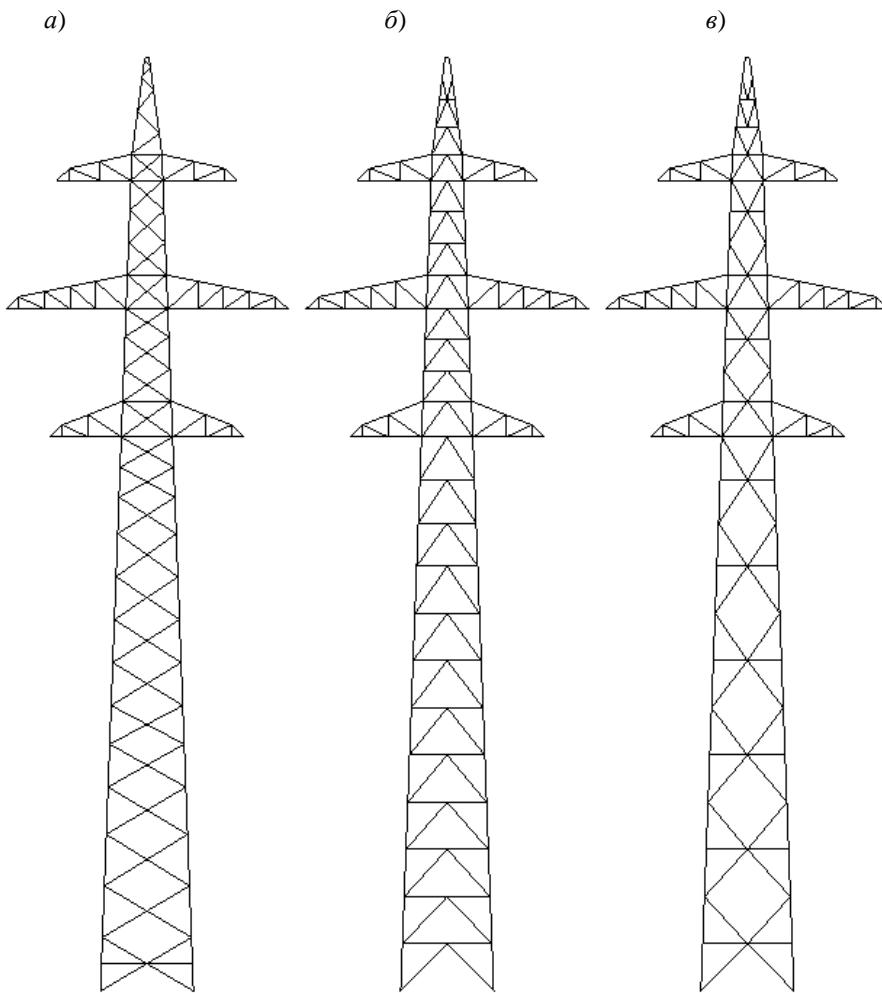


Рис. 3. Схемы стволов опоры:  
а – ромбическая с совмещенными узлами; б – полураскосная; в – крестовая

### Результаты исследования

На общую массу опоры влияет в первую очередь масса ствола. В связи с этим задача определения минимальной массы опоры решалась только в отношении его ствола, другие элементы опоры (в частности, траверсы) в исследовании учтены не были.

При проектировании ствола опоры для оптимизации веса изменялись следующие основные параметры:

- тип решетки ствола;
- габариты основания ствола (база опоры);
- размеры верхней части ствола.

Нагружение опоры принято по типовой серии 3.407.2-145.1.

На первом этапе проведено сравнение геометрических схем трех опор, приведенных на рис. 3. Геометрические размеры опоры с ромбической решеткой с совмещенными узлами (см. рис. 3, а) полностью соответствуют типо-

вой серии 3.407.2-145.1. Для двух других опор при сохранении основных габаритов были изменены схемы решеток.

Расчет выполнен в программе SCAD++ (версия 21.1.9.5), являющейся интегрированной системой прочностного анализа и проектирования конструкций на основе метода конечных элементов. Для каждой опоры выполнен расчет с автоматическим подбором сечений по группам конструктивных элементов. Сечение конструктивного элемента подобрано таким образом, чтобы коэффициент использования сечения  $K_{\max}$  стремился к единице, где  $K_{\max}$  – отношение фактически вычисленного значения (несущей способности, предельной гибкости, местной устойчивости и т. д.) к предельно допустимому значению. Кроме того, выполнен контроль максимальных перемещений верхней точки опоры по второй группе предельных состояний. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Сравнение результатов расчета опор ЛЭП

Схема	Кол-во элементов	Кол-во узлов	Масса, т	Перемещение верхней точки опоры, мм
Вариант 1	240	123	3,10	572
Вариант 2	222	114	2,89	578
Вариант 3	205	104	3,18	557

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее экономичной по массе получилась схема по варианту 2, наиболее тяжелой – по варианту 3.

2. Все три схемы имеют примерно равные значения перемещений (разница в значениях составляет не более 4 %).

3. По количеству узлов и элементов лучшими показателями обладает схема по варианту 3.

Для дальнейших исследований выбраны схемы решетки по вариантам 2 и 3.

Следующим этапом исследования является изучение влияния ширины базы опоры на ее массу. При этом ширина опоры изменялась только до уровня первой траверсы.

Условно опору можно рассмотреть как консольную балку, следовательно, при одинаковой высоте опор масса поясов будет меньшей при большей ширине базы опор. Однако в этом случае увеличивается масса, приходящаяся на раскосы. Кроме того, большая длина раскосов усложняет транспортировку и монтаж опоры в целом.

Четких рекомендаций по выбору ширины базы опоры не выявлено. Исходя из практики проектирования для существующих промежуточных опор ЛЭП 220–330 кВ ширина базы составляет от 4,5 до 7 м.

В табл. 2 приведены данные по размерам ширины базы опоры и высоты до низа траверсы в зависимости от типа опор.

Среднее отношение базы опоры к высоте до низа траверсы для опор 220 кВ составляет 0,211; для опор 330 кВ – 0,234. Согласно [3] для рассматриваемых типов решетки опоры ЛЭП рекомендуемое отношение ширины базы опоры к полной высоте составляет от 0,153 до 0,167.

Для оценки влияния ширины базы опоры на массу опоры были просчитаны опоры по вариантам решетки 2 и 3 (см. рис. 3) с шири-

ной базы опоры от 4 до 7 м. В табл. 3 приведены полученные результаты расчета.

По результатам расчета можно сделать следующие выводы:

1. При схеме решетки по варианту 2 масса опоры уменьшается, если ширина базы составляет от 4 до 7 м. При ширине 7,5 м масса опоры увеличивается.

2. При схеме решетки по варианту 3 масса опоры уменьшается на всем просчитанном диапазоне. При этом, начиная с 6,5 м и выше, уменьшение массы опоры составляет не более 1 %.

Следует отметить, что чем больше ширина базы опоры, тем длиннее элементы решетки, что затрудняет монтаж и транспортировку опоры, особенно в труднодоступные районы. Так, для схемы решетки по варианту 2 при ширине базы 7,5 м длина нижнего горизонтального элемента решетки составляет 7,06 м, а его масса – 70 кг.

При первоначальной схеме решетки (вариант 1, см. рис. 3, а) ширина сечения ствола опоры между траверсами изменяется от 2,4 до 1,4 м. Данные параметры системы, с одной стороны, имеют преимущество, поскольку соответствуют эпюрам моментов, возникающим в стволе опоры. С другой стороны, изменение ширины ствола не позволяет унифицировать элементы решетки опоры.

Рассмотрим влияние изменения ширины ствола опоры на участке между крайними траверсами на массу всей опоры (при условии единой ширины на всем участке). Анализ проведен для опоры с шириной базы 6 м, ширина ствола на участке между траверсами изменяется от 1,5 до 3 м с шагом 0,5 м. Результаты исследования показаны в табл. 4.

По результатам расчетов меньшей массой обладает опора при ширине ствола на участке между траверсами, равной 2,5 м. При этом общая масса опоры в целом незначительно, но меньше первоначального варианта опоры по типовой серии 3.407.2-145.1.

Таблица 2

## Размеры опор ЛЭП (серия 3.407.2-145.1)

Тип опоры	Ширина базы, м	Высота до низа таверсы, м	Отношение базы опоры к высоте до низа таверсы
П220-2	5,40	22,5	0,240
П220-2+5	5,97	27,5	0,217
П220-2T	5,40	22,5	0,240
П220-2T+5	5,97	27,5	0,217
П220-3	5,00	25,5	0,196
П220-3+5	5,58	30,5	0,183
П220-3T	5,00	25,5	0,196
П220-3T+5	5,58	30,5	0,183
ПС220-2	4,83	17,5	0,276
ПС220-2T	4,83	17,5	0,276
ПС220-3	4,42	20,5	0,216
ПС220-5	4,10	22,5	0,182
ПС220-5T	4,10	22,5	0,182
ПС220-6	4,10	22,5	0,182
ПС220-6T	4,10	22,5	0,182
П330-2	5,75	22,5	0,256
П330-2+5	6,33	27,5	0,230
П330-2T	5,75	22,5	0,256
П330-2T+5	6,33	27,5	0,230
П330-3	5,42	25,5	0,213
П330-3+5	6,00	30,5	0,197
П330-3T	5,42	25,5	0,213
П330-3T+5	6,00	30,5	0,197
ПС330-2	5,17	17,5	0,295
ПС330-2T	5,17	17,5	0,295
ПС330-3	4,82	20,5	0,235
ПС330-3T	4,82	20,5	0,235
ПС330-5	5,32	25,5	0,209
ПС330-6	5,75	22,5	0,256
ПС330-7	5,42	25,5	0,213
ПС330-7+5	6,75	30,5	0,221

Таблица 3

## Масса опоры в зависимости от ширины базы, т

Вариант	Элемент	Ширина базы опоры, м							
		4,0	4,3	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
2	Решетка	0,69	0,72	0,76	0,80	0,86	0,88	0,91	0,95
	Стойки	2,23	2,17	2,02	1,94	1,86	1,77	1,67	1,65
	Итого	2,92	2,89	2,78	2,74	2,72	2,65	2,58	2,6
3	Решетка	0,70	0,73	0,77	0,81	0,87	0,89	0,92	0,98
	Стойки	2,63	2,45	2,30	2,13	2,01	1,94	1,88	1,80
	Итого	3,33	3,18	3,07	2,94	2,88	2,83	2,80	2,78

Таблица 4

## Влияние ширины ствола на участке между таверсами на общую массу опоры, т

Элемент	Ширина ствола на участке между таверсами, м				
	2,4–1,4 (переменная)	1,5	2,0	2,5	3,0
Решетка	0,86	0,73	0,80	0,96	1,10
Пояса	1,86	2,17	1,92	1,74	1,69
Итого	2,72	2,90	2,72	2,70	2,79

## **Выводы**

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Вид решетки опоры ЛЭП существенно влияет на общую массу опоры. На примере промежуточной опоры при проектировании сечений из гнутосварных квадратных профилей определено, что наиболее экономичным является вариант полураскосной решетки, а вариант крестовой решетки существенно уменьшает общее количество узловых соединений.

2. Отношение базы ствола к общей высоте опоры также влияет на массу опоры в целом: чем больше основание ствола, тем меньше масса опоры.

3. Проектирование ствола на участке между траверсами постоянной ширины более экономично. Отмечено, что постоянная ширина позволяет унифицировать элементы решетки, а это также влияет на общую массу опоры.

## **Список источников**

1. Смирнова Н. С. Оптимизация реконструкции воздушных линий электропередач с учетом надежности энергоснабжения потребителей : специальность 2.1.1 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Смирнова Наталья Сергеевна. Макеевка, 2023. 26 с.
2. Patil A. J., Singh F., Jarial R. K. Some Aspects of Design and Condition Monitoring of Electric Power Transmission Towers // International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology (IJISSET). 2019. Vol. 5, No. 10. P. 57–64.
3. Halkude S. A., Ankad. P. P. Analysis and Design of Transmission Line Tower 220 kV: A Parametric Study // International Journal of engineering & technology (IJERT). 2014. Vol. 3, No. 10. P. 1343–1348.
4. Смирнова Н. С. Анализ конструктивных и эксплуатационных особенностей при определении остаточного ресурса воздушных линий электропередачи // Современное промышленное и гражданское строительство. 2012. Т. 8, № 2. С. 87–97. EDN PFFBKX.
5. Повреждение опор как вид отказов воздушных линий электропередачи / В. П. Горелов, Г. В. Ситников, В. Г. Кирюшкин [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 2. С. 110–115. EDN RSMOXF.
6. Яковлев Л. В., Каверина Р. С., Дубинич Л. А. Комплекс работ и предложений по повышению надежности ВЛ на стадии проектирования и эксплуатации // Линии электропередачи – 2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс. Третья Российская с международным участием научно-практическая конференция. Новосибирск, 2008. С. 28–49.
7. Хамидуллин И. Н., Ильин В. К. К вопросу о надежности воздушных линий электропередачи 35–500 кВ // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12, № 1. С. 45–53. EDN XWVYSB.
8. Сенькин Н. А. Учет прогрессирующего обрушения при проектировании опор воздушных линий электропередачи // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 4 (93). С. 37–46. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-4-37-46. EDN MXCQXB.
9. Новости электротехники : информационно-справочное издание. URL <http://news.elteh.ru/arh/2007/46/11.php> (дата обращения: 22.05.2024).
10. Новоселов А. А., Пичкурова Н. С. Анализ эффективности применения труб квадратных сечений при проектировании стальных опор ЛЭП башенной конструкции // Известия вузов. Строительство. 2024. № 1. С. 30–38. DOI 10.32683/0536-1052-2024-781-1-30-38.
11. Симченко О. Л., Калаев В. П., Новиков М. Ю. Сравнительный анализ технико-экономических показателей легких стропильных ферм с параллельными поясами пролетом 24 м из парных уголков и ферм из гнутосварных профилей типа «Молодечно» с использованием программного комплекса SCAD OFFIC // Выставка инноваций – 2021 (весенняя сессия) : сборник материалов XXXI Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов и XL Научно-технической конференции молодежи АО «ИЭМЗ “Купол”». Ижевск : Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, 2021. С. 151–156. EDN DSRQKM.
12. Малыцев С. А., Зуева И. И. Анализ эффективности применения гнутосварных профилей прямоугольного сечения в покрытиях производственных зданий // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2019. Т. 1. С. 280–287. EDN MBCINS.

13. Новоселов А. А., Коваленко А. К. Напряженное состояние узлов ферм из тонкостенных гнутосварных профилей // Актуальные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения : материалы VII очной Международной научно-практической конференции, Саратов, 15–16 марта 2018 года. Саратов : Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова, 2018. С. 206–211.
14. Новоселов А. А., Пичкурова Н. С. Анализ расчета стальных конструкций ЛЭП по современным нормативно-техническим документам // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 86–93. DOI 10.52170/1815-9265\_2022\_63\_86.
15. Качановская Л. И., Касаткин С. П. Квадратный профиль – новые решения в проектировании решетчатых опор ВЛ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 4 (55). С. 76–81.
16. Колесов А. И., Иванова О. Б., Иванова Е. В. Металлические конструкции высотных и большепролетных зданий и сооружений. Учебное пособие. Часть 4. Высотные сооружения с применением стальных конструкций. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2023. 121 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/342767> (дата обращения: 22.05.2024).

## References

1. Smirnova N. S. Optimization of reconstruction of overhead power transmission lines, taking into account the reliability of energy supply to consumers. Specialty 2.1.1 Building structures, buildings and structures. Abstract of the dissertation of the Candidate of Engineering. Smirnova Natalia Sergeevna. Makeyevka; 2023. 26 p. (In Russ.).
2. Patil A. J., Singh F., Jarial R. K. Some Aspects of Design and Condition Monitoring of Electric Power Transmission Towers. *International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology*. 2019;5(10):57–64.
3. Halkude S. A., Ankad. P. P. Analysis and Design of Transmission Line Tower 220 kV: A Parametric Study. *International Journal of engineering & technology*. 2014;3(10):1343–1348.
4. Smirnova N. S. Analysis of design and operational features in determining the residual life of overhead transmission lines. *Modern Industrial and Civil Engineering*. 2012;8(2):87–97. (In Russ.).
5. Gorelov V. P., Sitnikov G. V., Kiryushkin V. G. [et al.]. Damage to supports as a type of failure of overhead transmission lines. *Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East*. 2013;(2):110–115. (In Russ.).
6. Yakovlev L. V., Kaverina R. S., Dubinich L. A. A set of works and proposals to improve the reliability of overhead lines at the design and operation. *Power Transmission Lines – 2008: Design, Construction, Operating Experience and Scientific and Technical Progress. The Third Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. Novosibirsk; 2008. P. 28–49. (In Russ.).
7. Khamidullin I. N., Ilyin V. K. On the issue of reliability of overhead power transmission lines of 35–500 kV. *Electrotechnical and Information Complexes and Systems*. 2016;12(1):45–53. (In Russ.).
8. Senkin N. A. Accounting for progressive collapse in the design of overhead transmission line supports. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022;(93):37–46. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-4-37-46. (In Russ.).
9. Information and reference publication *News of Electrical Engineering*. (In Russ.). URL <http://news.elteh.ru/arh/2007/46/11.php>.
10. Novoselov A. A., Pichkurova N. S. Analysis of the effectiveness of using pipes of square sections in the design of tower steel transmission line supports. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024;(1):30–38. (In Russ.). DOI 10.32683/0536-1052-2024-781-1-30-38.
11. Simchenko O. L., Kalaev V. P., Novikov M. Yu. Comparative analysis of the technical and economic indicators of light rafter trusses with parallel belts with a span of 24 m from paired corners and farms made of bent-welded profiles of the Molodechno type using the SCAD OFFIC software package. *Exhibition of innovations – 2021 (spring session): Collection of Materials of the XXXI Republican Exhibition-session of Student Innovative Projects and the XL Scientific and Technical Youth Conference of JSC IEMZ Kupol*. Izhevsk: Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov; 2021. P. 151–156. (In Russ.).
12. Maltsev S. A., Zueva I. I. Analysis of the effectiveness of the use of bent-welded rectangular profiles in coatings of industrial buildings. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2019;1:280–287. (In Russ.).
13. Novoselov A. A., Kovalenko A. K. The stressed state of truss nodes made of thin-walled bent-welded profiles. *Actual Problems and Prospects for the Development of Construction, Heat and Gas Supply and Energy Supply: Materials of the VII Intramural International Scientific and Practical Conference, Saratov, March 15–16, 2018*. Saratov: Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov; 2018. P. 206–211. (In Russ.).

14. Novoselov A. A., Pichkurova N. S. Computational analysis of power transmission line steel structures according to modern regulatory and technical documents. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(63):86–93. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2022\_63\_86.
15. Kachanovskaya, L. I., Kasatkin S. P. Square profile – new solutions in the design of lattice overhead line supports. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2019;4(55):76–81. (In Russ.).
16. Kolesov A. I., Ivanova O. V., Ivanova E. V. Metal structures of high-rise and high-rise buildings and structures. Textbook. Part 4: High-rise structures using steel structures. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering; 2023. 121 p. (In Russ.). URL: <https://e.lanbook.com/book/342767>.

### **Информация об авторах**

*А. А. Новоселов* – доцент кафедры «Здания, строительные конструкции и материалы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

*Н. С. Пичкурова* – доцент кафедры «Здания, строительные конструкции и материалы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

### **Information about the authors**

*A. A. Novoselov* – Associate Professor of the Buildings, Building Constructions and Materials Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

*N. S. Pichkurova* – Associate Professor of the Buildings, Building Constructions and Materials Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 21.06.2024; одобрена после рецензирования 05.07.2024; принята к публикации 12.07.2024.

The article was submitted 21.06.2024; approved after reviewing 05.07.2024; accepted for publication 12.07.2024.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 625.142.45:666.982.4

doi 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_71

### Оценка несущей способности железобетонных шпал при строительстве и реконструкции железнодорожного пути

Наталья Сергеевна Пичкурова<sup>1✉</sup>, Валерий Степанович Воробьев<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> nataliapich@mail.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup> vorobjev@stu.ru

**Аннотация.** В последнее десятилетие развитие международных отношений, рост экономики РФ, переориентация потоков перевозимых грузов железнодорожным транспортом с Запада на Восток поставили новые задачи по реконструкции Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей, проведению предпроектных исследований по Северо-Сибирской и Центрально-Азиатской международным дорогам, в частности по совершенствованию методов расчета конструкций, элементов железнодорожного пути, напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций.

В статье предпринята попытка оценить несущую способность двух подтипов широко применяемых шпал (ШЗ-Д и ШЗ-Д 4×10) с позиции расчета железобетонных конструкций по общему методу. Так, все предпосылки и необходимые зависимости были использованы по общему случаю расчета нормальных сечений изгибаемых элементов при любых формах сечения и армировании.

Исследования проведены для классов бетона по прочности на сжатие В40 и В55. Показано, что шпалы подтипа ШЗ-Д в подрельсовом сечении обладают большей несущей способностью, чем шпалы подтипа ШЗ-Д 4×10. Также результаты исследования показали, что для железобетонных шпал подтипов ШЗ-Д и ШЗ-Д 4×10 увеличение класса бетона по прочности на сжатие существенно не влияет на несущую способность конструкций.

Работа выполнена в рамках госбюджетного научного исследования по обоснованию конструктивных решений железобетонных шпал с увеличенным ресурсом.

**Ключевые слова:** струнобетонная шпала; шпала со стержневой арматурой; общий метод расчета нормальных сечений; высота сжатой зоны; несущая способность элемента

**Для цитирования:** Пичкурова Н. С., Воробьев В. С. Оценка несущей способности железобетонных шпал при строительстве и реконструкции железнодорожного пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 71–78. DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_71.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

### Reinforced concrete sleepers bearing capacity assessment during the construction and rehabilitation of railway tracks

Natalia S. Pichkurova<sup>1✉</sup>, Valery V. Vorobyov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> nataliapich@mail.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup> vorobjev@stu.ru

**Abstract.** In the last decade, the development of international relations, the growth of the Russian economy, the reorientation of the flow of goods transported by rail from West to East have set new tasks for the reconstruction of the Baikal-Amur and Trans-Siberian Railways, and conducting pre-design studies on the North Siberian and Central Asian international roads , in particular, to improve methods for calculating structures, railway track elements, and the stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures.

The article attempts to evaluate the bearing capacity of two sub-types of widely used sleepers (S3-D and S3-D 4×10) from the perspective of calculating reinforced concrete structures using the general method. Thus, all the prerequisites and necessary dependencies were used in the general case of calculating the normal cross-sections of bent elements for any cross-section shapes and reinforcement.

Studies have been conducted for concrete compressive strength classes B40 and B55. It is shown that sleepers of the S3-D subtype in the sub-rail section have a higher bearing capacity than sleepers of the S3-D 4×10 subtype.

The results of the study also showed that for reinforced concrete sleepers of subtypes S3-D and S3-D 4×10, an increase in the concrete compressive strength class does not significantly affect the bearing capacity of structures.

The results of the conducted research were carried out within the framework of a state-funded scientific study to substantiate the design solutions of reinforced concrete sleepers with an increased resource.

**Keywords:** string-concrete sleeper; sleepers with rod fittings; general method for calculating normal cross sections; height of the compressed zone; bearing capacity of the element

**For citation:** Pichkurova N. S., Vorobyov V. S. Reinforced concrete sleepers bearing capacity assessment during the construction and rehabilitation of railway tracks. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):71–78. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_71.

## Введение

Со времен первых железных дорог, как правило, используют классическую конструкцию пути – путь на балласте, состоящий из верхней и нижней части [1, 2]. Верхняя часть состоит из рельсов, узлов скрепления и шпал, нижняя – из щебеночного балласта, песчаной подушки и земляного полотна (рис. 1).

Классический путь на балласте имеет ряд достоинств [1]:

- низкие капитальные затраты на строительство;
- возможность регулировки геометрии рельсовой колеи;
- восстановление пути после сходов и катастроф;
- гашение шума и вибрации;
- путь на «слабых» грунтах;
- унификация при различных условиях эксплуатации.

Шпала (от голл. *spalk* – подпорка) является основным элементом верхнего строения пути [4] и, как правило, работает на изгиб как балка на упругом основании. Роль шпал подчерки-

валась многими учеными с точки зрения безопасности движения поездов, а также их ремонтопригодности и долговечности [5–7]. В период развития знаний о процессе работы шпал при различных условиях эксплуатации в строительстве широкое применение получили железобетонные шпалы.

По результатам лабораторных и эксплуатационных испытаний различных конструкций железобетонных шпал, научного обобщения отечественного и зарубежного практического опыта долгое время для железных дорог РФ использовались струнобетонные шпалы [8]. Арматура струнобетонных шпал – высококрочная проволока (струна), расположенная по всему сечению шпалы симметрично вертикальной оси. Диаметр струн 3 мм, номинальное количество 44 шт. (рис. 2).

Для шпалы подтипа ШЗ-Д (для скреплений с шурупно-дюбельным прикреплением) согласно ТУ 5864-255-01124323-2008 класс бетона по прочности на сжатие принимают не менее В40, передаточную прочность бетона –



Рис. 1. Современная конструкция балластного пути [3]

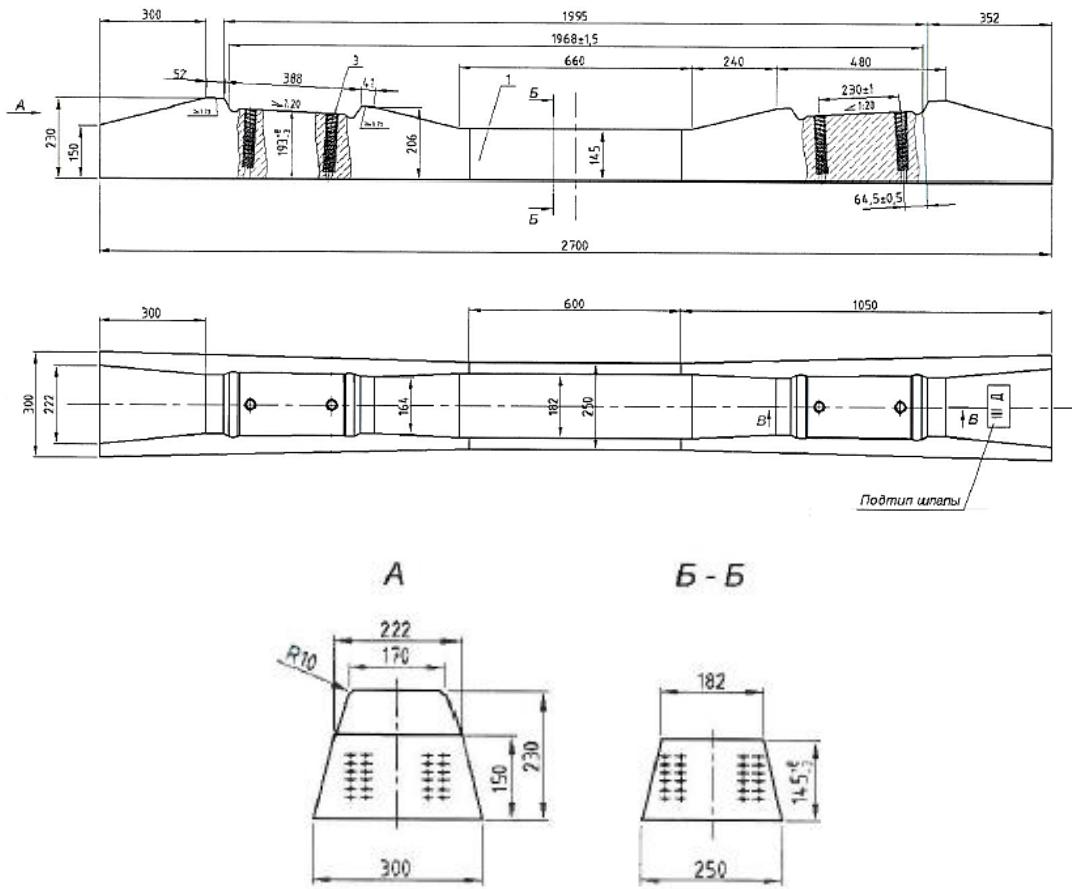


Рис. 2. Шпала железобетонная подтипа ШЗ-Д

не ниже 34,2 МПа. Общая сила начального натяжения проволок – не менее 358 кН.

В настоящее время альтернативным вариантом струнобетонных шпал являются шпалы, изготовленные на высокотехнологичной линии итальянского производства OLMI. Отличием данных шпал от струнобетонных является их армирование стержнями диаметром 10 мм в количестве 4 шт. (рис. 3). Общая сила начального натяжения стержней – не менее 343 кН.

Количество стержней в шпалах нового поколения принято по эквивалентной площади: общая площадь арматуры  $4\text{Ø}3$  равна 312,4  $\text{мм}^2$ ; общая площадь  $4\text{Ø}10$  – 314  $\text{мм}^2$ . Однако для железобетонных изгибающихся элементов не всегда эквивалентная замена арматуры является корректным решением. Связано это с тем, что использование стержней большего диаметра смешает центр тяжести арматуры ближе к нейтральной оси элемента, а значит,

влияет на плечо внутренней пары сил и несущую способность всего сечения [9]. Более того, для общего случая расчета железобетонных конструкций по нормальным сечениям принята гипотеза о том, что рабочая высота сечения принимается для каждого арматурного слоя индивидуально [10].

#### Материалы и методы исследования

Для общего метода расчета по нормальным сечениям приняты следующие гипотезы (рис. 4):

1. Растворенный бетон в деформировании не учитывается.
2. Эпюра напряжений бетона в сжатой зоне принимается прямоугольной.
3. Сжатая зона ограничена линией, параллельной нейтральной оси (нейтральному слою), но не совпадающей с ней.
4. Рабочая высота сечения принята для каждого арматурного слоя индивидуально.

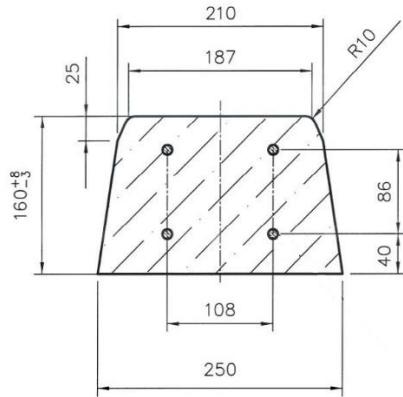


Рис. 3. Сечение шпаль подтипа ШЗ-Д 4×10

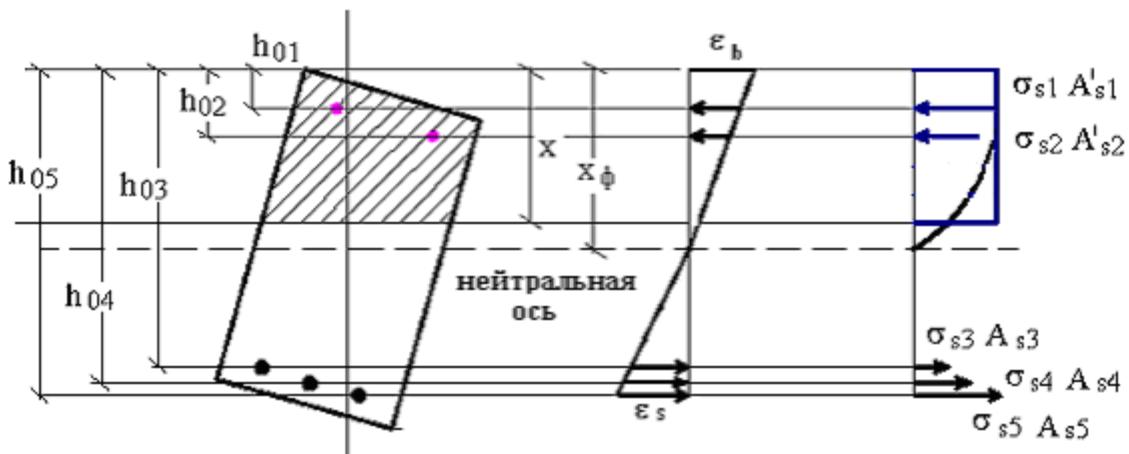


Рис. 4. Общий случай расчета изгибаемых железобетонных элементов по нормальным сечениям

5. Распределение напряжения в арматуре осуществляется с использованием гипотезы плоских сечений.

6. Соотношение между условной линией, ограничивающей сжатую зону, и фактическим нейтральным слоем учитывается коэффициентом полноты эпюры напряжений:  $\omega = \frac{x}{x_\phi} = \alpha - 0,08R_b$  (формула (22) [10]).

Для расчета по нормальным сечениям использовано следующее условие:

$$M \leq R_b S_b - \sum \sigma_{si} S_{si}, \quad (1)$$

где  $M$  – проекция момента внешних сил на плоскость, перпендикулярную прямой, ограничивающей сжатую зону сечения;  $S_b$  – статический момент площади сжатой зоны бетона относительно оси, параллельной прямой, ограничивающей сжатую зону и проходящей через центр тяжести сечения наиболее растянутого стержня;  $\sigma_{si}$  – напряжение в  $i$ -м стержне продольной арматуры;  $S_{si}$  – статический момент площади сечения  $i$ -го стержня

продольной арматуры относительно указанной оси.

Напряжения в арматуре приняты в зависимости от относительной высоты сжатой зоны (рис. 5) по следующим формулам:

– при  $\xi_i \leq \xi_{Ri}$

$$\sigma_{si} = R_s \left[ \eta - (\eta - 1)(2 \frac{\xi_i}{\xi_{Ri}} - 1) \right] \leq \eta R_s; \quad (2)$$

– при  $\xi_{el,i} \geq \xi_i > \xi_{Ri}$

$$\sigma_{si} = \left[ \beta + (1 - \beta) \frac{\xi_{el,i} - \xi_i}{\xi_{el,i} - \xi_{Ri}} \right] R_{si}; \quad (3)$$

– при  $\xi_i > \xi_{el,i}$

$$\sigma_{si} = \frac{\sigma_{sc,u}}{1 - \frac{\omega}{1,1}} \left( \frac{\omega}{\xi_i} - 1 \right) + \sigma_{spi}, \quad (4)$$

где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий класс арматуры (для проволоки  $\eta = 1,15$ ; для стержневой арматуры  $\eta = 1,0$ );  $\beta$  – коэффициент, зависящий от способа натяжения арматуры, для расчетов принят  $\beta = 0,8$ ;  $\sigma_{sc,u}$  – предельное напряжение в арматуре сжатой зоны, МПа.

Далее приведены расчеты по определению несущей способности шпал по общему слу-

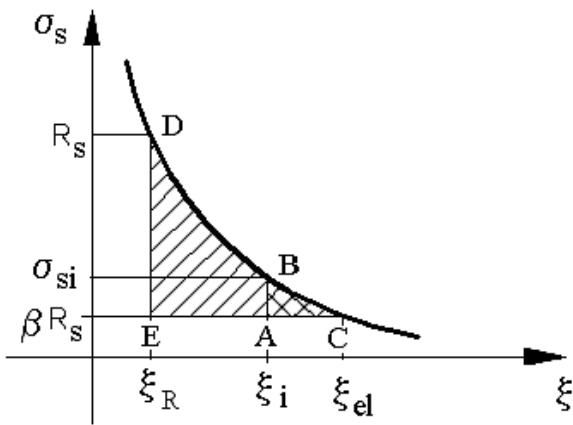


Рис. 5. Эмпирическая зависимость между напряжениями в арматуре и относительной высотой сжатой зоны

чаю расчета железобетонных конструкций по нормальным сечениям.

В целом расчет шпал сводится к определению относительной высоты сжатой зоны, напряжений в каждом арматурном слое по формулам (2)–(4), высоты сжатой зоны (итерационным способом) и несущей способности сечения по формуле (1).

Для расчета приняты следующие подтипы шпал: ШЗ-Д и ШЗ-Д 4×10.

Расположение арматуры в струнобетонной шпale показано на рис. 6, в шпale со стержневой арматурой – на рис. 7.

В качестве исходных данных приняты:

- класс бетона по прочности В40 ( $R_b = 22$  МПа); класс бетона по прочности В55 ( $R_b = 30$  МПа);
- для струнобетонных шпал класс арматуры Вр1500 ( $R_s = 1\ 300$  МПа);

– для шпал со стержневой арматурой класс арматуры А1200К ( $R_s = 1\ 050$  МПа);

– величина начального напряжения для струнобетонных шпал принята  $\sigma_{sp} = 1\ 145$  МПа;

– величина начального напряжения арматуры у шпал типа ШЗ-Д 4×10  $\sigma_{sp} = 1\ 092$  МПа.

### Результаты исследования

#### Результаты расчета несущей способности струнобетонной шпалы типа ШЗ-Д

В первом приближении значение высоты сжатой зоны  $x$  принято при среднем напряжении в арматуре  $0,9R_s$ , т. е.  $\Sigma\sigma_{si} = 1\ 170$  МПа.

После пяти итераций получены результаты, представленные в первой части табл. 1.

Площадь сжатого бетона равна:

$$A_b = \frac{\Sigma\sigma_{si} A_{si}}{R_b} \quad (5)$$

Статический момент сжатой зоны бетона в виде трапеции относительно нижнего ряда проволок равен:

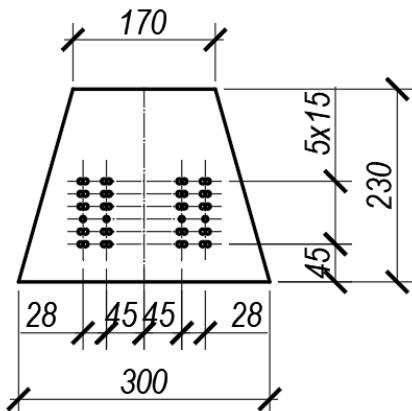


Рис. 6. Расположение арматурной проволоки в сечении шпалы типа ШЗ-Д

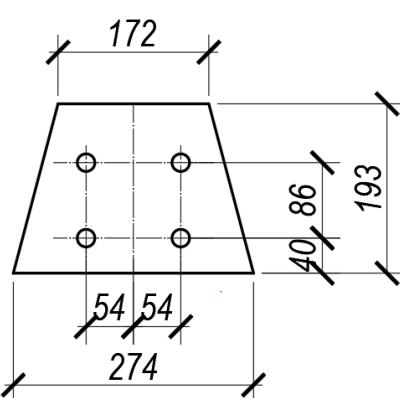


Рис. 7. Расположение стержневой арматуры в сечении шпалы типа ШЗ-Д 4×10

Таблица 1  
Результаты расчета (ШЗ-Д)

Ряд	Площадь сечения $i$ -го ряда проволок $A_{si}$ , $\text{мм}^2$	Рабочая высота $i$ -го слоя, мм	$\xi_i = \frac{x}{h_0}$	$\sigma_{si}$ , МПа	$\sigma_{si} A_{si}$ , Н	$\sigma_{si} A_{si}(h_{01} - h_{0i})$ , Н·мм
Класс бетона по прочности В40, $x = 85,157$ мм						
1	56,8 ( $8\varnothing 3$ )	185	0,4603	1 281,78	72 805,32	0
2	56,8 ( $8\varnothing 3$ )	170	0,5009	1 247,92	70 882,11	1 063 232
3	28,4 ( $4\varnothing 3$ )	155	0,5494	1 207,51	34 293,34	1 028 800
4	56,8 ( $8\varnothing 3$ )	140	0,6082	1 158,44	65 799,35	2 960 971
5	56,8 ( $8\varnothing 3$ )	125	0,6812	1 097,59	62 343,08	3 740 585
6	56,8 ( $8\varnothing 3$ )	110	0,7741	1 011,45	57 450,53	4 308 789
Суммарные значения					363 573,73	13 102 377
Класс бетона по прочности В55, $x = 67,237$ мм						
1	56,8 ( $8\varnothing 3$ )	185	0,3635	1 313,97	74 633,65	0
2	56,8 ( $8\varnothing 3$ )	170	0,3956	1 284,62	72 966,22	1 094 493
3	28,4 ( $4\varnothing 3$ )	155	0,4338	1 252,90	35 582,29	1 067 469
4	56,8 ( $8\varnothing 3$ )	140	0,4803	1 214,38	68 976,89	3 103 960
5	56,8 ( $8\varnothing 3$ )	125	0,5380	1 166,62	66 264,15	3 975 849
6	56,8 ( $8\varnothing 3$ )	110	0,6113	1 105,84	62 811,57	4 710 868
Суммарные значения					381 234,78	13 952 639

$$S_b = 0,5 \left[ b_1 x \left( h_{01} - \frac{1}{3} x \right) + b_2 x \left( h_{01} - \frac{2}{3} x \right) \right]. \quad (6)$$

Для струнобетонной шпалы при высоте сжатой зоны  $x = 85,157$  мм

$$\begin{aligned} b_2 &= 170 + 2 \cdot 0,5 \cdot \frac{300 - 170}{230} \cdot 85,157 = \\ &= 218,54 \text{ мм}, \\ b_1 &= 170 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Полученные результаты расчета сведены в табл. 2.

При тех же геометрических размерах, но при увеличении класса бетона по прочности на сжатие до В55 получены результаты, приведенные во второй части табл. 1, 2.

#### Результаты расчета несущей способности шпалы, армированной стержневой арматурой подтипа ШЗ-Д 4×10

В первом приближении значение высоты сжатой зоны  $x$  принято при среднем напряжении в арматуре  $0,9R_s$ , т. е.  $\Sigma\sigma_{si} = 945$  МПа.

После четырех итераций получены результаты, представленные в первой части табл. 3, 4.

Для шпалы, армированной стержневой арматурой, при высоте сжатой зоны  $x = 68,94$  мм

$$\begin{aligned} b_2 &= 172 + 2 \cdot \frac{274 - 172}{193} \cdot 0,5 \cdot 68,94 = \\ &= 208,54 \text{ мм}, \\ b_1 &= 172 \text{ мм}. \end{aligned}$$

При тех же геометрических размерах, но при увеличении класса бетона по прочности на сжатие до В55 получены результаты, указанные во второй части табл. 3, 4.

#### Выводы

1. Несущая способность в подрельсовом сечении выше на 37 % у шпал, армированных проволокой, чем у шпал, армированных стержневой арматурой.

2. Увеличение класса бетона незначительно влияет на повышение несущей способности шпалы; так, для рассмотренных подтипов шпал увеличение класса бетона на сжатие с В40 до В55 повысило несущую способность не более чем на 12 %.

В дальнейшем планируется провести исследования по расчету трещиностойкости шпал подтипов ШЗ-Д и ШЗ-Д 4×10, а также по расче-

Таблица 2

#### Определение несущей способности сечения (ШЗ-Д)

Класс бетона	Армирование	Площадь сжатого бетона $A_b$ , $\text{мм}^2$	Статический момент сжатой зоны бетона $S_b$ , $\text{мм}^3$	Несущая способность сечения, кН·м
B40	44 $\varnothing 3$ Br1500	16 526,08	2 324 583	38,04
B55	44 $\varnothing 3$ Br1500	12 707,83	1 909 425	43,33

Таблица 3  
Результаты расчета (ШЗ-Д 4×10)

Ряд	Площадь сечения $i$ -го ряда проволок $A_{si}$ , $\text{мм}^2$	Рабочая вы- сота $i$ -го слоя, мм	$\xi_i = \frac{x}{h_0}$	$\sigma_{si}$ , МПа	$\sigma_{si} A_{si}$ , Н	$\sigma_{si} A_{si}(h_{01} - h_{0i})$ , Н·мм
Класс бетона по прочности В40, $x = 68,94$ мм						
1	157 (2Ø10)	153	0,4500	1081,79	169 841,57	0
2	157 (2Ø10)	67	1,0276	736,58	115 643,54	9 945 344
<i>Суммарные значения</i>						
Класс бетона по прочности В55, $x = 55,39$ мм						
1	157 (2Ø10)	153	0,3621	1 103,48	173 245,89	0
2	157 (2Ø10)	67	0,8269	850,77	133 570,86	11 487 094
<i>Суммарные значения</i>						

Таблица 4

**Определение несущей способности сечения (ШЗ-Д 4×10)**

Класс бетона	Армирование	Площадь сжатого бетона $A_b$ , $\text{мм}^2$	Статический момент сжатой зоны бетона $S_b$ , $\text{мм}^3$	Несущая способность сечения, кН·м
B40	4Ø10 A1200K	12 976,6	1 539 922	23,93
B55	4Ø10 A1200K	10 227,23	1 287 895	27,15

там несущей способности и трещиностойкости шпал подтипов Ш-ДТБ 6×10 и Ш-ДТБ 10×7,5 [11] согласно общему методу расчета изгибаемых элементов по нормальным сечениям.

Результаты данных исследований могут иметь практический интерес для понимания работы железобетонных шпал и возможности увеличения действующих на них нагрузок.

**Список источников**

1. Савин А. В. Безбалластный путь. Москва : РАС, 2017. 192 с.
2. Ван Чжуан. Технология изготовления и свойства материала композиционных шпал (для условий Китая) : специальность 2.1.5 «Строительные материалы и изделия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ван Чжуан. Москва : МИИТ, 2021. 263 с.
3. Карпущенко Н. И., Труханов П. С. Проектирование и расчеты элементов верхнего строения железнодорожного пути : учебное пособие. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2016. 192 с.
4. Политехнический словарь / под редакцией И. И. Артоболевского. Москва : Советская энциклопедия, 1976. 565 с.
5. Esveld C. Modern Railway Track : monograph. 2<sup>nd</sup> Editon. Delft : MRT productions, 2001. 740 p.
6. Numerical method for evaluating the lateral resistance of sleepers in ballasted tracks / Y. Koike, T. Nakamura, K. Hayano [et al.] // Soils and Foundations. 2014. Vol. 54, Iss. 3. P. 502–514.
7. Kaewunruen S., Remennikov A. M. Dynamic flexural influence on a railway concrete sleeper in track system due to a single wheel impact // Engineering failure analysis. 2009. Vol. 16, Iss. 3. P. 705–712.
8. Железобетонные шпалы для рельсового пути / А. Ф. Золотарский, Б. А. Евдокимов, Н. М. Исаев [и др.] ; под редакцией А. Ф. Золотарского. Москва : Транспорт, 1980. 270 с.
9. Габрусенко В. В. Аварии, дефекты и усиление железобетонных и каменных конструкций в вопросах и ответах. Москва : АСВ, 2018. 104 с.
10. Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов (к СНиП 2.03.01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции») / НИИЖБ Госстроя СССР и ЦНИИпромзданий Госстроя СССР. Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 64 с.
11. Инструкция по ведению шпального хозяйства с железобетонными шпалами : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 22.08.2022 № 2183р.

## **References**

1. Savin A. V. The Ballastless way. Moscow: RAS; 2017. 192 p. (In Russ.).
2. Wang Zhuang. Manufacturing technology and material properties of composite sleepers (for Chinese conditions). Dissertation of the Candidate of Engineering. 2.1.5 Building materials and products. Wang Chuang. Moscow: Russian University of Transport; 2021. 263 p. (In Russ.).
3. Karpushchenko N. I., Trukhanov P. S. Design and calculations of elements of the upper structure of the railway track. Textbook. Novosibirsk: Publishing house of Siberian Transport University; 2016. 192 p. (In Russ.).
4. Artobolevskiy I. I., editor. Polytechnic Dictionary. Moscow: Soviet Encyclopedia; 1976. 565 p. (In Russ.).
5. Esveld C. Modern Railway Track. 2<sup>nd</sup> Editon: monograph. Delft: MRT productions; 2001. 740 p.
6. Koike Y., Nakamura T., Hayano K. [et al.]. Numerical method for evaluating the lateral resistance of sleepers in ballasted tracks. *Soils and Foundations*. 2014;54(3):502–514.
7. Kaewunruen S., Remennikov A. M. Dynamic flexural influence on a railway concrete sleeper in track system due to a single wheel impact. *Engineering Failure Analysis*. 2009;16(3):705–712.
8. Zolotarsky A. F., Evdokimov B. A., Isaev N. M. [et al.]. Edited by A.F. Zolotarsky. Reinforced concrete sleepers for a rail track. Moscow: Transport; 1980. 270 p. (In Russ.).
9. Gabrusenko V. V. Accidents, defects and reinforcement of reinforced concrete and stone structures in questions and answers. Moscow: DIA; 2018. 104 p. (In Russ.).
10. Handbook on the design of prestressed reinforced concrete structures made of heavy and light concrete (to SNiP 2.03.01-84 Concrete and reinforced concrete structures). Research Institute of Reinforced Concrete of the USSR Gosstroy and Central Research Institute of Industrial Buildings of the USSR Gosstroy. Moscow: TsITP Gosstroy of the USSR; 1986. 64 p. (In Russ.).
11. Instructions for maintaining a sleeper farm with reinforced concrete sleepers. Approved by order of Russian Railways dated 22.08.2022 No. 2183r. (In Russ.).

## **Информация об авторах**

*Н. С. Пичкурова* – доцент кафедры «Здания, строительные конструкции и материалы» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

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

## **Information about the authors**

*N. S. Pichkurova* – Associate Professor of the Buildings, Construction Structures and Materials Department, Siberian Transport University, Candidate of Engineering.

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

Статья поступила в редакцию 20.08.2024; одобрена после рецензирования 23.08.2024; принята к публикации 26.08.2024.

The article was submitted 20.08.2024; approved after reviewing 23.08.2024; accepted for publication 26.08.2024.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.011

doi 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_79

### Прогнозирование глубины забивки нагеля крестообразного сечения огнестрельным методом

**Анатолий Михайлович Попов<sup>1✉</sup>, Владимир Николаевич Шведов<sup>2</sup>,  
Владимир Борисович Зиновьев<sup>3</sup>, Сергей Иванович Герасимов<sup>4</sup>**

<sup>1,3,4</sup> Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> 47604@mail.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup> mdk@sibstrin.ru

<sup>3</sup> vbtzinoviev@mail.ru

<sup>4</sup> gerasimov@stu.ru

**Аннотация.** Целью данной работы является выбор оптимальной формы заточки нагелей, предназначенных для огнестрельной забивки, и разработка методики оценки и прогнозирования глубины забивки нагеля крестообразного поперечного сечения при помощи монтажного пистолета. Обе задачи решались на основе экспериментальных данных, полученных при многократном забивании нагелей с помощью модифицированного строительного пистолета ПЦ 52-1. В первом случае за критерий оптимальной формы заточки принимались плотность посадочного гнезда, получаемого после забивки нагеля, и технологичность процесса его заточки. При проведении экспериментов было забито большое количество нагелей крестообразного сечения с самой различной заточкой, а также ранее известных нагелей, таких как нагель Н. Ф. Котова. Проведенные исследования показали, что наиболее подходящим для огнестрельной забивки является нагель крестообразного сечения с ножевой конической заточкой. Прогнозирование глубины забивки опиралось на экспериментальные данные, полученные при огнестрельном забивании нагелей различных поперечных размеров в брус из древесины сосны поперечным сечением 10 на 15 см, расположенный на бетонном основании. При этом изучалась зависимость глубины забивки от мощности патрона и влажности древесины бруса. Для прогнозирования глубины забивки предложено использовать экспоненциальную аппроксимацию зависимости глубины забивки от поперечных размеров нагеля. Данное предложение хорошо подтверждается экспериментальными результатами. Определены константы, характеризующие быстроту уменьшения глубины забивки для патронов Д-1 при забивании в древесину сосны влажности 25 % и для патронов Д-2 при забивании в древесину сосны влажности 15 %.

**Ключевые слова:** экспериментальные методы, нагельные соединения, строительные конструкции из дерева и пластмасс, экспоненциальная аппроксимация

**Для цитирования:** Прогнозирование глубины забивки нагеля крестообразного сечения огнестрельным методом / А. М. Попов, В. Н. Шведов, В. Б. Зиновьев, С. И. Герасимов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 79–86. DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_79.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

### Predicting the depth of cross-sectional dowel driving by fire method

**Anatoliy M. Popov<sup>1✉</sup>, Vladimir N. Shvedov<sup>2</sup>, Vladimir B. Zinov'yev<sup>3</sup>, Sergey I. Gerasimov<sup>4</sup>**

<sup>1,3,4</sup> Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> 47604@mail.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup> mdk@sibstrin.ru

<sup>3</sup> vbtzinoviev@mail.ru

<sup>4</sup> gerasimov@stu.ru

**Abstract.** The purpose of this work is to select the optimal shape for sharpening dowels intended for fire driving and to develop a methodology for assessing and predicting the depth of driving a dowel of a cross-shaped cross-section using mounting guns. Both problems were solved on the basis of experimental data obtained from

repeated driving of dowels using a modified PC 52-1 construction gun. In the first case, the density of the seating socket obtained after driving the dowel and the manufacturability of the dowel sharpening process were taken as the criterion for the optimal sharpening shape. During the experiments, a large number of cross-section dowels with a wide variety of sharpenings were driven in, as well as previously known dowels, such as the dowel of N. F. Kotov. The conducted studies showed that the most suitable for fire hammering is a cross-section dowel with a knife conical sharpening. Predicting the driving depth was based on experimental data obtained by shooting dowels of various transverse sizes into pine wood beams with a cross section of 10 by 15 cm, located on a concrete base. At the same time, the dependence of driving depth on the power of the cartridge and the moisture content of the timber was studied. To predict the driving depth, it is proposed to use an exponential approximation of the dependence of the driving depth on the transverse dimensions of the dowel. This proposal is well supported by experimental results. Constants have been determined that characterize the speed of reduction in driving depth for D-1 cartridges when driving 25 % moisture content into pine wood and for D-2 cartridges when driving 15% moisture content into pine wood.

**Keywords:** experimental methods, dowel joints, building structures made of wood and plastics, exponential approximation

**For citation:** Popov A. M., Shvedov V. N., Zinoviev V. B., Gerasimov S. I. Predicting the depth of cross-sectional dowel driving by fire method. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):79–86. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_79.

## Введение

При изготовлении строительных конструкций из древесины практически всегда возникает необходимость соединения отдельных элементов. Для этой цели широко применяют металлические или полимерные нагели круглого поперечного сечения, для установки которых необходимо предварительно просверлить отверстия в соединяемых элементах [1, 2]. Это соединение достаточно изучено как численно [3, 4], так и экспериментально [5, 6], однако оно имеет существенные недостатки, такие как высокая трудоемкость и высокие требования к точности изготовления деталей.

В настоящее время с целью снижения трудоемкости монтажа и ремонта конструкций из древесины внедряется огнестрельная забивка нагелей крестообразного сечения с помощью монтажных пистолетов. Так как огнестрельный способ установки нагелей не требует дополнительных источников энергии, он может быть особенно эффективен при проведении строительных работ в труднодоступных районах [7–9].

Метод фотоупругих покрытий [10–12] в работе [13] применен для изучения деформированного состояния поверхности древесины соединяемого элемента вблизи нагруженного нагеля крестообразного сечения. Следует отметить, что модуль упругости обычно применяемого фотоупругого покрытия на порядок выше модулей упругости древесины в тангенциальном и радиальном направлениях. Поэтому фотоупругое покрытие значительно изменяет деформированное состояние поверхностного слоя древесины [13] и полученные результаты недостаточно точно описывают реальное деформи-

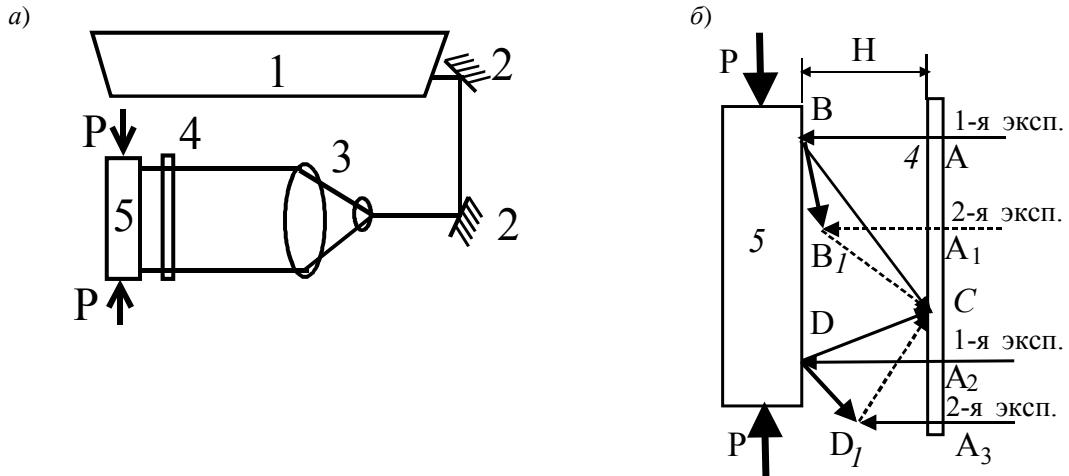
рованное состояние. При записи голограмм во встречных пучках [14–15] не происходит подкрепления поверхностного слоя, следовательно, методики на их основе наиболее подходят для изучения деформированного состояния изделий из древесины.

Схема записи голограмм во встречных пучках представлена на рис. 1, а, а на рис. 1, б схематически изображены оптические пути лучей, формирующих голограмму. На рис. 1, б ход лучей во время первой и второй экспозиции обозначены как 1-я эксп. и 2-я эксп. соответственно. Так как при записи голограмм во встречных пучках регистрируется объемная интерференционная картина, то используются фотопластинки с толстой регистрирующей средой.

При записи голограммы используется толстая регистрирующая среда, в которой записывается пространственная интерференционная картина. При восстановлении голограммы свет, отраженный ею, возникает вследствие дифракции на решетках, нормальных к поверхности регистрирующей среды. Разность частот этих решеток, записанных во время первой и второй экспозиции, определяется разностью хода лучей, отраженных поверхностью. На рис. 1, б это ломаные  $ABC$  и  $A_1B_1C$ . Найдя оптическую разность длин этих ломаных, можно получить уравнения, которые описывают положение интерференционных полос, наблюдавшихся в отраженном свете при условии, что при записи голограмм регистрирующая среда освещалась по нормали к ее поверхности:

$$U_B \cos \alpha + V_B \cos \beta + W_B (1 + \cos \gamma) = N\lambda, \quad (1)$$

где  $U_B$ ,  $V_B$ ,  $W_B$  – компоненты вектора перемещения наблюдаемой точки вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .



*Рис. 1.* Регистрация голограмм во встречных пучках:  
а – принципиальная схема; б – схема хода оптических лучей при записи голограмм;  
1 – источник когерентного света; 2 – зеркало; 3 – коллиматор; 4 – фотопластинка; 5 – изучаемый объект

соответственно, оси  $x$  и  $y$  расположены в плоскости регистрирующей среды;  $\cos \alpha$ ,  $\cos \beta$ ,  $\cos \gamma$  – направляющие косинусы направления наблюдения;  $N$  – порядок полосы;  $\lambda$  – длина световой волны лазера, использованного при записи голограммы.

Свет, проходящий сквозь голограмму, дифрагирует на решетках, расположенных в плоскости регистрирующей среды. Их частота определяется как разность хода отраженных лучей, формирующих опорный луч (ломанные  $A_2DC$  и  $A_3D_1C$ ) и объектный луч (ломанные  $ABC$  и  $A_1B_1C$ ) на рис. 1, б. В этом случае положение полос на интерференционной картине определяется выражением

$$U_B \cos \alpha + V_B \cos \beta + W_B (1 + \cos \gamma) - [U_D \cos \alpha_R + V_D \cos \beta_R + W_D (1 + \cos \gamma_R)] = N\lambda, \quad (2)$$

где  $U_D$ ,  $V_D$ ,  $W_D$  – проекции на оси координат вектора перемещения точки, создающей опорную волну;  $\alpha_R$ ,  $\beta_R$ ,  $\gamma_R$  – углы между направлением максимума индикаторы рассеяния исследуемой поверхности и осями координат.

Для плоских поверхностей индикаторика рассеяния направлена по нормали к изучаемой поверхности; приняв, что  $W_B = W_D$ , уравнение, связывающее положение полос с перемещениями в проходящем свете, принимает вид

$$U_B \cos \alpha + V_B \cos \beta + W_B (1 - \cos \gamma) = N\lambda. \quad (3)$$

В работах [14, 15] предложена методика определения допустимого расстояния между крестообразными нагелями при огнестрельной забивке. Для этого на поверхность деревянного бруса наносился металлизированный растр. Записывалась голограмма в две экспозиции вблизи растра: до и после забивания нагеля. При восстановлении голограмм регистрировались картины полос в плюс первом и минус первом проходящих порядках дифракции. Из (3) следует, что проекция вектора перемещения на направление волокон древесины определяется выражением

$$U_B = \frac{(N_1 - N_2)\lambda}{2 \cos \alpha}. \quad (4)$$

Если построить эпюры перемещений в близких сечениях, то можно, допустив линейное приближение компоненты сдвиговой деформации между сечениями, определить величину сдвиговой деформации выражением

$$\frac{dU}{dy} = \frac{\Delta N \lambda}{2 d \cos \alpha}, \quad (5)$$

где  $\cos \Delta N$  – разность разностей порядков полос вдоль этих сечений;  $d$  – расстояние между сечениями.

Прологарифмировав уравнение (5), получим

$$\ln \frac{dU}{dy} = \ln \Delta N + \ln \frac{\lambda}{2 d \cos \alpha}. \quad (6)$$

В выражении (6) второе слагаемое в правой части – величина постоянная, следовательно, быстрота изменения  $\ln \Delta N$  совпадает со скоростью изменения сдвиговой деформации и допустимое расстояние между нагелями предлагается определять по быстроте убывания  $\ln \Delta N$ .

### Материалы и методы исследования

Монтажный пистолет, предназначенный для забивки нагеля, был модифицирован. Он был дополнен наконечником и направляющим устройством для нагеля. Пистолет с внесенными изменениями и нагелем представлен на рис. 2.

Одной из задач, возникшей при разработке методики огнестрельной забивки нагелей, стал выбор профиля заточки ребер нагеля. На рис. 3 приведены некоторые из видов нагелей, опробованные авторами. Чтобы выбрать оптимальную форму заточки, нагели различной заточки заби-

вали в массив древесины, затем ее распиливали и визуально оценивали плотность посадочного гнезда. На рис. 4 приведены фотографии гнезд, полученных при забивке нагелей различной формы и заточки. При выборе формы оптимальной заточки нагелей также учитывалась технологичность заточки. При сравнении результатов, полученных при многократной забивке различных нагелей, выяснилось, что наиболее применимым для огнестрельной забивки является нагель крестообразного сечения с «ножевой» конической заточкой (рис. 4, а). Для сравнения



Рис. 2. Пистолет ПЦ 52-1 с изменениями

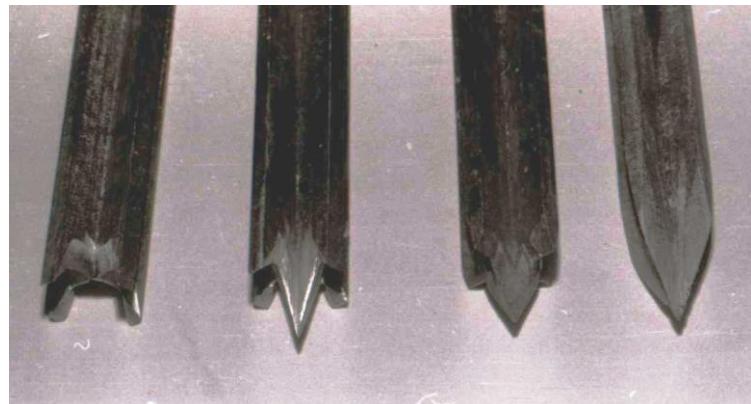


Рис. 3. Нагели различной формы и заточки



Рис. 4. Разрез по нагельному гнезду:  
а – крестообразный нагель; б – нагель Н. Ф. Котова



на рис. 4, б приведен разрез посадочного гнезда нагеля Н. Ф. Котова. Видно, что при забивании этого нагеля происходит излом волокон древесины вблизи нагельного гнезда.

Нагели крестообразного сечения для проведения экспериментов изготавливали на фрезерном станке из стали 40Х круглого сечения. У всех стержней толщина ребер составляла 3 мм. После затачивания нагели подвергались термической закалке.

Исследовалось влияние влажности древесины и поперечного размера нагеля на глубину забивания. Во всех случаях производилось забивание нагеля в брус из древесины сосны поперечным размером  $10 \times 15$  см. При этом брус размещался на бетонном основании. В проведении эксперимента участвовали два человека. Один производил выстрел, второй с помощью отвеса контролировал вертикальность пистолета. Измерялась длина нагеля до выстрела и длина части нагеля, выступающей над древесиной, после забивки. Разность этих величин считалась глубиной забивания. Каждый тип испытаний проводился минимум пять раз. Если после выстрела были получены результаты, отличающиеся от средних более чем на 10 %, то они считались ошибочными и производилась повторная забивка.

Для забивки нагелей применялись патроны для строительно-монтажных пистолетов калиб-

ра 5,6 мм двух типоразмеров: с маркировкой Д – длинные и К – короткие.

### Результаты исследования

В таблице приведены средние значения по результатам пяти выстрелов для различных сочетаний размеров нагеля, влажности древесины и мощности патрона. Величина хода поршня пистолета не позволяла забивать нагели с поперечным размером 10 и 12 мм патронами Д3 и Д4.

Для прогнозирования глубины забивки нагеля было выдвинуто предположение об экспоненциальной зависимости глубины забивания  $S$  от поперечных размеров полок нагеля  $H$ :

$$S = S_0 e^{-\frac{H}{\lambda}}, \quad (7)$$

где  $S_0$  – константа, величина которой определяется условиями забивания нагеля;  $\lambda$  – переменная, характеризующая быстроту уменьшения глубины забивки.

Экспериментальные результаты приведены на рис. 5.

На рис. 5 вдоль оси абсцисс отложен натуральный логарифм глубины забивки нагеля в миллиметрах, вдоль оси ординат – поперечный размер нагеля. Прямая 1 построена по среднегарифмическими данным, полученным при забивании нагеля патроном Д1 в брус с относительной влажностью 25 %. Прямая 2 также по-

Глубина внедрения нагеля за один выстрел, мм

Поперечный размер нагеля, мм	Влажность древесины и используемый патрон						
	8 %, К4	8 %, Д3	8 %, Д4	15 %, К4	15 %, Д2	25 %, К4	25 %, Д1
22	–	60	80	–	47	–	30
16	–	71	100	–	63	–	55
12	55	–	–	60	102	70	82
10	70	–	–	8,5	–	97	105

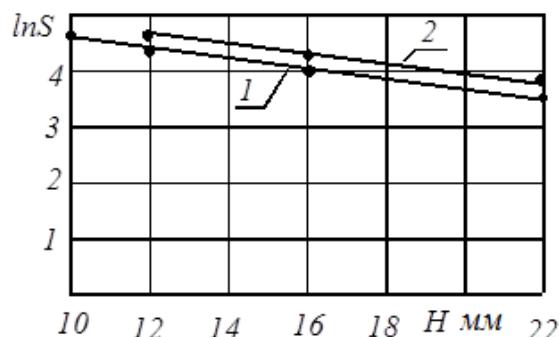


Рис. 5. Эпюры логарифма глубины забивки

строена по экспериментальным данным, вычисленным в ходе обработки результатов, полученных при забивании нагеля с использованием патронов Д2 в брус влажностью 15 %. На рис. 5 видно, что эпюры глубины забивки хорошо аппроксимируются прямыми, а это подтверждает допустимость сделанного предположения. Также на рисунке отражено, что это две параллельные прямые, следовательно, можно предположить, что быстрота уменьшения глубины забивки не зависит от влажности и мощности патрона. В нашем случае она составила 9,5 мм. Зависимость глубины забивки от влажности древесины и мощности патронов скрыта в параметре  $S_0$ . При влажности древесины 25 % и использовании патрона Д1 величина параметра  $S_0$  составила 300 мм, а при влажности 15 % и использовании патрона Д2 – 360 мм.

## Выводы

Исследованы особенности реализации перспективной методики соединения деревянных элементов строительных конструкций с использованием огнестрельного метода забивки нагелей.

Проведенные испытания показали, что наиболее применимым для огнестрельной забивки является нагель крестообразного сечения с ножевой конической заточкой. Установлено, что глубина забивки нагеля экспоненциально уменьшается с увеличением его попечерных размеров. Определена быстрота уменьшения глубины забивки.

Полученные результаты позволяют предварительно выбрать нужную мощность патрона, что исключает необходимость добивания нагеля или разрушения соединения.

## Список источников

1. Зиннуров Т. А., Новицкий Е. В. Определение прогиба составных деревянных элементов, армированных полимеркомпозитными нагелями // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18, № 5. С. 697–708.
2. Животов Д. А., Тилинин Ю. И., Пищалов Ю. В. Совершенствование конструкций стропильных систем реконструируемых исторических зданий // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 4 (57). С. 112–120.
3. Жилкин В. А. Исследование деформированного состояния цилиндрического нагеля в симметричном двухрезном соединении пластин из древесины // Вестник Челябинской государственной агронженерной академии. 2015. Т. 71. С. 29–41.
4. Жилкин В. А. Численное исследование деформированного состояния цилиндрического нагеля в симметричном двухрезном соединении пластин из древесины // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 7 (715). С. 31–42.
5. Экспериментальное определение допустимых расстояний между нагелями в древесине / А. М. Попов, В. Б. Зиновьев, Л. И. Ким, Л. А. Сподарева // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2012. № 28. С. 160–167.
6. Попов А. М., Зиновьев В. Б., Шведов В. Н. Анализ деформированного состояния элементов мостовых конструкций в зоне контакта с нагелями круглого сечения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 2. С. 101–104.
7. Столповский Г. А., Жаданов В. И., Руднев И. В. Соединение элементов деревянных конструкций быстровозводимых зданий и сооружений винтовыми крестообразными нагелями // Вестник Оренбургского государственного университета. 2010. № 5 (111). С. 150–154.
8. Жаданов В. И., Аркаев М. А., Столповский Г. А. Усиление деревянных конструкций с использованием витых крестообразных стержней // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 5. С. 25–31.
9. Изгибающие конструкции, усиленные с использованием витых крестообразных стержней / В. И. Жаданов, М. А. Аркаев, И. В. Руднев, Д. А. Украинченко // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 5. С. 5–12.
10. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. Москва : Наука, 1973. 576 с.
11. Дмитриев П. А., Жилкин В. А., Стрижаков Ю. Д. Исследование смятия древесины в отверстии с помощью оптически чувствительных покрытий // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1971. № 2. С. 18–24.
12. Ахметзянов М. Х., Жилкин В. А. Особенности исследования анизотропных задач методом фотоупругих покрытий // Строительная механика и расчет сооружений. 1970. С. 216.

13. Особенности расстановки витых стержней в узловых сопряжениях деревянных конструкций / Г. А. Столповский, В. И. Жаданов, М. А. Аркаев, В. Б. Зиновьев // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 5 (665). С. 91–97.
14. Зиновьев В. Б., Шведов В. Н., Попов А. М. О расстановке нагелей крестообразного сечения в соединении деревянных элементов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 3. С. 127–131.
15. Попов А. М., Зиновьев В. Б., Шведов В. Н. Анализ деформированного состояния элементов мостовых конструкций в зоне контакта с нагелями крестообразного сечения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 2. С. 101–104.

## Reference

1. Zinnurov T. A., Novitsky E. V. Determination of the deflection of composite wooden elements reinforced with polymer-composite dowels. *Vestnik of Moscow State University of Civil Engineering*. 2023;18(5):697–708. (In Russ.).
2. Zhivotov D. A., Tilinin Yu. I., Pishchalov Yu. V. Improving the designs of truss systems of reconstructed historical buildings. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2023;(57):112–120. (In Russ.).
3. Zhilkin V. A. Study of the deformed state of a cylindrical dowel in a symmetrical double-shear connection of wood plates. *Bulletin of the Chelyabinsk State Agricultural Engineering Academy*. 2015;71:29–41. (In Russ.).
4. Zhilkin V. A. Numerical study of the deformed state of a cylindrical dowel in a symmetrical two-shear connection of wood plates. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2018;(715):31–42. (In Russ.).
5. Popov A. M., Zinovyev V. B., Kim L. I., Spodareva L. A. Experimental determination of permissible distances between dowels in wood. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2012;(28):160–167. (In Russ.).
6. Popov A. M., Zinovyev V. B., Shvedov V. N. Analysis of the deformed state of elements of bridge structures in the contact zone with round cross-section dowels. *Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East*. 2013;(2):101–104. (In Russ.).
7. Stolpovskiy G. A., Zhadanov V. I., Rudnev I. V. Connecting elements of wooden structures of prefabricated buildings and structures with screw cross-shaped dowels. *Bulletin of Orenburg State University*. 2010;(111):150–154. (In Russ.).
8. Zhadanov V. I., Arkaev M. A., Stolpovskiy G. A. Strengthening wooden structures using twisted cruciform rods. *Industrial and Civil Construction*. 2017;(5):25–31. (In Russ.).
9. Zhadanov V. I., Arkaev M. A., Rudnev I. V., Ukrainianchenko D. A. Bendable structures reinforced using twisted cruciform rods. *Industrial and Civil Construction*. 2021;(5):5–12. (In Russ.).
10. Aleksandrov A. Ya., Akhmetzyanov M. Kh. Polarization-optical methods of mechanics of a deformable body. Moscow: Nauka; 1973. 576 p. (In Russ.).
11. Dmitriev P. A., Zhilkin V. A., Strizhakov Yu. D. Study of wood collapse in a hole using optically sensitive coatings. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1971;(2):18–24. (In Russ.).
12. Akhmetzyanov M. Kh., Zhilkin V. A. Peculiarities of studying anisotropic problems by the method of photoelastic coatings. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 1970. P. 216. (In Russ.).
13. Stolpovskiy G. A., Zhadanov V. I., Arkaev M. A., Zinovyev V. B. Features of the arrangement of twisted rods in the nodal joints of wooden structures. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2014;(665):91–97. (In Russ.).
14. Zinovьев V. B., Shvedov V. N., Popov A. M. On the arrangement of cross-section dowels in the connection of wooden elements. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2012;(3):127–131. (In Russ.).
15. Popov A. M., Zinovьев V. B., Shvedov V. N. Analysis of bridge elements deformed state in the contact zone with cross-sectional dowels. *Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East*. 2013;(2):101–104. (In Russ.).

## Информация об авторах

- А. М. Попов** – заведующий кафедрой «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.
- В. Н. Шведов** – доцент кафедры «Металлические и деревянные конструкции» Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета, кандидат технических наук, доцент.
- В. Б. Зиновьев** – доцент кафедры «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент.
- С. И. Герасимов** – заведующий кафедрой «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.

#### ***Information about the authors***

*A. M. Popov* – Head of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.

*V. N. Shvedov* – Associate Professor of the Metal and Wooden Structures Department, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Candidate of Engineering, Associate Professor.

*V. B. Zinovyev* – Associate Professor of the Department of Theoretical Mechanics, Siberian Transport University, Candidate of Engineering, Associate Professor.

*S. I. Gerasimov* – Head of the Structural Mechanics Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering, Professor.

Статья поступила в редакцию 05.07.2024; одобрена после рецензирования 07.08.2024; принята к публикации 30.08.2024.

The article was submitted 05.07.2024; approved after reviewing 07.08.2024; accepted for publication 30.08.2024.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.21

doi 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_87

### Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния поврежденных ферм железнодорожного моста

Тимофей Михайлович Баранов<sup>1✉</sup>, Дамир Альфридович Зайнагабдинов<sup>2</sup>,  
Андрей Андреевич Забияка<sup>3</sup>, Иван Анатольевич Фетисов<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

<sup>4</sup> Иркутский филиал Центральной дирекции диагностики и мониторинга инфраструктуры – филиал ЦДИ ОАО «РЖД», мостоиспытательная станция № 27, Иркутск, Россия

<sup>1</sup> baranov\_tm@irgups.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup> damirmt@mail.ru

<sup>3</sup> 89247167007@mail.ru

<sup>4</sup> rcdm\_fetisovia@esrr.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты обследований и испытаний железнодорожного моста с пролетными строениями из сквозных главных ферм расчетной длиной 66 м после проведения работ по замене вышедшего из строя элемента верхнего пояса. Свойство живучести пролетного строения, заключающееся в пространственном перераспределении усилий между неповрежденными элементами, и избыточная прочность элементов по отношению к обращающимся нагрузкам позволили предотвратить прогрессирующее обрушение пролетного строения и даже некоторое время пропускать поезда по Транссибу. В статье экспериментально исследуются факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние ферм. Предварительное обследование проводилось при помощи метода лазерного сканирования, по результатам которого создано облако точек, охватывающее все конструкции опор и пролетного строения. Испытания осуществлялись под проходящими нагрузками. При испытаниях контролировались прогибы ферм, вертикальные осадки опорных частей и фибровые напряжения некоторых элементов пролетного строения. Установлено, что пролетное строение имеет нарушения своей геометрии в виде наклонов вертикальных элементов с отклонением до 110 мм, перекосы точек опирания до 18 мм по высоте. Испытания показали сложное напряженно-деформированное состояние конструкции и неравномерное распределение напряжений по элементам фермы, отличающееся от классически принятых расчетных предпосылок: многие элементы фермы работают на сжатие с изгибом, а вклад напряжений изгиба превышает вклад осевых напряжений. Если общие прогибы двух ферм друг от друга практически не отличаются, то фибровые напряжения элементов крайних панелей на 70 % могут состоять из деформаций изгиба и больше свойственны поясам фермы. Зафиксированы неравномерные осадки опорных частей под нагрузкой, с разницей более чем в два раза. В статье сделаны выводы и предположения о факторах, послуживших причинами выхода из строя несущих элементов.

**Ключевые слова:** железнодорожные мосты, металлические фермы, испытания конструкций, напряженно-деформированное состояние, тензометрия, обследование мостов

**Для цитирования:** Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния поврежденных ферм железнодорожного моста / Т. М. Баранов, Д. А. Зайнагабдинов, А. А. Забияка, И. А. Фетисов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 87–99. DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_87.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

### Experimental stress-strain state research of damaged railway bridge trusses

Timofey M. Baranov<sup>1✉</sup>, Damir A. Zainagabdinov<sup>2</sup>, Andrey A. Zabiyska<sup>3</sup>, Ivan A. Fetisov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Irkutsk Transport University, Irkutsk, Russia

<sup>4</sup> Irkutsk Branch of the Central Directorate of Diagnostics and Monitoring of Infrastructure – Branch of the Central Directorate of Infrastructure of Russian Railways, Bridge Testing Station No. 27, Irkutsk, Russia

<sup>1</sup> baranov\_tm@irgups.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup> damirmt@mail.ru

<sup>3</sup> 89247167007@mail.ru

<sup>4</sup> rcdm\_fetisovia@esrr.ru

**Abstract.** The article presents the results of surveys and tests on a railway bridge with spans of through main trusses, with an estimated length of 66 meters, after replacing a failed element in the upper belt. The survivability of the superstructure, due to the spatial redistribution of forces between the intact elements and the excess strength of the components in relation to the applied loads, has made it possible to prevent a progressive collapse of the structure and even allow trains to continue operating on the Trans-Siberian railway for a period of time. The article experimentally investigates the factors that influence the stress-strain state of truss structures. The preliminary examination was conducted using the laser scanning technique, which resulted in the generation of a point cloud that covered all the structures of the supports and superstructure. The tests were conducted under passing loads. During the tests, the deflections of the trusses, the vertical displacement of the support parts, and the fiber stresses of certain elements of the superstructure were monitored. It was found that the superstructure had geometric deviations in the form of tilts of vertical elements up to 110 mm and misalignments of support points up to 18 mm in height. The tests revealed a complex stress-strain state of the structure and an uneven distribution of stress across the truss elements, which deviated from the traditionally assumed design assumptions. Many truss elements were working in compression with bending, with bending stresses exceeding axial stresses. While the overall deflections of both trusses were similar, the fiber stresses in the elements of extreme panels consisted of bending deformations up to 70 %, more typical of truss belts. Uneven settlement of the supporting structures under load was observed, with a difference in settlement of more than two times. Based on this observation, the article draws conclusions about the factors that may have caused the failure of the load-bearing components.

**Keywords:** railway bridges, metal trusses, structural testing, stress-strain state, strain measurement, bridge inspection

**For citation:** Baranov T. M., Zainagabdinov D. A., Zabiyaka A. A., Fetisov I. A. Experimental stress-strain state research of damaged railway bridge trusses. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):87–99. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2024\_70\_87.

## Введение

Работа пролетных строений мостов после деформаций элементов от ударов связана с вопросами живучести – способности выполнять пропуск подвижного состава в условиях повреждений элементов. Если рассматривать мостовое сооружение как сложную техническую систему, то к ней применимы методологические подходы к изучению, управлению и повышению его живучести [1]. В прил. 7 норм проектирования [2] под живучестью мостов понимается обеспеченность от прогрессирующего разрушения, и в продолжение исследований вопросов поведения конструкций в за-предельных состояниях проводятся работы по численному моделированию поведения поврежденных конструкций [3–5] и экспериментальному изучению их поведения. При повреждениях и краткой эксплуатации мостов с вышедшими или частично вышедшими из строя элементами происходит перераспределение напряженно-деформированного состояния, которое потенциально сохраняется после ремонтно-восстановительных работ.

Определение факторов, влияющих на перераспределение усилий по элементам после деформаций от ударов с последующим восстановлением поврежденных элементов, а также потенциальных рисков, связанных с этим перераспределением, является основной задачей проведенных экспериментальных исследований пролетного строения железнодорожного моста.

## Материалы и методы исследования

Исследование работы пролетного строения железнодорожного моста проводилось в октябре 2023 г. Мост металлический, пролетное строение из сквозных пространственных ферм с ездой понизу. В плане мост расположен на прямой, в профиле – по горизонтали. Полная длина моста 78,87 м, отверстие моста 64 м. Год ввода в эксплуатацию – 1914, год реконструкции – 1993. Схема моста 1 × 66,00 м. Расстояние между шкафными стенками устоев 67,29 м. Минимальное расстояние между осями соседних путей 25,2 м. При реконструкции было заменено пролетное строение металлической фермой, выполненной по типовому проекту серии 3.501.2-139 под нагрузку С-14. Опорные части катковые, мостовое полотно – на деревянных поперечинах. Фотография общего вида моста приведена на рис. 1.

5 сентября 2012 г. на этом пролетном строении был зафиксировано повреждение верхнего пояса правой фермы в панели В1-В2пр, связанное с разрывом продольных сварных швов коробчатого сечения элемента. Эксплуатирующей организацией были введены ограничения скорости, поставлены страховочные опоры и организовано круглосуточное наблюдение за состоянием поврежденной фермы.

Сотрудники кафедры мостов и транспортных тоннелей ИрГУПС провели обследование моста и испытания пролетного строения, а также расчеты грузоподъемности [5]. Испыта-



Рис. 1. Вид на железнодорожный мост

ния и расчеты показали, что около 3/4 нагрузки распределилось на неповрежденную левую ферму, а некоторые элементы (стойка Н2–В2, верхние связи между фермами) получили дополнительные напряжения при проезде нагрузки вследствие перекоса пролетного строения. Отклонение верха пролетного строения от вертикали составляло 60 мм в сторону поврежденной фермы. Позже поврежденный элемент верхнего пояса был заменен.

Перед проведением испытаний в октябре 2023 г. было выполнено обследование пролет-

ного строения, которое заключалось в измерении геометрического положения фермы и визуальном осмотре элементов.

Геодезические измерения проведены при помощи лазерного сканера Leica RTC360 (рис. 2).

1. Наклон пролетного строения измерялся вертикальностью стоек и составил 80–110 мм для правой фермы и 90–110 мм для левой фермы вправо сторону. Меньший наклон фермы наблюдался в 2012 г. после аварии пояса.

2. Плоскости опирания незагруженного подвижными нагрузками пролетного строе-

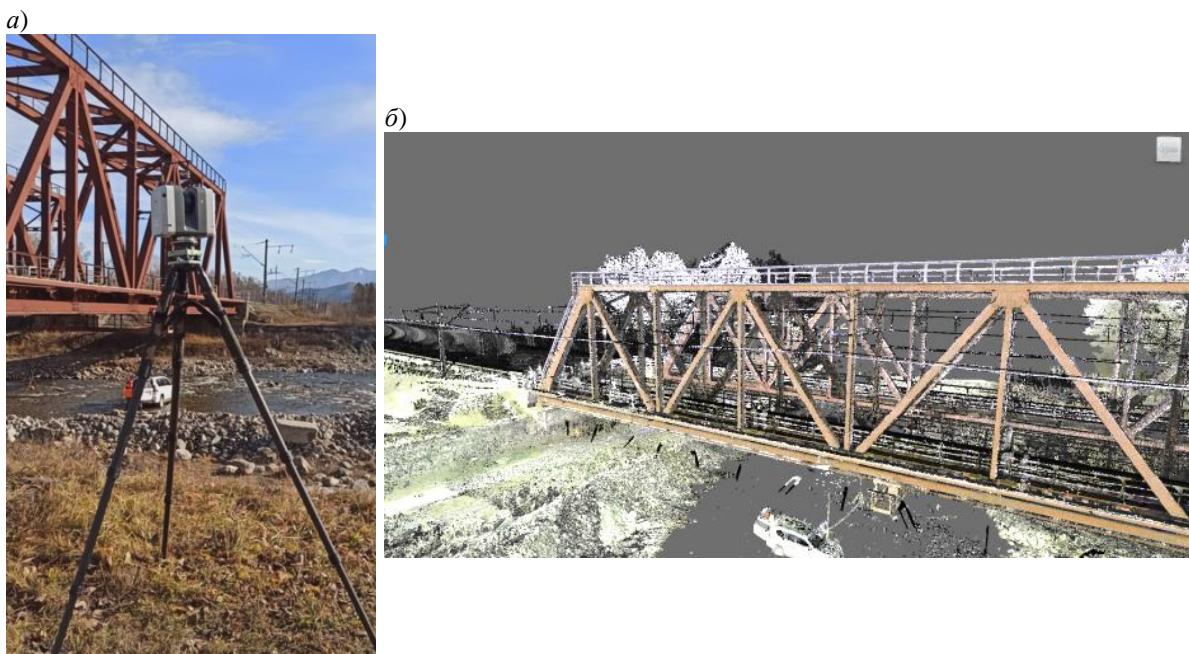


Рис. 2. Сканирование пролетного строения (а) и облако точек (б)

ния не лежат в единой плоскости, а пересекаются. Так, разница отметок между опорными узлами правой и левой фермы на опоре № 0 составляет 7 мм и опирание правой фермы выше; на опоре № 1 – 18 мм и опирание левой фермы выше. Получается, что пролетное строение установлено «винтом».

3. Эксцентризитет пути на мосту находится в диапазоне  $\pm 20$  мм.

Для оценки фактической работы пролетного строения железнодорожной фермы были проведены испытания под обращающейся нагрузкой.

Состав измерительного оборудования:

1) тензодатчики измерительной системы «Тензор МС» [6], установленные на элементы

фермы по два на каждый элемент с левой и правой стороны по средней линии элемента (рис. 3, а). Тензодатчики фиксировали напряжения в стальных элементах при проезде поездов;

2) автоматизированные прогибомеры на основе LVDT-датчиков оборудования ZetLab [7] с ценой деления 0,01 мм, расположенные под узлами Н4 левой и правой фермы в середине пролета (см. рис. 3, б). Дополнительно прогибомеры устанавливались на пояса фермы и опоры № 0 (см. рис. 3, в).

Перечень и расположение элементов фермы пролетного строения, в которых контролировались напряжения, приведены на рис. 4 и в табл. 1. В табл. 2 содержатся данные о проходящих в



*Rus. 3. Измерительное оборудование:  
а – съемные тензодатчики; б – прогибомеры в середине пролета; в – прогибомеры у опоры № 0*

момент испытания нагрузках. Всего было выполнено 20 замеров, для последующего анализа выбраны характерные участки тензограмм для сопоставления данных различных датчиков. При испытаниях получены средние и мгновенные значения напряжений в элементах, а также вертикальные деформации ферм.

С целью определения упругих вертикальных перемещений опорных частей на опоре № 0 автоматизированные прогибомеры были установлены на нижний пояс левой и правой ферм у опоры. Точка крепления прогибомера лежит на расстоянии 1,5 м от оси опирания ферм на опоре № 0.

#### Методы анализа полученных результатов

Классические подходы к измерениям напряжений в элементах ферм предусматривают установку минимум четырех тензодатчиков на каж-

дое сечение для получения наиболее полной информации о напряженно-деформированном состоянии элемента. В проведенном эксперименте, ввиду ограниченного количества тензодатчиков и времени проведения измерений, было принято решение об установке только двух тензодатчиков на каждое сечение элемента фермы, как показано на рис. 5. Такая схема размещения не позволяет зафиксировать изгибающие моменты в плоскости фермы и редуцирует их влияние на показания, но сохраняется возможность измерить осевое продольное напряжение в элементе фермы  $\sigma_x$  и долю влияния изгибающего момента по элементу из плоскости фермы по напряжениям каждого из датчиков  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Появление изгибающего момента в элементах можно оценить отношением  $\delta = \sigma_1/\sigma_2$ , при этом  $\sigma_x = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ .

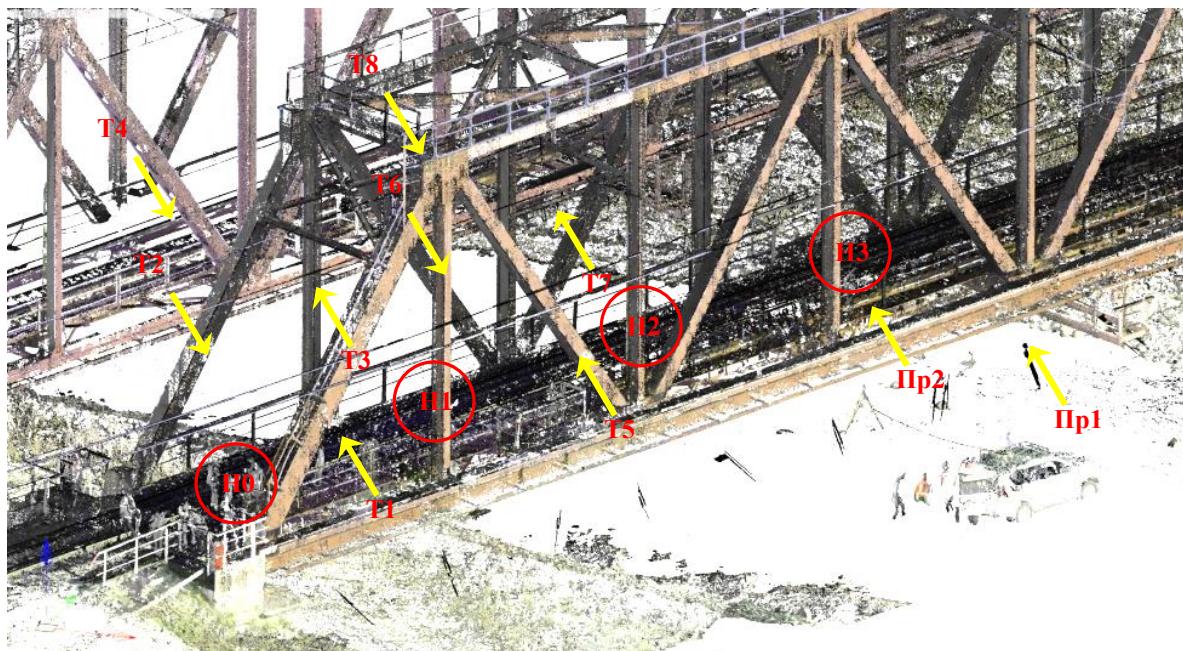


Рис. 4. Облако точек моста с указанием мест измерения напряженно-деформированного состояния элементов пролетного строения

Точки измерения на ферме

Таблица 1

Элемент	Номер точки измерения	
	Правая ферма	Левая ферма
H0-H1	T1	T2
H0-B1	T3	T4
H1-H2	T5	T6
B1-H2	T7	T8
H4	Пр1	Пр2

Таблица 2

## Характеристики проходящей нагрузки при испытаниях моста 25 октября 2023 г.

Номер измерения	Время прохождения головы состава (местное)	Качественная характеристика состава, находящегося на мосту в данный момент
1	12:17	Локомотив ЗЭС5К
2		Пиковая нагрузка от локомотива
3		Тяжелые вагоны
4	12:30	Вагоны
5	12:45	Локомотив ЗЭС5К
6		Вагоны (равномерная)
7		Вагоны (равномерная)
8	12:55	Локомотив
9		Вагоны при съезде с моста
10	13:04	Вагоны (равномерная)
11		Вагоны на съезде
12		Локомотив
13	13:22	Вагоны (равномерная)
14		Пиковая нагрузка от локомотива
15		Вагоны на съезде
16	14:05	Пиковая нагрузка от локомотива
17		Контейнеры
18	14:36	Вагоны (равномерная)
19		Вагоны на съезде
20	14:17	Вагоны (равномерная)

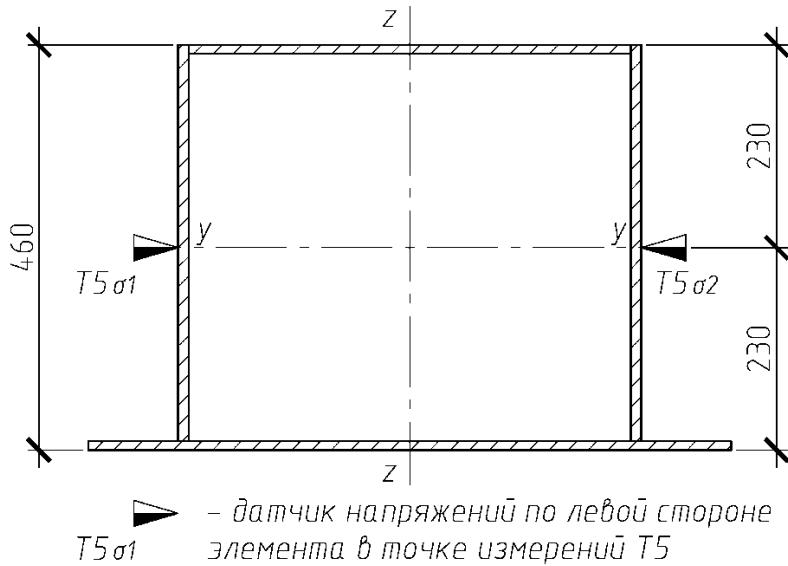


Рис. 5. Схема размещения датчиков напряжений на элементе пояса фермы

Отношения осевых напряжений от продольных сил в параллельных элементах левой и правой ферм пролетного строения характеризуются коэффициентом  $\chi_k$ , который можно однозначно измерить и вычислить отношением продольных напряжений в правой ферме к продольным напряжениям в левой ферме:  $\chi_k = \sigma_x^{\text{пр}} / \sigma_x^L$ .

Похожие решения применялись авторами [8] при оценке инвариантных параметров в

данных деформационного мониторинга железнодорожной фермы. При идеально равномерном распределении нагрузок между фермами коэффициент  $\chi_k = 1,0$ , однако существует множество факторов, меняющих это распределение (рис. 6). В Руководстве по определению грузоподъемности металлических пролетных строений [9] коэффициент отношения напряжений  $\chi_k$  классически связывают с эксцентризитетом пути относительно

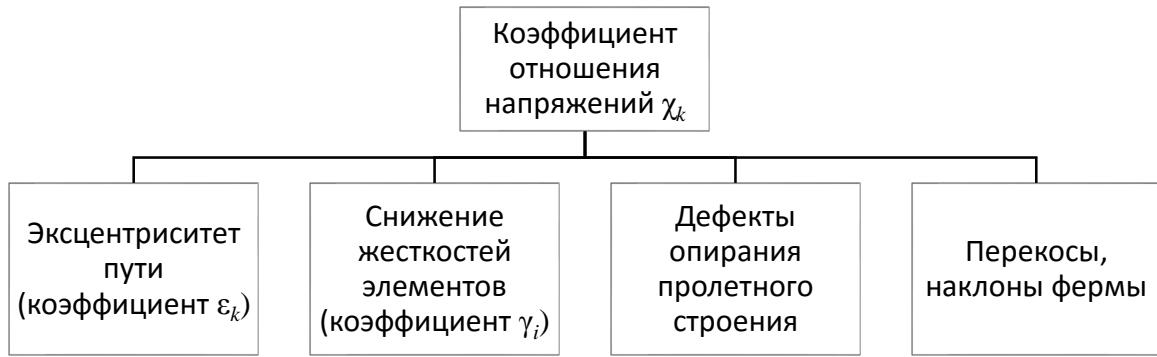


Рис. 6. Факторы неравномерного распределения усилий между фермами

оси пролетного строения  $\varepsilon_k$  и характеризуют долей вертикальной нагрузки от подвижного состава, приходящейся на одну балку (ферму) с учетом смещения оси пути относительно оси пролетного строения:

$$\varepsilon_k = 0,5 + \frac{e_{\text{ср}}}{b},$$

где  $e_{\text{ср}}$  – среднее смещение оси пути;  $b$  – расстояние между осями главных ферм.

Еще одним фактором, влияющим на перераспределение напряжений между фермами, является изменение общей жесткости одной из ферм вследствие повреждения элементов. Экспериментально это было показано при повреждении фермы через р. Бабху [5], других мостов [10] и теоретически обосновано в статье [4].

Дефекты опирания пролетного строения в целом и дефекты опорных частей в частности также приводят к перераспределению усилий между фермами и влияют на коэффициент  $\chi_k$ . К таким дефектам можно отнести неравномерное продавливание подферменников в оголовок опоры, заклинивание или перекос осей опорных частей, разную вертикальную жесткость опор, в том числе с наличием просто зазоров под нижней плитой опорных частей, которые «закрываются» при прохождении поезда, проявляясь выплесками.

В любом случае, какой бы ни была причина отношения напряжений  $\chi_k$ , отличного от 1,0 (при равномерном перераспределении между фермами), фактическую работу пролетного строения могут установить только испытания.

### Результаты исследования

На рис. 7, 8 приведены примеры записей, измеряемых при испытании параметров. Ре-

зультаты непосредственных измерений продольных напряжений  $\sigma_x$  приведены на графиках для всех элементов (рис. 9). Там же показано появление изгибающего момента из плоскости фермы.

Измерения показывают, что в нижних поясах обеих ферм Н0–Н1 и Н1–Н2 присутствует значительное влияние изгибающего момента. Так, среднее отношение для правой фермы  $\delta_{\text{Н}0-\text{Н}1}^{\text{пр}} = 0,30$  и  $\delta_{\text{Н}1-\text{Н}2}^{\text{пр}} = 0,93$ ; для левой фермы  $\delta_{\text{Н}0-\text{Н}1}^{\text{л}} = 0,68$  и  $\delta_{\text{Н}1-\text{Н}2}^{\text{пр}} = 0,62$ . Это значит, что в крайней панели правой фермы до 70 % нормальных напряжений вызывается моментами, а в следующей панели – только 7 %. Моменты в левой ферме вызывают 32–38 % напряжений. В раскосах коэффициент влияния моментов  $\delta = 0,8...0,93$ , вклад изгибающих моментов в нормальные напряжения 7–20 %.

Продольные напряжения в параллельных элементах, описываемые коэффициентом  $\chi_k$ , приведены на рис. 10. По представленным результатам можно сделать вывод, что для поясов среднее значение  $\chi_{\text{Н}0-\text{Н}1} = 0,81$ , больше загружена левая ферма, а в элементе  $\chi_{\text{Н}1-\text{Н}2} = 0,98$  распределение равномерное. Распределение по опорным раскосам  $\chi_{\text{Н}0-\text{В}1} = 1,13$ , больше загружена правая ферма. Раскос второй панели  $\chi_{\text{В}1-\text{Н}2} = 1,17$ , также больше загружена правая ферма.

Прогибы ферм приведены в табл. 3. Разница прогибов левой и правой ферм практически отсутствует. Разброс значений лежит в диапазоне  $-7...+8\%$ , средний коэффициент  $\chi_{\text{прогиб}}$  составляет 1,0. Общую жесткость ферм можно считать одинаковой.

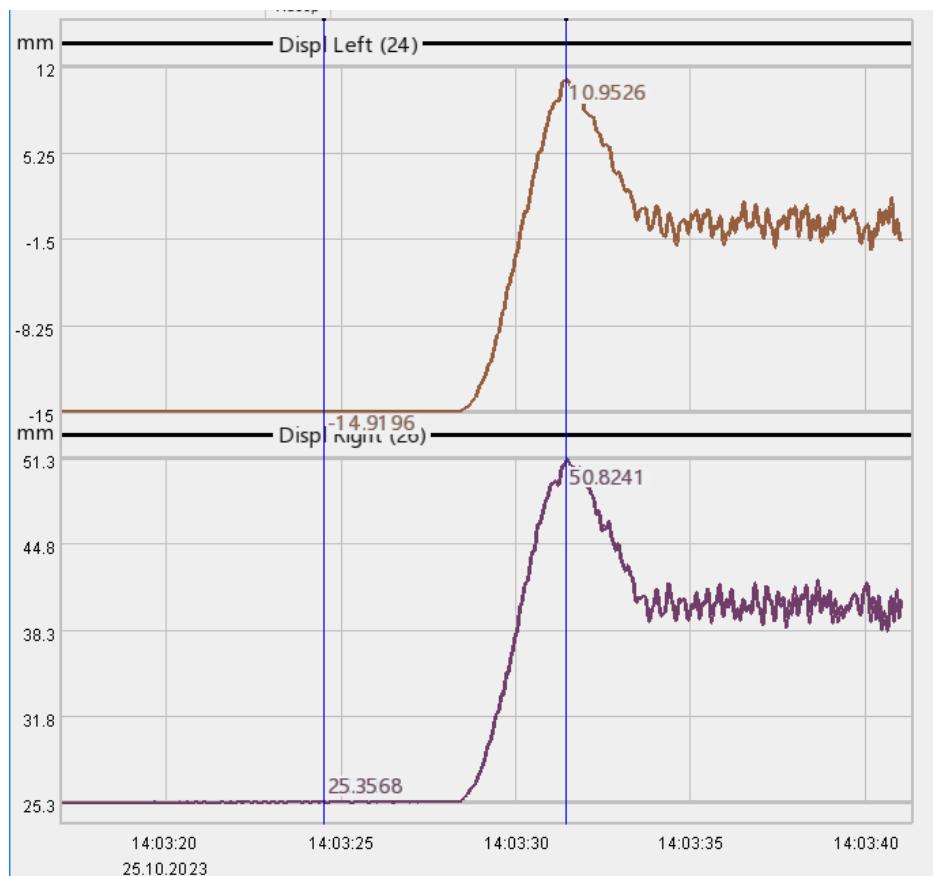


Рис. 7. Графики прогибов ферм при загружении № 16

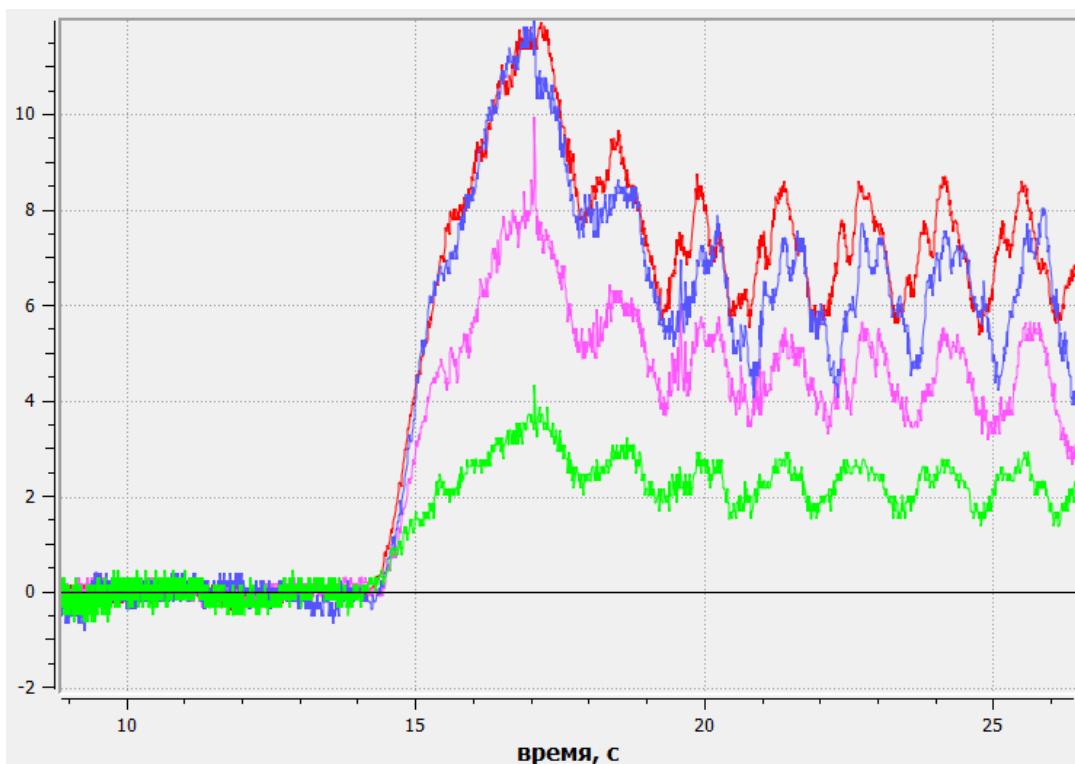


Рис. 8. Тензограмма проезда локомотива и вагонов (загружения № 16, 17), записанная по нижнему поясу Н0–Н1, по вертикали отложены напряжения в МПа (красный и зеленый – датчики на правой ферме; синий и розовый – на левой ферме)

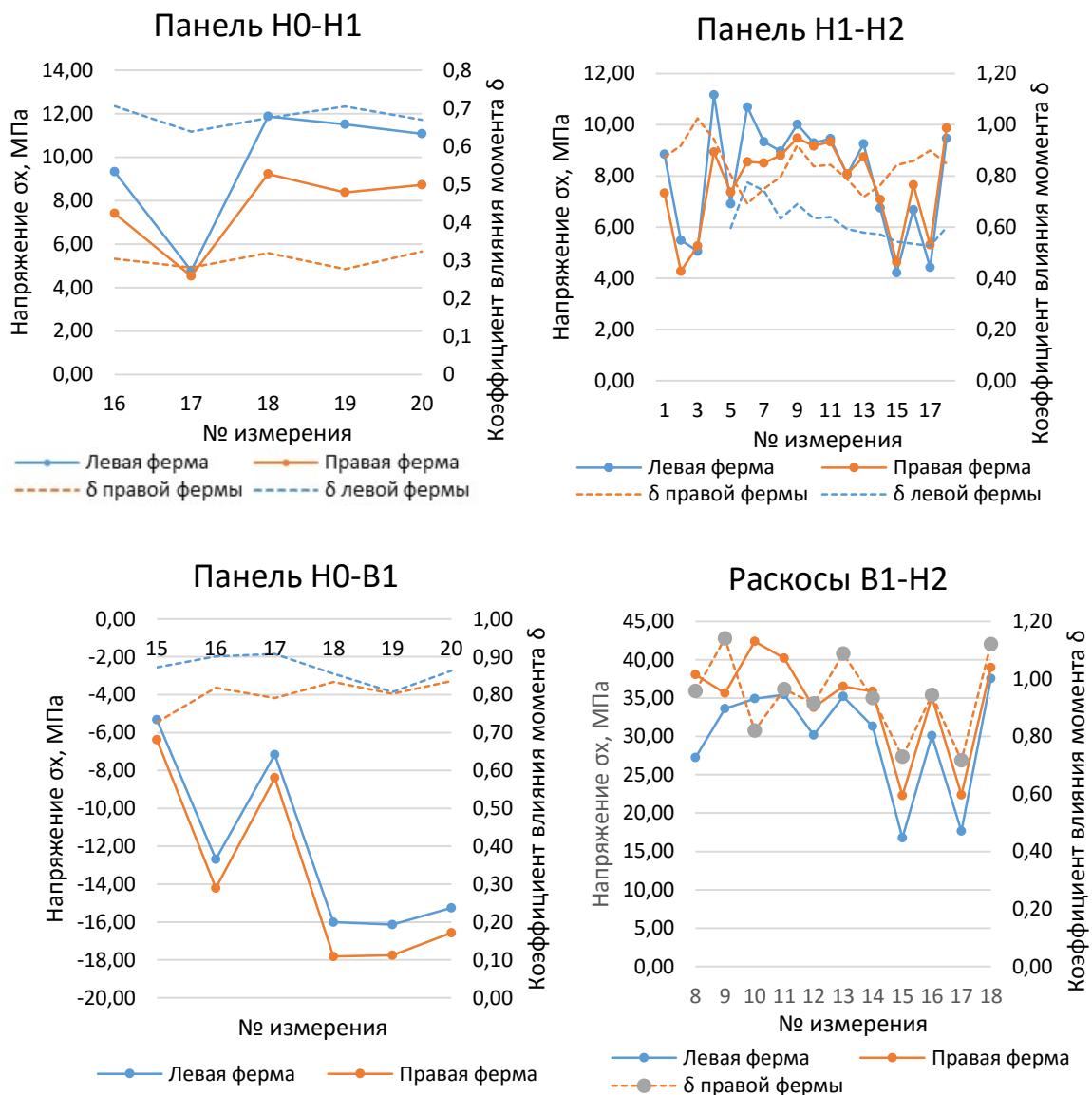


Рис. 9. Результаты измерений продольных напряжений  $\sigma_x$  и коэффициента влияния момента в элементах  $\delta$

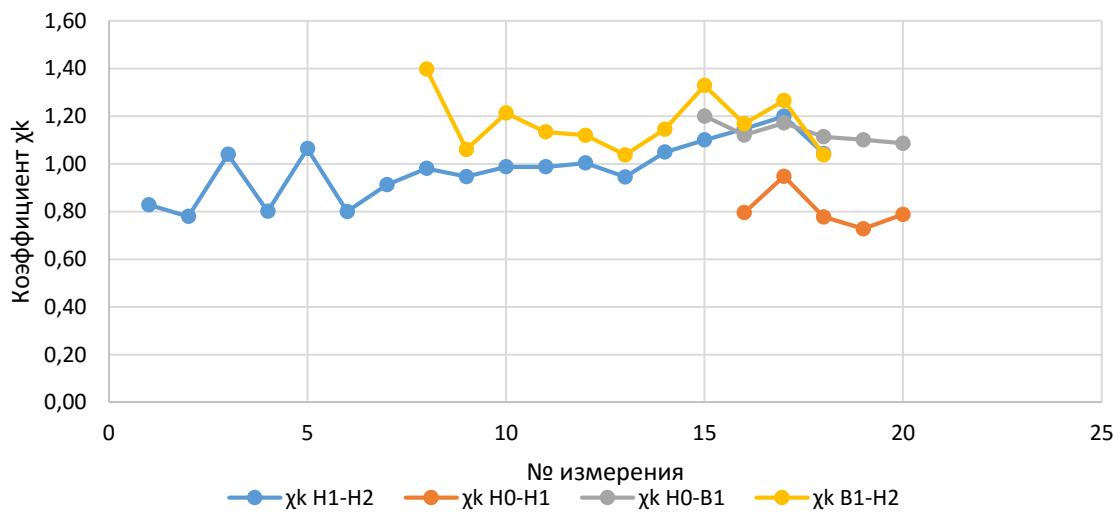


Рис. 10. Графики измерений коэффициента отношения напряжений  $\chi_k$

среднее значение  $\chi_{H0-H1} = 0,81$ , больше загружена левая ферма, а в элементе  $\chi_{H1-H2} = 0,98$  распределение равномерное. Распределение по опорным раскосам  $\chi_{H0-B1} = 1,13$ , больше загружена правая ферма. Раскос второй панели  $\chi_{B1-H2} = 1,17$ , также больше загружена правая ферма.

Прогибы ферм приведены в табл. 3. Разница прогибов левой и правой ферм практически отсутствует. Разброс значений лежит в диапазоне  $-7...+8\%$ , средний коэффициент  $\chi_{\text{прогиб}}$  составляет 1,0. Общую жесткость ферм можно считать одинаковой.

По измерениям вертикальных перемещений у опоры № 0, приведенных в табл. 4, установлено, что осадки опорных частей неравномерны. Если меньшие перемещения на правой ферме можно трактовать как вертикальный упругий прогиб фермы в целом, то перемещения по левой ферме больше практически в два раза. Визуально наблюдается осадка нижней плиты левой опорной части под проходящей нагрузкой.

Существует несколько гипотез относительно факторов, спровоцировавших выход из строя элемента верхнего пояса в 2012 г. Все они, безусловно, имели место, но, скорее всего, причиной стал комплекс факторов, начиная от изначального дефекта сварного шва и заканчивая неравномерным опиранием

пролетного строения на опоры и подклиникой подвижных опорных частей.

По мнению авторов данной работы, выход из строя элемента спровоцировала усталостная трещина в сварном шве, которая развивалась под влиянием сложного напряженно-деформированного состояния самого элемента. Перекосы геометрии, неравномерное проседание опорных частей и подклиника подвижных опорных частей вполне могли вызвать сложное НДС сжатия с изгибом и кручением элемента пояса, что в последствии и привело развитию повреждения. Немаловажным фактором являются геодинамические воздействия, которые постоянно присутствуют в месте расположения моста. В радиусе 100 км от сооружения расположены 26 очагов землетрясений за последние 10 лет энергетического класса от 10 до 14 (рис. 11), а очагов энергетического класса от 8,4 насчитывается 119. В совокупности с неисправными опирами пролетного строения от геодинамических воздействий в элементах могут возникать значительные усилия, характер которых достаточно сложно надежно спрогнозировать.

В настоящее время эксплуатируемое пролетное строение, пусть и с замененным элементом верхнего пояса, находится не в лучших условиях эксплуатации. Факторы, указанные выше, все еще действуют, испытания

**Прогибы ферм при испытаниях**

Время	Номер загружения	Прогибы фермы, мм		$\chi_{\text{прогиб}}$	$W, \%$
		левой	правой		
13:20	12	25,98	26,14	0,99	-0,6
13:35	14	25,91	26,32	0,98	-1,6
	15	16,44	16,94	0,97	-3,0
14:03	16	25,87	25,46	1,02	1,6
	17	14,94	15,98	0,93	-7,0
14:17	20	29,97	29,14	1,03	2,8
	21	29,52	27,06	1,09	8,3
		Средний $\chi_{\text{прогиб}}$		1,00	0,00

**Таблица 3**

**Вертикальные перемещения поясов у опоры № 0**

Время	Номер загружения	Перемещение, мм		$\Delta, \text{мм}$	$W, \%$
		Правая ферма	Левая ферма		
15:10	ЗЭС5К	1,89	3,46	1,57	83,1
	Вагоны	1,33	2,65	1,32	99,2
15:25	ЭП1	1,72	3,44	1,72	100,0
	ЗЭС5К	1,59	3,54	1,95	122,6
15:32	Вагоны	1,75	3,56	1,81	103,4

**Таблица 4**

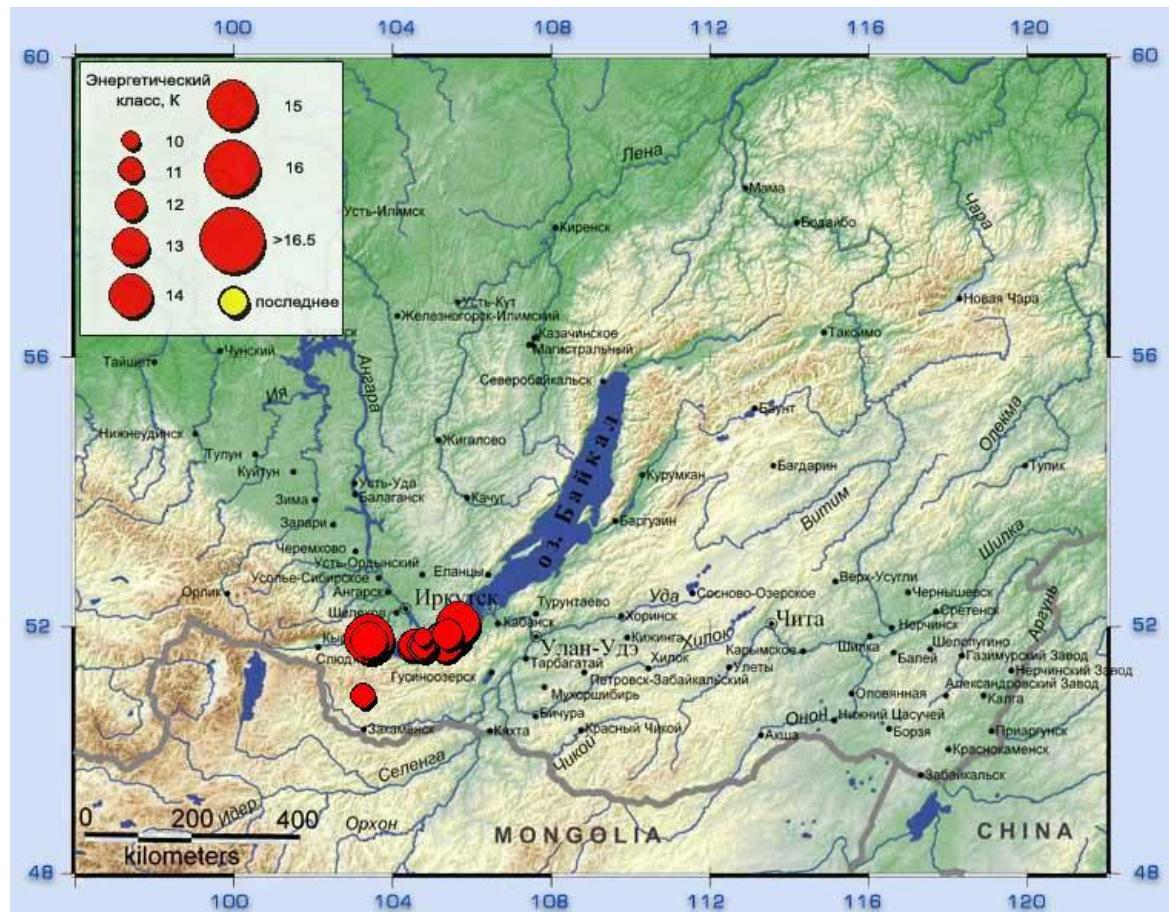


Рис. 11. Карта очагов землетрясений с  $K \geq 10$  в радиусе 100 км от моста за 2013–2023 гг. [11]

показывают то же сложное НДС всех элементов. Соответственно, гарантий, что не произойдет выхода из строя какого-либо другого элемента, нет, и перед мостовиками снова может встать вопрос живучести стальной фермы, но в уже другой расчетной схеме.

### Выводы

Как видно из испытаний, элементы ферм пролетного строений испытывают неоднородное НДС. Прослеживается разное проявление изгибающих моментов. Параллельные друг другу элементы левой и правой ферм не всегда работают одинаково, как можно предположить только с учетом эксцентриситета пути, элемент нижнего пояса правой фермы у опорного узла преимущественно работает на изгиб из плоскости фермы.

Упругие прогибы левой и правой ферм пролетного строения практически не отлича-

ются, разница находится в пределах погрешностей измерений. Это свидетельствует об одинаковой жесткости ферм, отсутствии эксцентриситета пути и отсутствии структурных повреждений элементов и соединений. Однако внутри фермы элементы работают с отступлениями от классических расчетных предпосылок.

Все это означает, что присутствуют факторы, которые вносят дополнительный вклад в перераспределение усилий между элементами внутри ферм. Это может быть и разная жесткость элементов внутри фермы в принципе, и нарушения правильного опирания пролетного строения, его геометрии. Оценка вкладов тех или иных факторов может быть проведена численным моделированием, что является развитием данного экспериментального материала.

## Список источников

1. Махутов Н. А., Резников Д. О. Многоуровневая оценка живучести сложных технических систем с учетом масштабно-структурной иерархии процессов накопления повреждений и разрушения // Безопасность в техносфере. 2016. Т. 5, № 4. С. 3–17.
2. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы : актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84\*. Москва : ЦПП, 2011. 347 с.
3. Баранов Т. М., Быкова Н. М., Забияка А. А. Моделирование поврежденных металлических пролетных строений железнодорожных мостов // Политранспортные системы : материалы XI Международной научно-технической конференции (Новосибирск, 12–13 ноября 2020 г.). Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2020. С. 63–67.
4. Быкова Н. М., Баранов Т. М., Забияка А. А. Оценка работы пролетного строения железнодорожного моста с повреждением элемента фермы // Транспортные сооружения. 2023. Т. 10, № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/12SATS423.pdf> (дата обращения: 01.06.2024).
5. Старцев А. Г., Зайнагабдинов Д. А. Численное исследование работы металлического пролетного строения со сквозными главными фермами с поврежденным верхним поясом // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Восьмой Международной научно-практической конференции, 28 марта – 01 апреля 2017 г. Иркутск : в 2 т. Иркутск : Иркутский государственный университет путей сообщения, 2017. Т. 1. С. 562–569.
6. Яшнов А. Н., Снежков И. И. Развитие систем диагностики и мониторинга мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3 (54). С. 6–13.
7. Фейзханов У. Ф., Таликов Д. А. Современные методы автоматизации измерительных и технологических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва : Горная книга, 2007. № 11. С. 334–338.
8. 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.
9. Руководство по определению грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 31 декабря 2015 г. №3227п. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
10. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин / И. Ю. Майстренко, И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников [и др.]. Ч. 3 // Транспортные сооружения. 2018. Т 5, № 1. URL: <https://t-s.today/08SATS118.html> (дата обращения: 01.06.2024).
11. Байкальский филиал ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» : [сайт]. Раздел «Основной каталог событий». URL: <https://seis-bykl.ru/modules.php?name=Data&da=1> (дата обращения: 01.06.2024).

## References

1. Mahutov N. A., Reznikov D. O. Multilevel assessment of the survivability of complex technical systems, considering the large-scale structural hierarchy of damage accumulation and destruction processes. *Safety in the Technosphere*. 2016;5(4):3–17. (In Russ.).
2. SP 35.13330.2011. Bridges and culverts. Updated edition of SNiP 2.05.03-84\*. Moscow: CPP; 2011. 347 p. (In Russ.).
3. Baranov T. M., Bykova N. M., Zabiyaka A. A. Simulation of damaged metal superstructures of railway bridges. *Polytransport systems: Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference on November 12–13, 2020*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Transport University; 2020. P. 63–67. (In Russ.).
4. Baranov T. M., Bykova N. M., Zabiyaka A. A. Estimation of the railway bridge span structure operation with the damage of the truss element. *Transport Constructions*. 2023;10(4). URL: <https://t-s.today/PDF/12SATS423.pdf>. (In Russ.).
5. Startsev A. G., Zainagabdinov D. A. Numerical Research of the Performance of a through main trusses metal superstructure with a damaged upper belt. *Transport Infrastructure of the Siberian Region: Proceedings of the Eighth International Scientific and Practical Conference, March 28 – April 01, 2017, Irkutsk*. In 2 volumes. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2017;(1):562–569. (In Russ.).
6. Yashnov A. N., Snejzhkov I. I. Development of integrated diagnostic and monitoring systems. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(54):6–13. (In Russ.).

7. Feyzkhanov U. F., Talikov D. A. Modern methods of automation of measuring and technological processes. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. Moscow: Gornaya Kniga; 2007;(11):334–338. (In Russ.).
8. Ivanov E. O. Controlled parameters of monitoring systems for railway superstructures with through trusses. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):109–116. (In Russ.).
9. Guidelines for determining the load capacity of metal superstructures of railway bridges. Order of Russian Railways dated December 31, 2015 No. 3227r. *ConsultantPlus*: legal reference system. URL: <http://www.consultant.ru>. (In Russ.)
10. Maistrenko I. Yu., Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G. [et al.]. Accidents and destruction of bridge structures, analysis of their causes. Part 3. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018. Vol. 5, No. 1. URL: <https://t-s.today/08SATS118.html>. (In Russ.).
11. The website of the Baikal branch of the Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences: [site]. The main catalogue of events. URL: <https://seis-bykl.ru/modules.php?name=Data&da=1>. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

*Т. М. Баранов* – доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» Иркутского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук, доцент.

*Д. А. Зайнагабдинов* – доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» Иркутского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

*А. А. Забияка* – аспирант кафедры «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» Иркутского государственного университета путей сообщения.

*И. А. Фетисов* – начальник мостоиспытательной станции № 27 Иркутского филиала Центральной дирекции диагностики и мониторинга инфраструктуры – филиала ЦДИ ОАО «РЖД».

### **Information about the authors**

*T. M. Baranov* – Associate Professor of the Construction of Railways, Bridges and Transport Tunnels Department, Irkutsk Transport University, Candidate of Engineering.

*D. A. Zainagabdinov* – Associate Professor of the Construction of Railways, Bridges and Transport Tunnels Department, Irkutsk Transport University, Candidate of Engineering.

*A. A. Zabiyaka* – Postgraduate of the Construction of Railways, Bridges and Transport Tunnels Department, Irkutsk Transport University.

*I. A. Fetisov* – Head of the Bridge Testing Station No. 27, Irkutsk Branch of the Central Directorate for Diagnostics and Monitoring of Infrastructure – Branch of the Central Directorate of Infrastructure of Russian Railways.

Статья поступила в редакцию 10.06.2024; одобрена после рецензирования 29.07.2024; принята к публикации 04.09.2024.

The article was submitted 10.06.2024; approved after reviewing 29.07.2024; accepted for publication 04.09.2024.

## **Информация для авторов**

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

2. Статья предоставляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (границы Times New Roman, кегль 14 pt; поля: верхнее и нижнее – 20, левое – 30, правое – 10 мм). Файл с текстом статьи должен быть назван фамилией автора (например: Иванов.doc).

3. Статья должна содержать:

- тип статьи (например, научная, обзорная, рецензия);
- УДК;
- название статьи;
- фамилию, имя и отчество каждого автора, место его работы/учебы, город, страну, ученую степень, звание, должность;
- аннотацию на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- библиографический список на русском и английском языках.

4. Список источников составляется в порядке упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Список должен содержать не менее 10 источников, из них собственных статей должно быть не более 30 %.

5. Графический материал должен быть выполнен в графических редакторах, поддерживающих векторную и растровую графику. Иллюстрации должны быть четкими, все подписи на рисунке должны хорошо читаться и иметь расшифровку. Если в тексте есть фотография, отсканированный рисунок, то они обязательно должны быть представлены также отдельным файлом в исходном графическом формате (например: jpeg, tiff).

6. Статья для опубликования в журнале и заявка отправляются по адресу: vestniksgups@sibgups.ru.

7. В редакцию представляются оригиналы документов: экспертное заключение о возможности опубликования статьи, статья и заявка.

8. Публикация статей в журнале бесплатная.

Более подробную информацию по вопросам опубликования статей и размещения другой информации в журнале можно найти на сайте издания.



[www.stu.ru/science](http://www.stu.ru/science)



vestniksgups@sibgups.ru



+7 383 328-04-36



630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук,  
191, корп. 3, комн. 307





Издательство Сибирского государственного  
университета путей сообщения

ISSN 1815-9265  
Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения  
2024. № 3 (70). 1–101

Главный редактор *А. Л. Манаков*  
Заместитель главного редактора *А. Д. Абрамов*  
Заместитель главного редактора *С. В. Карасев*  
Ответственный секретарь *М. С. Галай*  
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*  
Редактор *Е. Е. Рыжкова*  
Корректор *А. А. Игумнов*  
Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*  
Дизайн обложки *А. С. Петренко*

**Учредитель**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

**Адрес редакции**

630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, корп. 3, комн. 307.  
Телефон/факс: (383) 328-04-36.  
E-mail: [vestniksgups@sibgups.ru](mailto:vestniksgups@sibgups.ru)

**Адрес издателя**

630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.  
Телефон/факс: (383) 328-03-81.  
E-mail: [bvu@stu.ru](mailto:bvu@stu.ru)

Подписано в печать 25.09.2024. Дата выхода в свет 27.09.2024

Тираж 350 экз. Формат 60×84/8  
Объем 11,8 уч.-изд. л., 12,75 усл.-печ. л. Заказ № 3949

Цена свободная

Отпечатано в издательстве СГУПС.  
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191  
Тел. (383) 328-03-81; e-mail: [bvu@stu.ru](mailto:bvu@stu.ru)