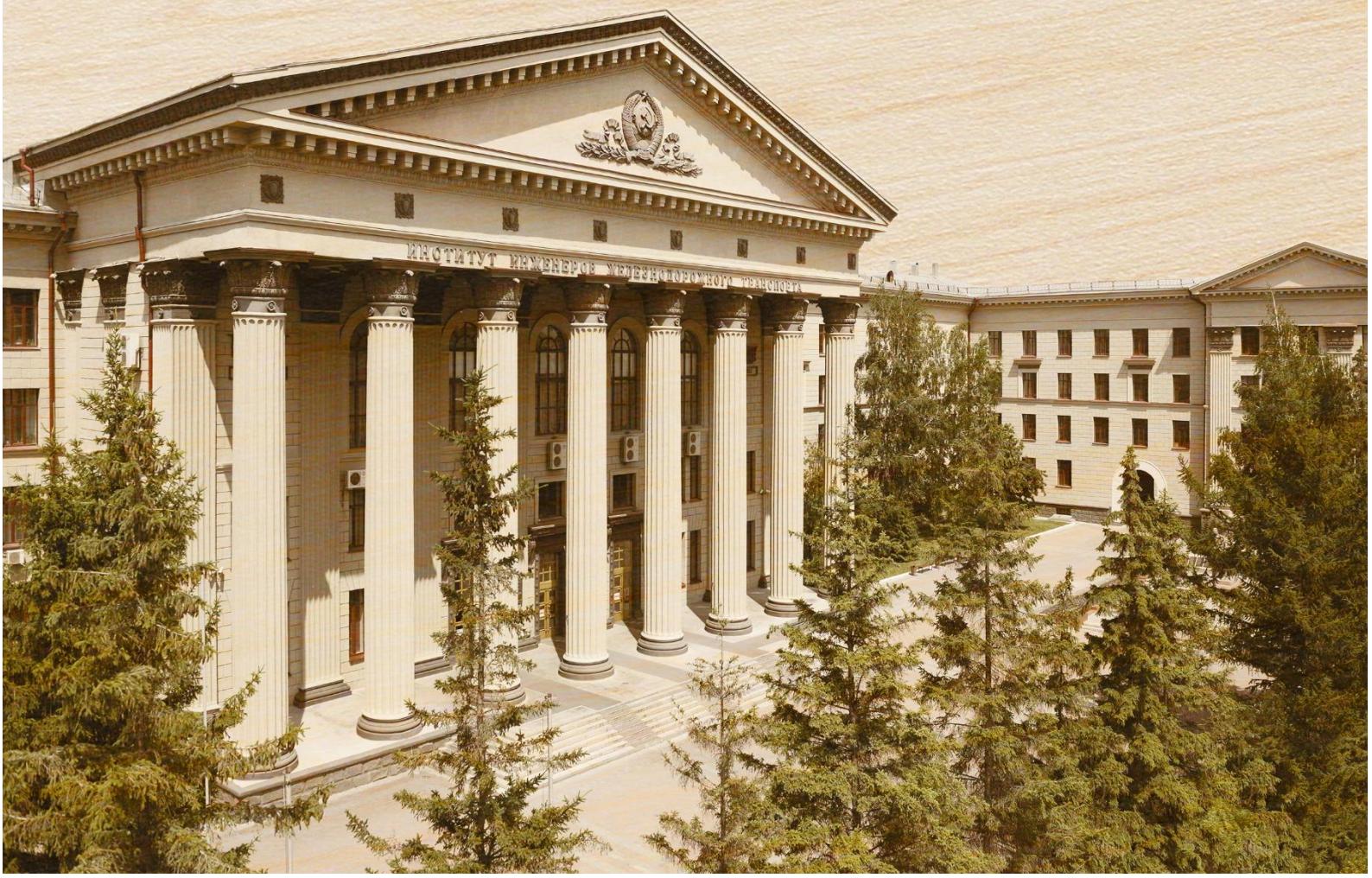


ISSN 1815-9265

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
университета путей сообщения

№ 1 (73). 2025 16+



УЧРЕДИТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

Галай Марина Сергеевна – канд. техн. наук

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

Редактор Е. Е. Рыжкова

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

Макет, верстка Ю. В. Борцовой

Дизайн обложки А. С. Петренко

Сайт журнала:

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

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

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

FOUNDER

The Siberian Transport University

Editors and Editorial Board

Editor-in-Chief

A. L. Manakov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

A. D. Abramov, Doctor of Engineering, Professor

Deputy Editor

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

Executive Secretary

M. S. Galay, Candidate of Engineering

Editors

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

English Text Reviewer

I. Stepachkova, Senior Lecturer

Text Reviewer E. E. Ryzhkova

Managing Editor A. A. Igumnov, Candidate of Engineering

Layout Designer Yu. V. Bortsova

Cover Designer A. S. Petrenko

Main contact details

Siberian Transport University

room 307, 191, Dusi Kovalchuk St.

630049, Novosibirsk, Russia

Phone: (383) 328-04-36

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

E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

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

ISSN: 1815-9265

**Вестник
Сибирского государственного
университета путей сообщения**

Научно-теоретический
журнал

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

№ 1 (73) · 2025 · ЯНВАРЬ – МАРТ · 16+

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

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

Маринин С. А. Совершенствование методики определения потерь участковой скорости движения грузовых поездов.....	5
Павлова В. Л., Медведев В. И., Квинт М. Ю., Косарева Д. Л., Калиниченко Е. А. Распространение звуковой волны с учетом архитектурно-планировочных и рельефных особенностей местности в районе станции И	12
Жарикова Л. С., Югрина О. П. Оперативное планирование парка поездных локомотивов грузового движения с учетом отдельных факторов	22
Севостьянов А. А., Пономарев С. А., Пуха А. С. Анализ сокращения затрат труда на выправку пути за счет применения машинных комплексов	29

Строительство и архитектура

Ефремов Г. А., Шестовицкий Д. А. Экспериментальное определение коэффициентов закона Пэриса для моделирования процесса коррозионно-усталостного разрушения арматуры пролетных строений железобетонных мостов	39
Анферов В. Н., Сырямин П. Ю., Сырямин Ю. Н. Резервы увеличения производительности кольцевой пневмоударной машины при сооружении нагельных креплений грунтовых откосов	49
Антонов М. А., Марченко М. С., Горячкин В. С. Прочность анкерной зоны предварительно напряженного пролетного строения на местные напряжения раскалывания	57
Ланис А. Л., Разуваев Д. А., Усов Д. А., Печенкин Р. С. Обоснование системы инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемых насыпей линейных транспортных сооружений в условиях Ямalo-Ненецкого автономного округа.....	68
Королев К. В., Макарова В. С., Кузнецов А. О., Караполов А. М. Задача о предельном равновесии свода обрушения над подземными сооружениями криволинейного очертания и ее практическое применение	77
Пичкурова Н. С. Исследование несущей способности, трещиностойкости и выносимости железобетонных шпал ШЗ-Д 4×10 и ШЗ-ДПГ 4×10	87
Исааков А. Л., Мусеева И. С., Гудкова И. Н. Обоснование конструктивных особенностей земляного полотна из дренирующих грунтов в криолитозоне с помощью теплотехнических расчетов.....	95
Огурцов Г. Л., Ермошин Н. А., Бирюков О. Р. Применение имитационного моделирования для оценки долговечности балок пролетного строения железобетонных мостов.....	104
Ефимов С. В., Кокоева Е. С. Анализ конструктивного исполнения автодорожных железобетонных мостов для создания каталогов цифровых информационных моделей их элементов	114

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 1 (73) · 2025 · January – March · 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

S. A. Marinin. Improving the methodology for determining the losses in section speed of freight trains	5
V. L. Pavlova, V. I. Medvedev, M. Yu. Kvint, D. L. Kosareva, E. A. Kalinichenko. Sound wave propagation taking into account architectural-planning and relief features terrain in the area of I station.....	12
L. S. Zharikova, O. P. Yugrina. Operational planning of a freight train locomotive fleet taking into account certain factors	22
A. A. Sevostyanov, S. A. Ponomarev, A. S. Pukha. Analysis of labour cost reduction for track straightening through the use of machine complexes	29

Building and Architecture

G. A. Efremov, D. A. Shestovitskiy. Experimental determination of Paris law coefficients for modeling the process of corrosion-fatigue destruction of reinforced concrete railway bridges superstructures.....	39
V. N. Anferov, P. Yu. Syryamin, Yu. N. Syryamin. Reserves for increasing the productivity of an annular pneumatic impact machine during the construction of dowel fastenings of soil slopes.....	49
M. A. Antonov, M. S. Marchenko, V. S. Goryachkin. The strength of the anchor zone of the prestressed span structure against local bursting stresses	57
A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, D. A. Usov, R. S. Pechenkin. Substantiation of the engineering-geocryological monitoring system for operational embankments of linear transport structures in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug.....	68
K. V. Korolev, V. S. Makarova, A. O. Kuznetsov, A. M. Karaulov. Limit equilibrium problem of a collapse vault over curvilinear underground structures and its practical application	77
N. S. Pichkurova. Investigation of the bearing capacity, crack resistance and endurance of reinforced concrete sleepers SH3-D 4×10 and SH3-DPG 4×10.....	87
A. L. Isakov, I. S. Moiseeva, I. N. Gudkova. Justification of the subgrade design features from draining soils in the cryolithic zone using heat engineering calculations	95
G. L. Ogurtsov, N. A. Ermoshin, O. R. Biryukov. The algorithm of the simulation model implementation and the simulation results.....	104
S. V. Efimov, E. S. Kokoeva. Analysis of the road reinforced concrete bridges design for the creation a library of building information models of their elements	114

ТРАНСПОРТ

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 5–11.
The Siberian Transport University Bulletin. 2025. No. 1 (73). P. 5–11.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.222.6
doi 10.52170/1815-9265_2025_73_5

Совершенствование методики определения потерь участковой скорости движения грузовых поездов

Сергей Александрович Маринин

Горьковская железная дорога, Нижний Новгород, Россия, marininsergey.nn@mail.ru

Аннотация. Для оценки качества эксплуатационной работы железных дорог используется ряд показателей, одним из которых является участковая скорость движения грузовых поездов. На данный показатель, от которого зависит выполнение других показателей эксплуатационной работы, оказывает влияние большое количество факторов, учет которых, используя общепринятые аналитические зависимости, затруднительно. Это препятствует объективному установлению планового задания по участковой скорости, а также оценке допускаемых при выполнении потерь.

Поэтому была предложена методика, позволяющая оценить потери участковой скорости, которая основана на учете всего разнообразия факторов, оказывающих на нее влияние. Методика базируется на наличии статистической взаимосвязи участковой скорости с рабочим парком грузовых вагонов. Величина рабочего парка, в свою очередь, формируется под влиянием всех факторов, приводящих к замедлению пропуска вагонопотоков.

В статье с использованием инструментов теории вероятностей и математической статистики рассмотрено влияние рабочего парка грузовых вагонов на отдельных территориальных управлениях железной дороги на участковую скорость движения грузовых поездов по железной дороге. Целью настоящего исследования явилось повышение точности определения потерь участковой скорости движения грузовых поездов при затруднениях в пропуске вагонопотоков.

В ходе исследования, выполненного на статистических данных Горьковской железной дороги за 2022–2023 гг., установлено, что если изменением рабочего парка грузовых вагонов по железной дороге объяснялось 85 % вариабельности участковой скорости по железной дороге, то при переходе на рабочие парки грузовых вагонов отдельных территориальных управлений железной дороги степень объяснения вариабельности итогового показателя выросла до 90 %. По результатам исследования составлено уравнение регрессии для определения потерь участковой скорости, позволившее снизить погрешность прогнозирования в 2,5 раза.

Ключевые слова: эксплуатационная работа, определение потерь, участковая скорость, корреляционный анализ, уравнение регрессии, прогнозирование показателей

Для цитирования: Маринин С. А. Совершенствование методики определения потерь участковой скорости движения грузовых поездов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 5–11. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_5.

TRANSPORT

Original article

Improving the methodology for determining the losses in section speed of freight trains

Sergy A. Marinin

Gorky Railway, Nizhny Novgorod, Russia, marininsergey.nn@mail.ru

Abstract. To assess the quality of operational work of railways, a number of indicators are used, one of which is the section speed of freight trains. The fulfillment of other indicators of operational work depends on this indicator. In turn, this indicator is influenced by a large number of factors, which are difficult to take into account using generally accepted analytical dependencies. This prevents the objective establishment of a planned task for section speed, as well as the assessment of losses allowed in implementation.

Therefore, a method was proposed that allows you to estimate the losses of section speed, based on taking into account the whole variety of factors that affect it. The method is based on the presence of a statistical relationship between the section speed and the working fleet of freight cars. The size of the working fleet, in turn, is formed under the influence of all factors leading to a slowdown in the passage of car flows.

Using the tools of probability theory and mathematical statistics, the article examines the influence of the working fleet of freight cars at individual territorial administrations of the railway on the section speed of freight trains on the railway. The purpose of this study was to increase the accuracy of determining the losses of section speed of freight trains in conditions of difficulties in passing car flows.

In the course of the study, carried out on the statistical data of the Gorky Railway for 2022–2023, it was found that if the change in the working fleet of freight cars on the railway explained 85% of the variability of the section speed on the railway, then when switching to the working fleet of freight cars of individual territorial administrations of the railway, the degree of explanation of the variability of the final indicator increased to 90 %. Based on the results of the study, a regression equation was compiled to determine the losses of section speed, which made it possible to reduce the forecast error by 2,5 times.

Keywords: operational work, loss determination, section speed, correlation analysis, regression equation, forecasting of indicators

For citation: Marinin S. A. Improving the methodology for determining the losses in section speed of freight trains. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2025;(73):5–11. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_5.

Введение

В [1] была предложена методика, которая позволяет определить потери участковой скорости движения грузовых поездов (далее – участковая скорость). Методика основана на наличии тесной корреляционной связи рассматриваемого показателя с рабочим парком грузовых вагонов (далее – рабочий парк) на железной дороге.

На основании статистических данных по Горьковской железной дороге получены следующие основные числовые результаты разработанной методики:

- коэффициент детерминации – 0,75;
- средняя погрешность прогнозирования – 2,5 %.

Как было установлено ранее при апробации методики, в феврале и марте 2023 г. наблюдались «аномальные» отклонения точности составления прогноза. Это стало следствием большого роста количества местных вагонов на отдельном территориальном управлении.

На основании этого было выдвинуто предположение, что при разбиении рабочего парка на более мелкие составляющие можно снизить влияние его изменения на отдельных участках железной дороги на точность определения потерь участковой скорости по железной дороге.

С целью подтверждения данного факта, в дополнение к уже имеющимся статистическим данным, были собраны сведения о ежесуточном наличии рабочего парка на каждом территориальном управлении железной дороги с ноября 2022 г. по октябрь 2023 г., что соответствует основному исследованию.

Материалы и методы исследования

Для определения методов теории вероятностей и математической статистики, которые могут быть использованы в конкретном случае,

были проведены исследования статистической базы, а именно рассмотрено на соответствие нормальному закону распределение рабочего парка на каждом территориальном управлении.

Для этого вначале были выдвинуты нулевая и альтернативная гипотезы. Нулевая гипотеза предполагает, что эмпирические и теоретические частоты распределения рассматриваемой величины равны, альтернативная подразумевает различие этих частот.

Проверка нулевой гипотезы была выполнена с использованием критерия Колмогорова, определяемого как [2]

$$\lambda = D\sqrt{n}, \quad (1)$$
$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x, \theta)|,$$

где D – статистика Колмогорова [3]; n – объем выборки, равный 365 сут; $F_n(x)$ и $F(x, \theta)$ – эмпирическая и теоретическая функции распределения рабочего парка по территориальному управлению соответственно.

Было проведено сравнение полученного по расчетам значения критерия Колмогорова с его критическим значением. При расчетном значении критерия меньше критического принимается нулевая гипотеза, больше – альтернативная. Расчеты показали, что статистические данные хорошо описываются нормальным законом распределения.

В соответствии с выполненными расчетами на рис. 1 в качестве примера представлена гистограмма распределения рабочего парка на Муромском территориальном управлении. Количество интервалов при построении гистограммы определено в соответствии с правилом Стерджеса [4].

Для оценки влияния рабочего парка по территориальным управлениям на участковую скорость по железной дороге в целом был определен коэффициент множественной корреляции [5]:

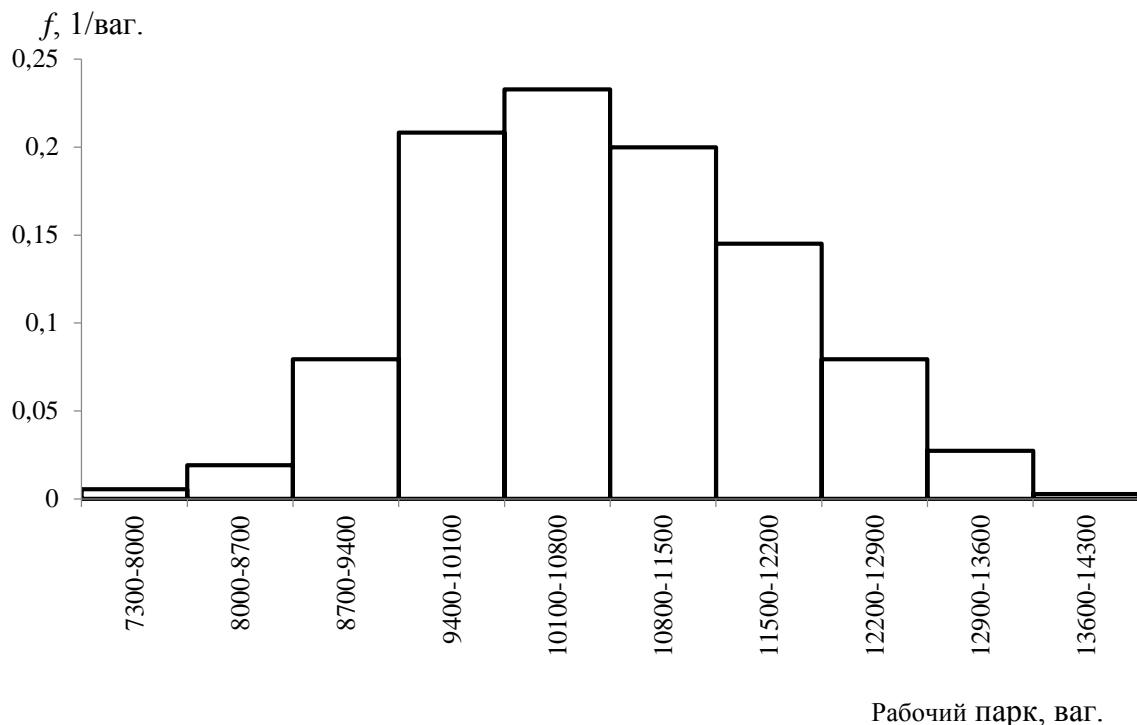


Рис. 1. Гистограмма плотности распределения рабочего парка на Муромском территориальном управлении

$$R = \sqrt{\beta_1 r_{yx_1} + \beta_2 r_{yx_2} + \beta_3 r_{yx_3} + \beta_4 r_{yx_4} + \beta_5 r_{yx_5}}, \quad (2)$$

где β – стандартизованный коэффициент регрессии, показывающий, насколько изменится участковая скорость по железной дороге при изменении рабочего парка по одному территориальному управлению; 1–5 – номер территориального управления; r_{yx} – парный коэффициент корреляции между участковой скоростью по железной дороге (y) и рабочим парком по территориальному управлению (x).

Путем расчетов получен коэффициент множественной корреляции 0,9, который говорит о высокой степени влияния переменных на рассматриваемую величину.

Коэффициент детерминации, представляющий собой квадрат коэффициента корреляции [6], составил 0,8. То есть 80 % вариабельности участковой скорости по железной дороге в целом является следствием изменения рабочего парка по территориальным управлениям.

Коэффициент детерминации увеличился на 0,05 относительно того случая, когда учитывался общий рабочий парк грузовых вагонов по дороге.

В результате расчетов получено уравнение регрессии [7], позволяющее определить участ-

ковую скорость по железной дороге в имеющемся диапазоне изменения рабочего парка по территориальным управлением:

$$A = 68,691 - 0,00092t_1 + 0,00004t_2 - 0,00094t_3 - 0,00025t_4 - 0,00027t_5, \quad (3)$$

где t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 – рабочий парк на Муромском, Горьковском, Кировском, Казанском и Ижевском территориальных управлениях соответственно.

Анализ коэффициентов в полученном уравнении регрессии показал, что самое большое влияние на участковую скорость по железной дороге оказывает увеличение рабочего парка на первом и третьем территориальных управлении. Такой результат является следствием того, что на данных территориальных управлениях имеются станции стыкования родов тока и затруднения пропуска поездов через них приводят к большим потерям участковой скорости по железной дороге. Изменение рабочего парка в четвертом и пятом территориальных управлениях оказывает меньшее влияние на результирующий показатель.

Влияние изменения рабочего парка во втором территориальном управлении на участковую скорость на железной дороге крайне мало. Более того, в уравнении регрессии коэф-

фициент этого территориального управления имеет знак плюс.

С целью изучения данного явления был выполнен корреляционный анализ участковой скорости по железной дороге с рабочим парком как на железной дороге в целом, так и на территориальных управлениях.

Для этого были рассчитаны коэффициенты корреляции [8]:

$$r_{xy} = \frac{M\{[X - M(X)][Y - M(Y)]\}}{\sqrt{M(X^2) - [M(X)]^2} \sqrt{M(Y^2) - [M(Y)]^2}}, \quad (4)$$

где $M\{[X - M(X)][Y - M(Y)]\}$ – корреляционный момент рабочего парка и участковой скорости; $M(X)$, $M(Y)$ – математическое ожидание рабочего парка и участковой скорости соответственно.

Результаты расчетов сведены в таблицу.

Далее с помощью T -критерия [9] для каждой корреляционной пары была проверена значимость полученного коэффициента:

$$T = r_{xy} \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}. \quad (5)$$

Коэффициенты корреляции между участковой скоростью по железной дороге и рабочим парком

Показатель	Рабочий парк					
	на первом ТУ	на втором ТУ	на третьем ТУ	на четвертом ТУ	на пятом ТУ	на железной дороге
Участковая скорость по железной дороге	-0,75	-0,73	-0,79	-0,73	-0,74	-0,87

Примечание. ТУ – территориальное управление.



Рис. 2. Схема корреляционного влияния второго территориального управления на железную дорогу

Результаты выполненного корреляционного анализа показали, что рабочий парк на каждом территориальном управлении оказывает значимое влияние на участковую скорость по железной дороге. Но полученное выше уравнение регрессии говорит о другом влиянии второго территориального управления на участковую скорость по железной дороге.

На рис. 2 показана схема корреляционного влияния второго территориального управления на железную дорогу. Около стрелок приведены полученные коэффициенты корреляции. Как видно, имеет место значимое влияние, аналогичное влиянию других территориальных управлений.

Однако если рассмотреть взаимосвязь показателей эксплуатационной работы второго территориального управления и железной дороги, станет видно, что так как размеры движения грузовых поездов на втором территориальном управлении в разы меньше, чем на других территориальных управлениях, то меньше удельный вес и степень влияния территориального управления на показатели железной дороги.

Таким образом, значимое влияние рабочего парка второго территориального управления на участковую скорость по железной дороге стало следствием того, что увеличение данного рабочего парка явилось сопутствующим фактором увеличения рабочего парка на железной дороге в целом. На основании этого сделан вывод о наличии ложной корреляции [10].

Поэтому уравнение для определения участковой скорости по железной дороге при изменении рабочего парка территориальными управлениями составлено без учета второго территориального управления:

$$A = 68,637 - 0,00091t_1 - 0,00092t_3 - 0,00024t_4 - 0,00027t_5. \quad (6)$$

После составления нового уравнения регрессии был повторно проверен коэффициент детерминации. В результате исключения из уравнения регрессии второго территориального управления коэффициент детерминации не изменился, что подтверждает правильность сделанных выводов.

Результаты исследования

Алгоритм применения разработанной методики:

1. Собрать посutoчные данные об участковой скорости по железной дороге и рабочих парках по территориальным управлением за истекший год.
2. Проверить распределение полученных данных на соответствие нормальному закону.
3. Выполнить корреляционный анализ между участковой скоростью и рабочими парками.

4. Составить уравнение регрессии, оценивающее влияние рабочих парков по территориальным управлением на участковую скорость по железной дороге.

5. Определить потерю участковой скорости как разницу между участковой скоростью, полученной с использованием в уравнении регрессии заданных значений рабочих парков по территориальным управлением, и участковой скоростью, полученной с использованием фактических значений рабочих парков.

Вопрос автоматизации расчетов выходит за рамки выполненного исследования.

Для того чтобы оценить точность скорректированной методики, в уравнение регрессии были подставлены значения рабочего парка по территориальным управлением из базы данных. В результате в помесячном прогнозировании участковой скорости получена средняя погрешность 1 %. Ошибка составления прогноза показана на рис. 3.

Таким образом, при использовании рабочего парка по территориальным управлением вместо рабочего парка по железной дороге ошибка прогнозирования участковой скорости снижена в 2,5 раза.

Также важно, что при оперировании рабочим парком территориальных управлений снижена погрешность прогнозирования в «аномальные» месяцы, когда рабочий парк увеличивался из-за увеличения парка местных вагонов на одном из территориальных управлений.



Рис. 3. Ошибка прогнозирования участковой скорости

Выводы

На основании выполненного исследования можно заключить следующее:

1. Разбиение влияющего показателя (рабочего парка) на более мелкие составляющие повышает точность определения потерь и прогнозирования результирующего показателя (участковой скорости по железной дороге).
2. При совместном рассмотрении показателей эксплуатационной работы железнодорожного транспорта на различных уровнях (сеть –

железная дорога – территориальное управление – отдельные участки) необходимо учитывать возможность появления ложной корреляции.

3. Путем составления уравнения регрессии можно установить, на каком территориальном управлении увеличение рабочего парка оказывает самое большое влияние на участковую скорость по железной дороге. В соответствии с этим можно принимать правильныеправленческие решения при организации эксплуатационной работы.

Список источников

1. Маринин С. А. Методика определения потерь участковой скорости движения грузовых поездов в границах железной дороги // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (21). С. 187–198.
2. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
3. Лемешко Б. Ю. Непараметрические критерии согласия : руководство по применению. Москва : Инфра-М, 2014. 163 с.
4. Р 50.1.082–2012. Статистические методы. Примеры применения. Часть 4. Простые статистические приемы анализа данных : рекомендации по стандартизации : дата введения 01.12.2013 / Федеральное агентство по техническому регулированию. Москва : Московский печатник, 2013. 24 с.
5. Максимова Т. Г., Попова И. Н. Эконометрика. Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2018. 70 с.
6. Елисеева И. И., Юзбашев М. М. Общая теория статистики. Москва : Финансы и статистика, 2004. 656 с.
7. Rohadgi V. K., Ehsanes A. K. Md. An introduction to probability and statistics. New Jersey : John Wiley & Sons, 2015. 700 p.
8. Куликов Е. И. Прикладной статистический анализ. Москва : Горячая линия – Телеком, 2008. 464 с.
9. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва : Высшая школа, 2004. 479 с.
10. Носко В. П. Эконометрика : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по экономическим специальностям. Москва : Дело, 2011. Кн. 1, ч. 1, 2. 672 с.

References

1. Marinin S. A. Methodology for determining local speed losses of freight trains within the boundaries of a railway. *News of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*. 2024;(21):187–198. (In Russ.).
2. Kremer N. Sh. Theory of Probability and Mathematical Statistics. Moscow: UNITY-DANA; 2004. 573 p. (In Russ.).
3. Lemeshko B. Yu. Nonparametric goodness-of-fit tests. Instructions for use. Moscow: Infra-M; 2014. 163 p. (In Russ.).
4. R 50.1.082–2012. Statistical methods. Application examples. Part 4. Simple statistical techniques for data analysis: recommendations for standardization: date of introduction 01.12.2013. Federal Agency for Technical Regulation. Moscow: Moskovsky Pechatnik; 2013. 24 p. (In Russ.).
5. Maksimova T. G., Popova I. N. Econometrics. St. Petersburg: Information Technologies, Mechanics and Optics University; 2018. 70 p. (In Russ.).
6. Eliseeva I. I., Yuzbashev M. M. General theory of statistics. Moscow: Finance and Statistics; 2004. 656 p. (In Russ.).
7. Rohadgi V. K., Ehsanes A. K. Md. An introduction to probability and statistics. New Jersey: John Wiley & Sons; 2015. 700 p.
8. Kulikov E. I. Applied statistical analysis. Moscow: Hotline – Telecom; 2008. 464 p. (In Russ.).
9. Gmurmam V. E. Probability theory and mathematical statistics. Moscow: Higher School; 2004. 479 p. (In Russ.).
10. Nosko V. P. Econometrics. Textbook for students of higher educational institutions studying in economic specialities. Moscow: Delo; 2011. Book 1, part 1, 2. 672 p. (In Russ.).

Информация об авторе

С. А. Маринин – кандидат технических наук, начальник отдела технического регулирования, лицензирования и качества службы технической политики Горьковской железной дороги.

Information about the author

S. A. Marinin – Candidate of Engineering, Head of the Technical Regulation, Licensing and Quality of the Technical Policy Service Department, Gorky Railway.

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 25.11.2024; принята к публикации 13.01.2025.

The article was submitted 18.11.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 13.01.2025.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 504.61

doi 10.52170/1815-9265_2025_73_12

Распространение звуковой волны с учетом архитектурно-планировочных и рельефных особенностей местности в районе станции И

**Вера Львовна Павлова^{1✉}, Владимир Ильич Медведев², Марина Юрьевна Квант³,
Дарья Леонидовна Косарева⁴, Елена Анатольевна Калиниченко⁵**

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

¹ p_v_75@mail.ru[✉]

² medvedevvi2017@yandex.ru

³ kvintmu@stu.ru

⁴ darik_n@mail.ru

⁵ kalinka717@mail.ru

Аннотация. В работе исследуется акустическое загрязнение селитебных территорий от сортировочной горки железнодорожной станции *И* с целью снижения негативного воздействия шума на население. В рамках поиска приемлемых решений этой задачи рассматриваются особенности генерации звука в источнике и специфика распространения шума на территории.

Процесс роспуска подвижного состава, а особенно генерация звука в момент прохождения обода колеса через тормозную позицию, является основной причиной значительного акустического загрязнения прилегающей зоны жилой застройки. Скорость и расстояние передачи звука зависят от многих факторов: периода года, времени суток, температуры и влажности воздуха, наличия рядом водоема и отражающих акустическую волну преград, архитектурно-планировочной организации территории, рельефа местности.

Ранее мы рассматривали особенности распространения звуковой волны при различных атмосферных состояниях. Данная статья посвящена изучению влияния рельефа местности и архитектурного плана территории на интенсивность акустического загрязнения селитебной территории.

Высота расположения источника шума и объектов защиты (жилые дома) во многом определяет конфигурацию и конструкцию защитных экранов – искусственных преград на пути распространения звуковой волны. Основной задачей является построение изолиний, наглядно отображающих зоны соответствия (несоответствия) предельно допустимым уровням шума непосредственно на карте местности. Для этого использовался программный модуль «ЭРА-шум», позволяющий на основании проведенных измерений построить карты-схемы. Они являются основой для проектирования защитных экранов на местности: правильного расположения экрана; его размера, высоты и конфигурации; материалов конструкции. Дополнительное затухание звуковой волны можно обеспечить за счет повышения защищенности самого объекта – шумопоглощающей облицовки лицевой стороны зданий, шумозащитных жалюзи и др.

Результаты работы могут быть использованы при создании комплексных проектов системы защиты от шума, которые могут включать в себя защиту в источнике возникновения и на пути распространения, а также повышение защищенности объектов селитебной территории (жилых и общественных зданий). Выбор необходимой комбинации защиты напрямую может зависеть от рельефа и архитектурно-планировочной организации местности.

Ключевые слова: звуковая волна, шум, железнодорожный транспорт, шумозащитные экраны, затухание шума

Для цитирования: Распространение звуковой волны с учетом архитектурно-планировочных и рельефных особенностей местности в районе станции И / В. Л. Павлова, В. И. Медведев, М. Ю. Квант, Д. Л. Косарева, Е. А. Калиниченко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 12–21. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_12.

TRANSPORT

Original article

Sound wave propagation taking into account architectural-planning and relief features terrain in the area of I station

Vera L. Pavlova^{1✉}, Vladimir I. Medvedev², Marina Yu. Kvint³, Daria L. Kosareva⁴, Elena A. Kalinichenko⁵

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

¹ p_v_75@mail.ru✉

² medvedevi2017@yandex.ru

³ kvintmu@stu.ru

⁴ darik_n@mail.ru

⁵ kalinka717@mail.ru

Abstract. The paper studies acoustic pollution of residential areas from the sorting slide of the railway station / in order to reduce the negative impact of noise on the population. As part of the search for acceptable solutions to this problem, the features of sound generation in the source and the specifics of noise propagation in the territory are considered.

The process of disbanding rolling stock, and especially the sound generation at the moment of passing the wheel rim through the braking position, is the main cause of significant acoustic pollution of the adjacent residential area. The speed and distance of sound transmission depends on many factors – the period of the year, the time of day, the temperature and humidity of the air, the presence of a reservoir nearby, the presence of barriers reflecting the acoustic wave, the architectural and planning organization of the territory, and the terrain.

Previously, we considered the features of sound wave propagation in various atmospheric conditions. In this article, we will consider how the terrain and the architectural plan of the territory affect the intensity of acoustic pollution of the residential area.

The height of location of the noise source and protection facilities (residential buildings) largely determine the configuration and design of protective screens – artificial barriers to the propagation of a sound wave. The main task is to construct isolines that visually display the zones of compliance (non-compliance) with the maximum permissible noise levels directly on the terrain map. To do this, the ERA-noise software module was used, which allows you to build map diagrams based on the measurements. They are the basis for designing protective screens on the ground: the correct location of the screen, the size, height and configuration of the screen, construction materials. Additional attenuation of the sound wave can be provided by increasing the security of the object itself – noise-absorbing cladding of the front side of buildings, noise-proof blinds and other means of protection.

The results of the work can be used to create comprehensive noise protection system projects, which may include protection at the source of occurrence and along the path of propagation, as well as improving the security of residential areas (residential and public buildings). The choice of the necessary protection combination may directly depend on the terrain and architectural and planning organization of the area.

Keywords: sound wave, noise, railway transport, noise shields, noise attenuation

For citation: Pavlova V. L., Kalinichenko E. A., Medvedev V. I., Kvint M. Yu., Kosareva D. L. Sound wave propagation taking into account architectural-planning and relief features terrain in the area of I station. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):12–21. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_12.

Введение

Коллективом авторов исследуется акустическое загрязнение селитебных территорий от сортировочной горки железнодорожной станции *I* с целью снижения негативного воздействия шума на население. В рамках поиска приемлемых решений этой задачи рассматриваются особенности генерации звука в источнике и специфика распространения шума на территории. Железнодорожная станция *I* по основному назначению и характеру выполняемой работы является двусторонней сортировочной станцией с последовательным расположением парков и параллельным расположением систем, по объему работы отнесена к внеклассной. Для расформирования и формирования поездов на станции имеются две автоматизированные

горки большой мощности. Процесс роспуска подвижного состава, а особенно генерация звука в момент прохождения обода колеса через тормозную позицию, является основной причиной значительного акустического загрязнения прилегающей зоны жилой застройки [1, 2].

Скорость и расстояние передачи звука зависят от многих факторов: периода года, времени суток, температуры и влажности воздуха, наличия рядом водоема и отражающих акустическую волну преград, архитектурно-планировочной организации территории, рельефа местности [3–5].

Ранее мы рассматривали особенности распространения звуковой волны при различных атмосферных состояниях [1, 3]. Данная статья посвящена изучению того, как влияют рельеф

местности и архитектурный план территории на интенсивность акустического загрязнения селитебной территории.

Постановка задачи

Сортировочная станция *I* расположена в городе *H*, недалеко от реки *I*. Станция находится на возвышенности. Максимальная точка на территории станции приходится на горку роспуска подвижного состава и имеет высоту 127 м над уровнем моря. Высота расположения первой тормозной позиции, рядом с которой проводились измерения и которая находится ближе всего к зоне жилой застройки, составляет 125 м. Со стороны жилого квартала располагается четырехполосная автомобильная дорога, которая идет вдоль железнодорожных путей на протяжении всей территории станции. Автомобильная дорога довольно оживленная в дневное время, немалая доля шумового воздействия на селитебную территорию обусловлена движением автотранспорта. Высота дороги над уровнем моря составляет 122–123 м. По другую сторону вдоль автодороги расположены жилые пятиэтажные кирпичные дома и общественные здания. Высота в этих точках составляет 121–122 м. За жилым кварталом протекает река *I* (96 м над уровнем моря), которая, особенно в ночное

время, является дополнительным источником увеличения звука из-за высокой отражающей способности водной поверхности. Точки высоты на местности и рельеф представлены на рис. 1.

В исследовании рассматривается шум от вагонных замедлителей нечетной сортировочной горки, так как вдоль нечетного парка станции расположена селитебная территория с общественными зданиями, которая находится в понижении рельефа, в направлении поймы реки *I*. Именно в этом месте расстояние от тормозной позиции до селитебной территории минимально: 126 м.

В 2023 г. вдоль территории нечетной сортировочной горки был возведен шумозащитный экран длиной 340 м и высотой 6 м. Шумозащитный экран расположен за железнодорожной платформой и перед автомобильной дорогой. Высота над уровнем моря в этой точке 126 м. Экран представляет собой сооружение из перфорированных стальных панелей с наполнением из минеральной ваты толщиной 100 мм. С наружной стороны (автодорога) перфорация не выполнена. На рис. 2 представлен натурный вид экрана на территории станции.

Высота пятиэтажных зданий, расположенных в первом ряду, приближенном к станции, составляет 15 м.



Рис. 1. Точки высоты на местности и рельеф территории рядом со станцией *I*:
1 – сортировочная горка; 2 – первая горочная тормозная позиция; 3 – автодорога;
4 – селитебная территория; 5 – река *I*



Рис. 2. Шумозащитный экран на территории станции I

По результатам анализа высот на точках местности, архитектурно-планировочных особенностей территории и с учетом габаритных размеров экрана получаем следующее:

1) источником излучения следует считать верхнюю кромку экрана, при этом высота над уровнем моря составит 132 м (126 + 6);

2) окна пятого этажа ближайшего здания расположены на высоте 135,5 м (122 + 13,5).

Таким образом, окна верхних этажей жилых домов и часть окон расположенных ниже этажей (из-за огибания препятствий звуковыми волнами) не находятся в зоне акустической тени.

Исходя из полученных результатов анализа архитектурно-планировочной застройки и рельефа местности, произведем расчет распространения шума от внешних источников (тормозная позиция) и подготовим карту-схему местности с изолиниями, отражающими распространение звуковых волн на местности с учетом различных видов препятствий и ограждающих конструкций. Для этого используем программу «ЭРА-шум».

Методы исследования

Программный модуль «ЭРА-шум» может работать как самостоятельная программа и как интегрированный модуль с позицией 1.1 «ЭРА-УПРЗА», используется для расчета затухания шума на местности в зависимости от реальных препятствий и составления карты-схемы звуковых волн.

«ЭРА-шум» предназначен для расчета распространения шума от внешних источников, с выпуском подробных результатов в текстовом виде; подготовки карт-схем местности (включает развитые средства ввода данных, в том

числе об источниках шума, различных видах препятствий и ограждающих конструкциях, а также растровые картинки, полученные с помощью сканера); выпуска графических результатов расчетов ожидаемых уровней шума в нормируемых точках (на границе санитарно-защитных сооружений, в жилой зоне и др.); построения расчетной (предварительной) санитарно-защитной зоны по фактору акустического воздействия.

Для расчета затухания шума в программном модуле используется метод, приведенный в ГОСТ 31.295.1–2005 [6]. Стандарт устанавливает метод расчета затухания звука вследствие поглощения его при распространении в атмосфере при различных метеорологических условиях. Затухание звука чистого тона характеризуется коэффициентом затухания, зависящим от частоты тона, температуры и относительной влажности воздуха, атмосферного давления. Результаты расчета коэффициента затухания представляют в табличной форме для следующих условий:

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

Стандарт применим для однородной атмосферы, но может быть использован для определения поправок к измеренным уровням звукового давления, чтобы учсть влияние изменения метеорологических условий на поглощение звука. В стандарте рассмотрены основные механизмы звукопоглощения атмосферой при отсутствии густого тумана или механических загрязнений [1, 6].

Общая информация о компьютере и системе.	
Операц. система:	Windows 7 Home Premium Service Pack 1 x64 (6.1.7601)
Процессор:	Intel (R) Core (TM) i3-2350M CPU @ 2.30GHz
Видеорежим:	1366*768*True Color; Доступно: 1366*662
Электронный ключ:	Sign\Time USB ID: 942834666 Драйвер: 7.148.0
Антивирус:	Avast Antivirus: 21.4.6162.0
Текущая папка:	C:\ERA.N\0 START
Текущий диск:	всего 223.5 Гб; свободно 9.3 Гб (NTFS)
Оперативная память:	4 Гб
<hr/>	
ЭРА версия 2.5, сборка 372, ноябрь 2017	
(С) 1998-2018 ООО НПП "Логос-Плюс", Новосибирск.	
Тел.\факс:	(383) 362-05-05, 362-05-06
EMail:	era@logos-plus.ru
Internet:	www.logos-plus.ru
Авторский коллектив:	Коллектив НПП "Логос-Плюс"

Рис. 3. Требования к операционным системам при использовании программного модуля «ЭРА-шум»

Требования к операционным системам и компьютерам при использовании программного модуля приведены на рис. 3. При работе программный модуль учитывает указания действующих нормативно-технических документов [6–9].

Результаты исследований

Введенные в программный модуль исходные данные, полученные путем измерений уровня звукового давления у первой тормозной позиции, легли в основу построения изолиний на карте-схеме местности в исследуемом районе. Результаты расчетов представлены в таблице.

Анализ табличных данных показывает, что на частотах, начиная с 500 Гц, наблюдается значительное превышение предельно допустимого уровня звукового давления (почти

на 100 %). Расчетные значения подтверждаются произведенными измерениями на территории жилой застройки и в дневное, и в ночное время. Карты-схемы по результатам расчетов представлены на рис. 4.

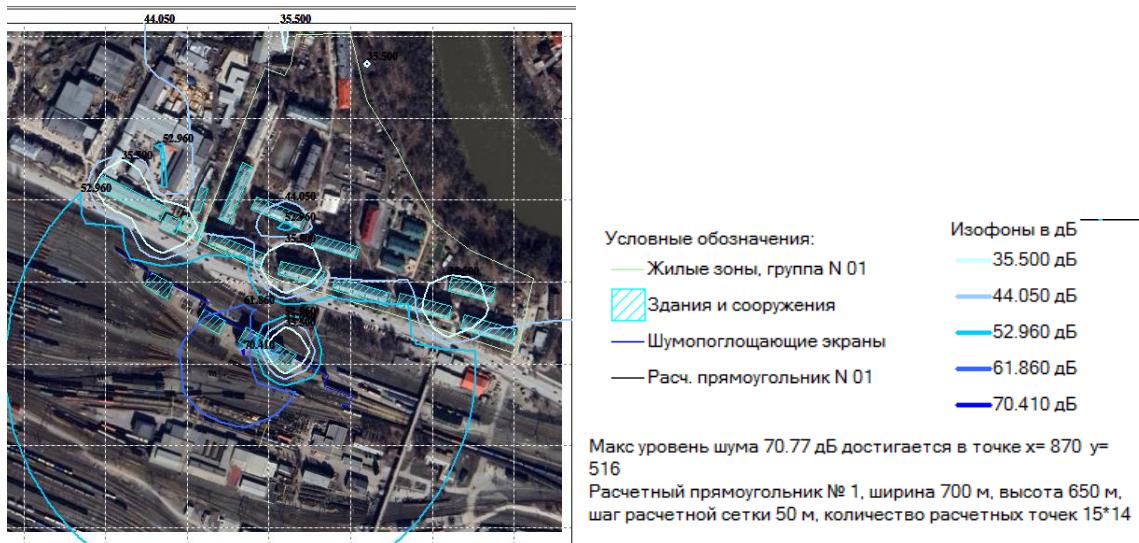
Составление карт-схем позволяет наглядно увидеть распространение звуковой волны на местности с учетом препятствий и перепада высот, а также превышение норм ПДУ звукового давления для селитебных территорий. На основании расположения изофонов можно давать рекомендации по размещению на территории звукопоглощающих экранов. Наглядное изображение звуковой волны позволяет рационально подходить к проектированию системы защиты от шума на конкретной местности.

Результаты расчетов затухания шума программой «ЭРА-шум»

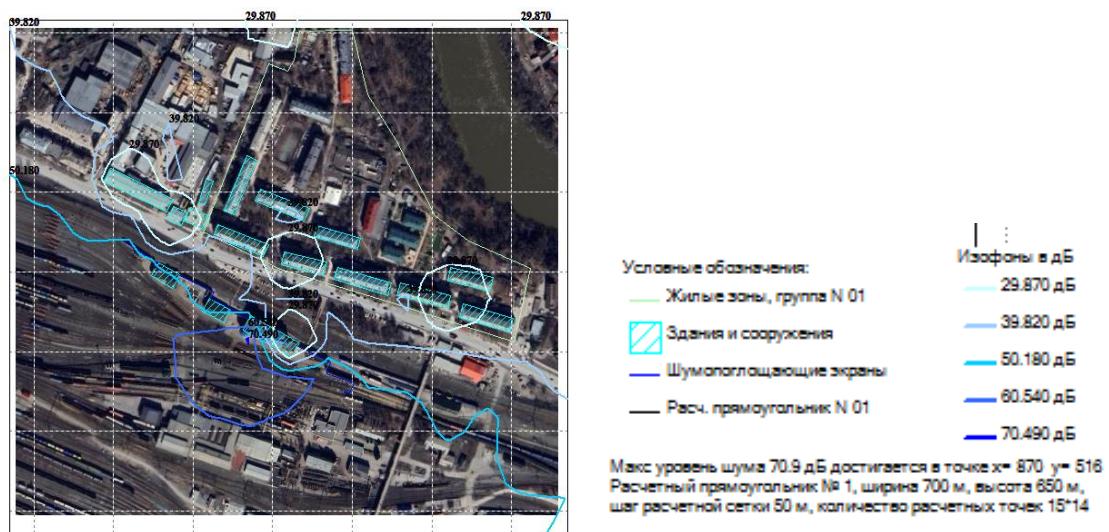
Точка измерения	Среднегеометрическая частота, Гц	Координаты расчетных точек, м			Макс. уровень, дБА	Норматив, дБА	Превышение, дБА	Уровень фона, дБА
		X	Y	Z (высота)				
1	31,5	870	516	1,5	71	90	–	–
2	63	870	516	1,5	71	75	–	–
3	125	870	516	1,5	63	66	–	–
4	250	870	516	1,5	59	59	–	–
5	500	870	516	1,5	58	54	4	–
6	1 000	870	516	1,5	59	50	9	–
7	2 000	870	516	1,5	90	47	43	–
8	4 000	870	516	1,5	88	45	43	–
9	8 000	870	516	1,5	72	44	28	–
10	Экв. уровень	870	516	1,5	94	55	39	–
11	Макс. уровень	–	–	–		70	–	–

Примечание. При расчетах фон не учитывается; превышение определяется по нормативу с 7 до 23 ч.

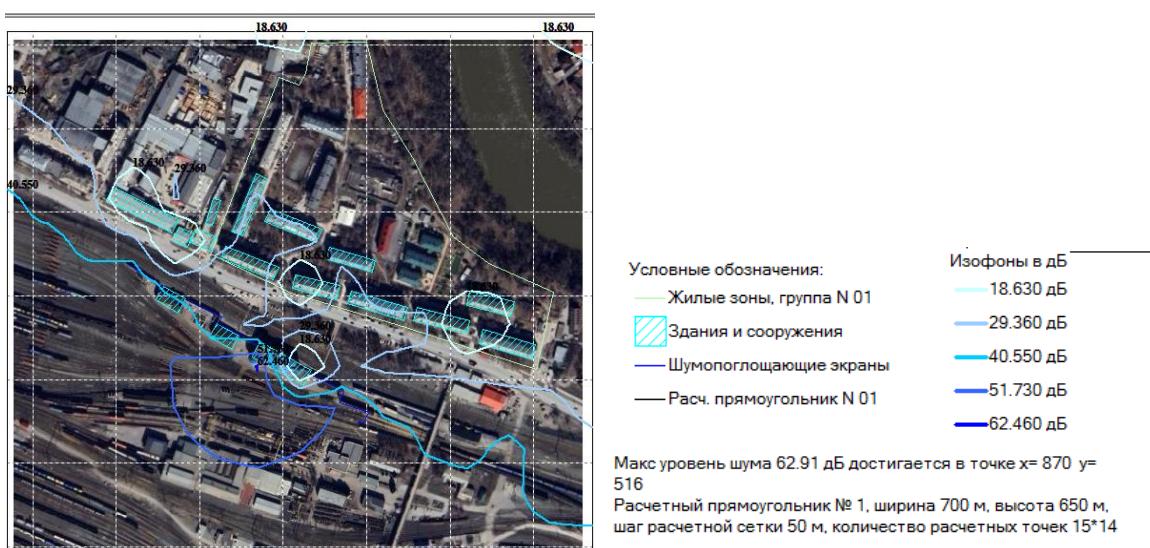
a)



б)

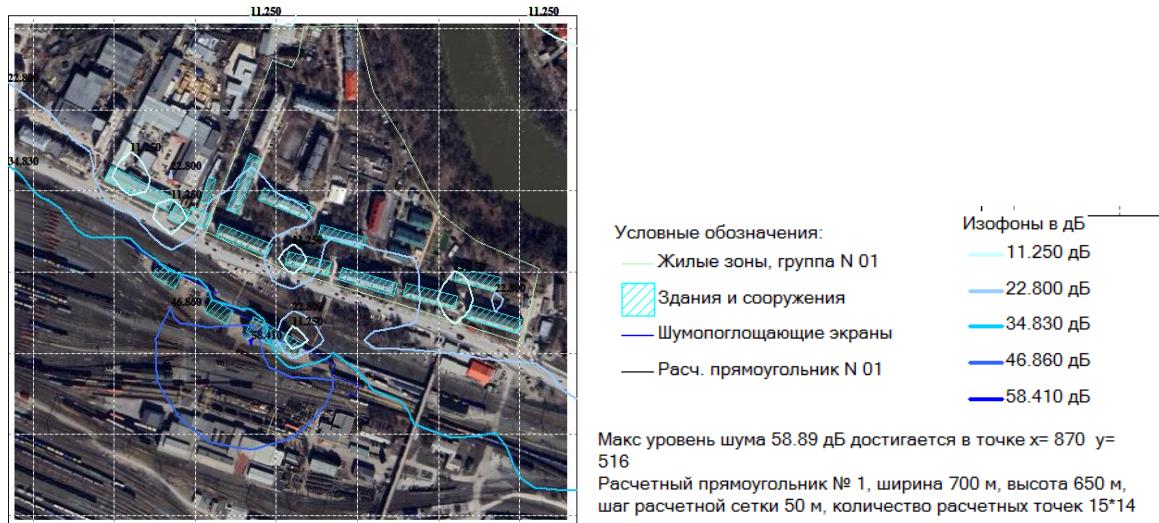


в)

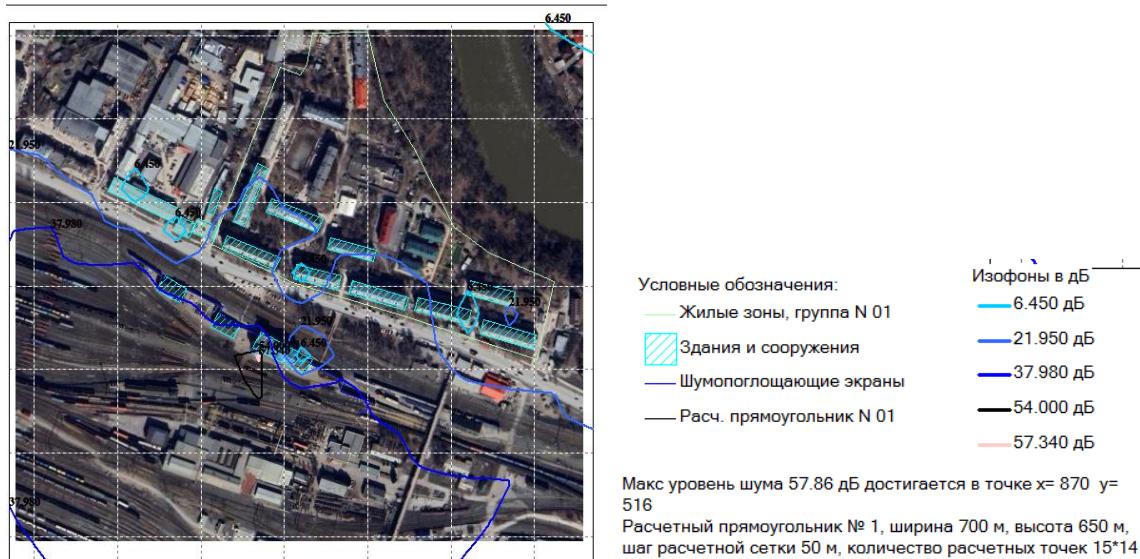


*Рис. 4. Карта-схема звуковых волн (начало):
а – на частоте 31,5 Гц; б – на частоте 63 Гц; в – на частоте 125 Гц*

2)



δ)



ε)

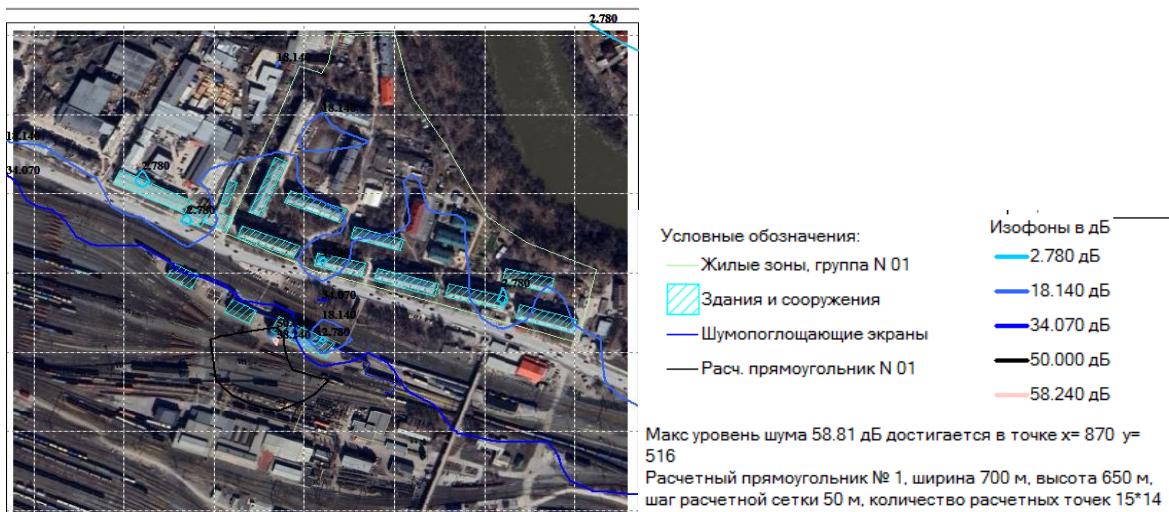
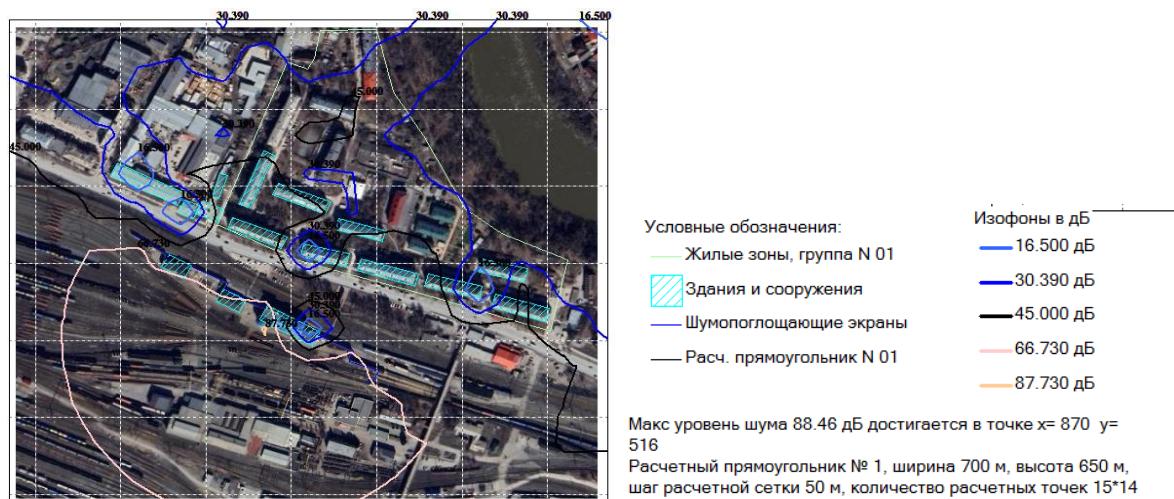


Рис. 4. Карта-схема звуковых волн (продолжение):
2 – на частоте 250 Гц; δ – на частоте 500 Гц; ε – на частоте 1 000 Гц

жс)



и)



к)

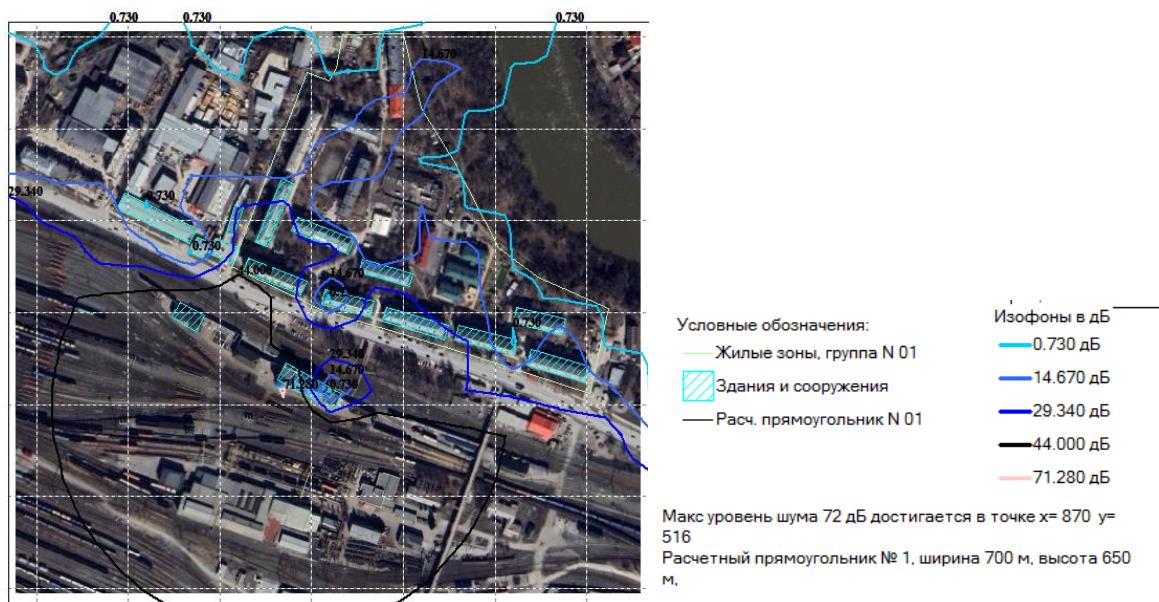


Рис. 4. Карта-схема звуковых волн (окончание):
жс – на частоте 2 000 Гц; и – на частоте 4 000 Гц; к – на частоте 8 000 Гц

Выводы

1. По результатам анализа архитектурно-планировочных и рельефных особенностей местности в районе станции *И* источником шумового излучения является верхняя кромка установленного шумозащитного экрана (высота над уровнем моря 132 м).

2. Окна верхних этажей жилых домов и расположенных чуть ниже (из-за огибания препятствиями волнами) не находятся в зоне акустической тени, поскольку окна пятого этажа помещаются на высоте 136 м над уровнем моря.

3. По результатам расчетов, выполненных с помощью программного модуля «ЭРА-шум», в расчетной точке с указанными в таблице координатами наблюдается превышение предельно допустимого уровня звукового давления, начиная с частоты 500 Гц. На частотах 4 000 и 8 000 Гц превышение составляет почти 100 %.

4. Результаты проведенных исследований говорят о том, что необходимо внести изменения в конструкцию существующего шумозащитного экрана, например спроектировать надстройку на экран, позволяющую улавливать звуковую волну, падающую на окна верхних этажей. Возможно изменение формы и конструкции экрана, расчет вогнутых секций для повышения эффективности звукопоглощения.

5. Рекомендуется использовать дополнительные средства защиты (шумозащитные жалюзи и пластиковые окна) [10, 11] в тех квартирах, где они не установлены, а также установить бризеры для проветривания квартир без открывания окон. Для увеличения звукопоглощающего эффекта фасады защищаемых зданий можно покрывать шумозащитными фибролитовыми панелями или звукопоглощающей штукатуркой.

Список источников

1. Затухание шума на территории жилой застройки вблизи станции И при различных атмосферных состояниях / В. Л. Павлова, Е. А. Калиниченко, И. В. Пирумова, И. А. Селюнин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5 (72). С. 45–52.
2. Рекомендации по выбору шумозащитных мероприятий для защиты от шума железной дороги / А. В. Шабарова, С. С. Борцова, М. В. Бугорина, С. А. Кондратьев // Noise Theory and Practice. 2023. № 4 (35). С. 39–50.
3. Comparative analysis of noise reduction methods in car braking process on classification hump yards / E. A. Kalinichenko, I. V. Pirumova, R. G. Akhtyamov, V. V. Bondarenko // Transportation Research Procedia. 2022. No. 62. P. 526–531.
4. Павлова В. Л., Пирумова И. В., Калиниченко Е. А. Технико-экономическая эффективность систем защиты селитебных территорий от шума вагонных замедлителей // Вопросы новой экономики. 2022. № 1 (61). С. 80–86.
5. Защита селитебных территорий от шума сортировочной станции / Е. А. Калиниченко, И. В. Пирумова, А. А. Басалаева, В. Л. Павлова // Железнодорожный транспорт. 2022. № 5. С. 42–45.
6. ГОСТ 31.295.1–2005. Шум. Затухание звука при распространении на местности : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 июля 2006 г. № 134-ст // Гарант : информационно-правовое обеспечение. URL: <https://base.garant.ru/70409744/?ysclid=m2v6qfb3y449815796> (дата обращения: 12.12.2024).
7. МУК 4.3.3722–21. Контроль уровня шума на территории жилой застройки, в жилых и общественных зданиях и помещениях // Гарант : информационно-правовое обеспечение. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403287707/?ysclid=m2v6ltge4r961051563> (дата обращения: 12.12.2024).
8. СанПиН 2.1.3684–21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организаций и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий // Гарант : информационно-правовое обеспечение. URL: <https://base.garant.ru/400289764/?ysclid=m2v7426rme402584654> (дата обращения: 12.12.2024).
9. ГОСТ 23337–78. Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий : срок введения установлен Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 9 октября 1978 г. № 194 с 01.07.1979 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901708144?ysclid=m5nn94k06o249783977> (дата обращения: 10.12.2024).
10. СП 1.1.1058–01. Организация и проведение производственного контроля за соблюдением санитарных правил и выполнением санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий // Консультант-Плюс : надежная правовая поддержка. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33872/ (дата обращения: 11.12.2024).

11. О защите прав потребителей : Закон Российской Федерации от 07.02.1992 № 2300-1 : (ред. от 08.08.2024) // КонсультантПлюс : надежная правовая поддержка. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_305/?ysclid=m2v763baic872458787 (дата обращения: 12.12.2024).

References

1. Pavlova V. L., Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Selyunin I. A. Noise attenuation in residential buildings near the station and under various atmospheric conditions. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2024;(72):45–52. (In Russ.).
2. Shabarova A. V., Bortsova S. S., Butorina M. V., Kondratiev S. A. Recommendations on the choice of noise protection measures to protect against railway noise. *Noise Theory and Practice.* 2023;(35):39–50. (In Russ.).
3. Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Akhtyamov R. G., Bondarenko V. V. Comparative analysis of noise reduction methods in car braking process on classification of hump yards. *Transportation Research Procedure.* 2022;(62):526–531.
4. Pavlova V. L., Pirumova I. V., Kalinichenko E. A. Technical and economic efficiency of systems for protecting residential areas from the noise of wagon retarders. *Issues of New Economy.* 2022;(61):80–86. (In Russ.).
5. Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Basalaeva A. A., Pavlova V. L. Protection of residential territories from noise of the marshalling yard. *Railway Transport.* 2022;(5):42–45. (In Russ.).
6. GOST 31.295.1–2005. Noise. Attenuation of sound when propagating on the ground: enacted by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from 20.07.2006 № 134-st. *Garant: information-legal support.* (In Russ.). URL: <https://base.garant.ru/0409744/?ysclid=m2v6qfb3y449815796>.
7. Methodological guidelines of MUK 4.3.3722–21. Noise level control on the territory of residential development, in residential and public buildings and premises. *Garant: information and legal support.* (In Russ.). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403287707/?ysclid=m2v6ltge4r961051563>.
8. SanPiN 2.1.3684–21. Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of the territories of urban and rural settlements, water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, living quarters, operation of industrial and public premises, organization and conduct of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures. *Garant: information and legal support.* (In Russ.). URL: <https://base.garant.ru/400289764/?ysclid=m2v7426rme402584654>.
9. GOST 23337–78. Noise. Methods of noise measurement on the residential area and in the premises of residential and public buildings: the term of introduction is established by the Decree of the USSR State Committee for Construction from 09.10.1978 № 194 from 01.07.1979. *Electronic fund of legal and normative-technical documents.* Methods for measuring noise in residential areas and in residential and public buildings. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901708144?ysclid=m5nn94k06o249783977>.
10. SP 1.1.1058–01. The organization and carrying out of industrial control over observance of sanitary rules and performance of sanitary anti-epidemic (preventive) measures. *ConsultantPlus: reliable legal support.* (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33872.
11. About protection of the rights of consumers. The Law of the Russian Federation from 07.02.1992 № 2300-1: (edition from 08.08.2024). *ConsultantPlus: reliable legal support.* (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_305/?ysclid=m2v763baic872458787.

Информация об авторах

- В. Л. Павлова – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.
- В. И. Медведев – доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.
- М. Ю. Квинт – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.
- Д. Л. Косарева – кандидат биологических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.
- Е. А. Калиниченко – аспирант, старший преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

- V. L. Pavlova – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Life Safety Department, Siberian Transport University.
- V. I. Medvedev – Doctor of Engineering, Professor of the Life Safety Department, Siberian Transport University.
- M. Yu. Kvint – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Life Safety Department, Siberian Transport University.
- D. L. Kosareva – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Life Safety Department, Siberian Transport University.
- E. A. Kalinichenko – Postgraduate, Senior Lecturer of the Life Safety Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена после рецензирования 20.01.2025; принята к публикации 31.01.2025.

The article was submitted 09.01.2025; approved after reviewing 20.01.2025; accepted for publication 31.01.2025.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.223

doi 10.52170/1815-9265_2025_73_22

Оперативное планирование парка поездных локомотивов грузового движения с учетом отдельных факторов

Лариса Сергеевна Жарикова^{1✉}, Ольга Павловна Югрина²

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

¹ zharikovals@mail.ru[✉]

² yugrinaop@yandex.ru

Аннотация. Для успешной организации перевозочного процесса необходимо обеспечить рациональную эксплуатацию тяговых ресурсов. Размеры требуемого парка локомотивов грузового движения определяются при разработке плановых технических норм на месяц в среднесуточном исчислении. В связи с перестройкой логистики и неравномерностью перевозок использование плановых технических норм затруднительно, поскольку даже незначительное повышение объемов грузоперевозок может привести к избытку или недостатку локомотивного парка на участках. Грамотная реализация объективной методики оперативного управления позволяет качественно выполнять грузовую и поездную работу с минимальными эксплуатационными затратами. Поэтому крайне важно определить возможные варианты оперативного планирования тяговых ресурсов, выполнение которых приведет к эффективной эксплуатации локомотивов, а также к своевременной постановке тягового подвижного состава на техническое обслуживание, ремонты и экипировку. Выполненный авторами анализ статистических данных за длительный период показал, что существующая методика расчета показателей оперативного планирования локомотивного парка не учитывает отдельные факторы, влияющие на определение реальных размеров требуемого локомотивного парка.

В статье рассмотрены реальные примеры организации работы корпоративного локомотивного парка в пределах Западно-Сибирской железной дороги. При планировании перевозок не учитывается место нахождения станции погрузки на Кузбассе, а вследствие этого и расстояние, проходимое порожним, а потом груженым составом, так как следование поездопотоков производится не всегда по кратчайшему пути (в зависимости от оперативной обстановки).

Также следует уделить внимание отставленным от движения поездам. Наиболее распространенными причинами, по которым поезда отставляют на станциях Западно-Сибирской железной дороги, являются простота поездов на промежуточных станциях более 6 ч, неприем поездов грузополучателями, а также отсутствие локомотива перевозчика. Большое скопление таких составов на станциях может привести к трудностям при пропуске поездов и дополнительной работе локомотивного парка.

Целью исследования является определение зависимости объемов требуемого локомотивного парка от изменения организации его использования в грузовом движении с учетом дополнительных факторов.

Было установлено, что при оперативном планировании поездной работы в грузовом движении с помощью автоматизированных программ системы «ПРОГРЕСС» на основании расчетов оборота локомотивов используемым повсеместно аналитическим методом не учтены дополнительные составляющие затрат времени, связанные со сложившейся на полигоне оперативной обстановкой. Предложено дополнить методику определения оборота локомотивов элементами, учитывающими реальную ситуацию, в частности дополнительную работу локомотивного парка.

Ключевые слова: локомотивный парк грузового движения, оборот локомотива, аналитический метод, полигон работы корпоративного локомотивного парка

Для цитирования: Жарикова Л. С., Югрина О. П. Оперативное планирование парка поездных локомотивов грузового движения с учетом отдельных факторов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 22–28. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_22.

TRANSPORT

Original article

Operational planning of a freight train locomotive fleet taking into account certain factors

Larisa S. Zharikova^{1✉}, Olga P. Yugrina²

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

¹ zharikovals@mail.ru[✉]

² yugrinaop@yandex.ru

Abstract. For the successful organization of the transportation process, it is necessary to ensure the rational use of traction resources. The size of the required fleet of freight locomotives is determined during the development of technical standards for the planned month on an average daily basis. Due to the existing restructuring of logistics and uneven transportation, the use of planned technical standards is difficult. Because even a slight increase in freight traffic can lead to an excess or shortage of locomotive fleet on the sites. The use of an objective operational management methodology, as well as its competent implementation, is the beginning of high-quality freight and train work with minimal operating costs. Therefore, it is extremely important to identify possible options for operational planning of traction resources, the implementation of which leads to efficient operation of locomotives, as well as timely installation of traction rolling stock for maintenance, repairs and equipment. The authors' analysis of statistical data over a long period has shown that the existing methodology for calculating operational fleet planning indicators does not take into account individual factors affecting the determination of the actual size of the required locomotive fleet.

The article considers real examples of the organization of the corporate locomotive fleet within the West Siberian Railway. The location of the loading station in Kuzbass, and therefore the distance travelled by empty and then loaded trains, is not taken into account when planning transportation, as train flows do not always follow the shortest route (depending on the operational situation).

Attention should also be paid to so-called delayed trains. The most common reasons why trains are delayed at stations of the West Siberian Railway are downtime of trains at intermediate stations for more than 6 hours, non-acceptance of trains by the consignees, as well as the absence of a locomotive carrier. A large accumulation of such trains at stations can lead to difficulties in passing trains and additional work of the locomotive fleet.

The purpose of the study is to determine the dependence of the volume of the required locomotive fleet on changes in the organization of its use in freight traffic, taking into account additional factors.

It was found that during the operational planning of train operations in freight traffic using automated programs of the PROGRESS system, based on calculations of locomotive turnover using the analytical method used everywhere, additional time components were not taken into account, taking into account the current operational situation at the landfill. It is proposed to supplement the methodology for determining the turnover of locomotives with elements that take into account the real situation and take into account the additional work of the locomotive fleet.

Keywords: freight locomotive fleet, locomotive turnover, analytical method, corporate locomotive fleet operation range

For citation: Zharikova L. S., Yugrina O. P. Operational planning of a freight train locomotive fleet taking into account certain factors. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2025;(73):22–28. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_22.

Введение

Железнодорожный транспорт является ключевым в нашей стране, выступая двигателем прогресса экономики и процветания самых отдаленных регионов, а также обеспечивая безопасность как часть оборонно-промышленного комплекса России. Железнодорожный транспорт дает толчок развитию и строительству городов, открывает перспективы. Крайне важно обеспечить дальнейшее развитие этого вида транспорта, используя грамотный подход и управление совместно с достижениями науки и техники в данной области [1]. Локомотивное хозяйство выполняет важную роль в структуре предприятий железнодорожного транспорта, обеспечивая своевременное техническое обслуживание, ремонт и экипировку тягового подвижного состава. Для решения перечисленных проблем используется оперативное планирование, позволяющее рационально эксплуатировать тяговые ресурсы каждые сутки [2–4].

Объемы перевозок на рассчитанный период, а также запасы перевозочных ресурсов определяются при нормировании показателей эксплуатационной работы. При значительном росте грузонапряженности и несоответствии

наличной и потребной пропускной способности особо важную роль выполняет рациональная дислокация локомотивов на участках железной дороги, от этого зависит выполнение поставленных задач технического нормирования совместно с оперативным планированием [5, 6].

Исходя из объемов планируемых поездопотоков на основании данных о планируемых вагонопотоках для стабильного и бесперебойного движения необходимо верное вычисление потребности эксплуатируемого парка грузовых локомотивов. Данный расчет выполняется аналитическим методом с учетом затрат времени на все операции для всех локомотивных депо на полигоне, и именно показатель оборота локомотивов влияет на дальнейший ход таких расчетов. По этим данным определяется полный оборот локомотива и соответствующий ему коэффициент потребности на пару поездов (следование в четном направлении и обратно – в нечетном). Итоговый расчет выполняется путем умножения коэффициента потребности рассматриваемого парка локомотивов на планируемое количество пар поездов. Данный метод расчета используется на практике [6–8].

Материалы и методы исследования

Полный оборот локомотива – это время, расходуемое локомотивом на обслуживание одной пары поездов на участке обращения. Полный оборот локомотива можно разложить на следующие элементы: время в пути, время простоя в основном и в обратном депо для проведения ТО-2 и экипировки, время простоя при смене локомотивных бригад [9].

Время оборота локомотива определяется по формуле

$$T_{\text{об}}^{\text{лок}} = \sum T_{\text{дв}} + T_{\text{осн}} + T_{\text{об}} + \sum T_{\text{см}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{дв}}$ – время, которое локомотив находится в движении в обоих направлениях, включая стоянки на промежуточных станциях, ч; $T_{\text{осн}}$ – простой локомотива в пункте основного депо, ч; $T_{\text{об}}$ – простой локомотива в пункте обратного депо, ч; $T_{\text{см}}$ – простой локомотива на станции смены локомотивных бригад, ч.

Для более точного расчета парка локомотивов нужно определить дополнительные работы, выполняемые локомотивами, и вычислить затраты времени на них. При этом предлагаются учитывать следующие факторы:

1. Затраты времени на проследование грузовых поездов по разным ходам полигона.
2. Влияние отставленных от движения поездов на расчет локомотивного парка.

При планировании перевозок не учитывается место нахождения станции погрузки на Кузбассе, а вследствие этого и расстояние, проходимое порожним, а потом груженым составом. Использование для расчетов затрат времени по участкам нормативного графика движения грузовых поездов представляется некорректным, так как следование поездопотоков производится не всегда по кратчайшему пути (в зависимости от оперативной обстановки). Поэтому затраты локомотивного парка в разные сутки планируемого месяца могут отличаться значительно (в соответствии со сложившейся поездной обстановкой).

При оперативном планировании следует учитывать направление поездопотока по Транссибирскому ($T_{\text{ход}}$) или Среднесибирскому ходу ($C_{\text{ход}}$) в западном направлении. На Среднесибирском ходу используются локомотивы переменного тока, полигон их применения ограничен ст. Артышта-II, Иртышское и Черепаново и изолирован, поэтому при планировании они учитываются отдельно. На примере ст. Ерунаково был рассмотрен данный фактор (табл. 1).

Дело в том, что поезда, груженные каменным углем, могут следовать в западном направлении Транссибирского хода через ст. Инская или через ст. Артышта-II и Алтайская Среднесибирского хода. В связи с этим, в зависимости от выбора маршрута следования, отличаются затраты времени локомотивного парка на Транссибирском полигоне, поскольку расстояние по маршруту следования изменяется.

Кроме этого, необходимо учитывать поездопоток со ст. Ерунаково в восточном направлении Транссибирского полигона. Сдача поездов по стыку Междуреченск ограничена 20 составами в сутки вследствие недостаточного путевого развития на примыкающих участках полигона Междуреченск – Тайшет и ростом погрузки на восток со станций Абаканского района управления. Поэтому возникает необходимость направлять эти поезда через Инскую со сдачей по стыку Мариинск, по кружному маршруту следования для поездов. Вариант следования через ст. Инскую приводит к увеличению затрат времени в целом для дороги, которые составляют 21,35 ч по Западно-Сибирской дороге, а по Транссибирскому полигону, где используются локомотивы корпоративного парка, – 13,41 ч.

Результаты исследования

Таким образом, можно сделать вывод, что при планировании парка поездных локомотивов на Транссибирском полигоне необходимо учитывать направления грузопотоков и планируемые размеры движения со станций Кузбасса.

Но ограничения по приему поездов Красноярской дорогой по стыку Междуреченск увеличивают и потребность в локомотивном парке на Кузбассе. А время оборота локомотива для работы с поездами углепогрузочных станций восточного направления, проходящими через ст. Инская, будет равно для Транссибирского района управления 5,04 ч, а для Кузбасского – 12,08 ч. Следует учесть изменение направления движения поездопотока через Инскую – заход в нечетную систему станции, а затем изменение направления следования с переприцепкой поездного локомотива через четную систему станции – 4 ч. В итоге вариант следования через Инскую приводит к увеличению затрат времени в целом для дороги на 21 ч.

В случае перегруженности инфраструктуры или в период «окон» западный поездопо-

Таблица 1

**Затраты времени локомотивов на перевозку грузов со ст. Ерунаково
в среднем за сутки в июне и ноябре 2023 г.**

Направление следования	Вариант следования	Кол-во поездов	Общее время следования, ч			Локомотиво-сутки		
			<i>T_{ход}</i>	<i>K_{ход}</i>	<i>C_{ход}</i>	<i>T_{ход}</i>	<i>K_{ход}</i>	<i>C_{ход}</i>
<i>Июнь 2023 г.</i>								
Запад	Ерунаково – Инская – Исилькуль	4	68,36	47,16	0	2,85	1,97	0
	Ерунаково – Алтайская – Исилькуль	5	28,20	12,00	121,5	0,78	0,5	5,06
	Ерунаково – Инская – Называевская	3	54,27	33,72	0	2,26	1,41	0
	Ерунаково – Алтайская – Называевская	4	20,24	9,6	79,4	0,63	0,4	3,31
	<i>Итого</i>	16	171,07	102,48	200,9	6,52	4,28	8,37
Восток	Ерунаково – Инская – Мариинск	2	26,8	16,00	0	1,12	0,67	0
	Ерунаково – Междуреченск	10	0	21,39	0	0	0,89	0
	<i>Итого</i>	12	26,8	37,39	0	1,12	1,56	0
<i>Ноябрь 2023 г.</i>								
Запад	Ерунаково – Инская – Исилькуль	2	34,18	23,58	0	1,42	0,98	0
	Ерунаково – Алтайская – Исилькуль	3	14,10	7,2	59,55	0,59	0,3	2,48
	Ерунаково – Инская – Называевская	4	72,36	44,96	0	3,02	1,87	0
	Ерунаково – Алтайская – Называевская	5	25,30	12	99,25	1,05	0,5	4,14
	<i>Итого</i>	14	145,94	87,74	158,8	6,08	3,65	6,62
Восток	Ерунаково – Инская – Мариинск	4	53,60	32,00	0	2,23	1,33	0
	Ерунаково – Междуреченск	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Итого</i>	4	53,60	32,00	0	2,23	1,33	0

ток могут направить через ст. Инская. Это увеличивает затраты времени локомотива постоянного тока на 29 ч. Для учета дополнительных факторов рассчитаны коэффициенты потребности. С этой целью определено увеличение коэффициента потребности для этого поездопотока с учетом дополнительных затрат на проследование одного поезда кружным путем, которые составляют:

- 1) для Транссибирского полигона:
 - направление западного поездопотока по Транссибирскому ходу (парк локомотивов зависит от варианта движения поездов в период проведения «окон» на Среднесибирском ходу) – 0,73 ч;
 - направление западного поездопотока по Транссибирскому ходу (парк локомотивов зависит от варианта движения поездов в период проведения «окон» на Среднесибирском ходу) – 0,21 ч;
 - направление восточного поездопотока с углепогрузочных станций Кузбасса через Инскую – Мариинск – 0,21 ч;
 - направление восточного поездопотока с углепогрузочных станций Кузбасса через Транссибирский полигон – 0,49 ч;
- 2) для Кузбасского полигона:
 - направление западного поездопотока по Транссибирскому ходу (парк локомотивов зависит от варианта движения поездов в период проведения «окон» на Среднесибирском ходу) – 0,73 ч;
 - направление восточного поездопотока с углепогрузочных станций Кузбасса через Транссибирский полигон – 0,49 ч;

• направление западного поездопотока с углепогрузочных станций Кузбасса через Транссибирский полигон – 0,49 ч.

Особое внимание следует уделить отставленным от движения поездам (в месячных отчетах они числятся как отставленные). Наиболее распространенными причинами, по которым поезда отставляют на станциях Транссибирского полигона, являются простой поездов на промежуточных станциях более 6 ч, не-прием поездов грузополучателями, а также отсутствие локомотива перевозчика. Большое скопление таких составов на станциях может привести к трудностям при пропуске поездов. За февраль 2023 г. на Транссибирском полигоне было отставлено от движения более 500 поездов, из них затем возвращены к движению 476 поездов.

Операции для отправления ранее отставленного поезда увеличивают затраты времени локомотивов на их перемещение из депо до станции стоянки состава и выполнение сопутствую-

ших технических операций, это должно быть учтено при планировании локомотивного парка.

Расчетная схема определения затрат времени следования до места дислокации отставленного от движения поезда приведена на рисунке.

Средневзвешенное время следования локомотива до станции подъема на Транссибирском полигоне составляет 3,56 ч; учитывается, что локомотив следует после отстановки от движения, а потом – для отправления ранее отставленного поезда из депо, обслуживающего этот участок.

Среднее время, затрачиваемое локомотивом на работу с отставленным от движения поездом, определяется по формуле (2); затраты рассчитаны по технологическим графикам выполнения технических операций, приведенным в Технологическом процессе станции, с учетом норм затрат на подготовительно-заключительное время, утвержденных для локомотивных депо:

$$T_{\text{общ}}^{\text{лок}} = T_{\text{пр}} + \sum T_{\text{след}} + T_{\text{приц}} + T_m + T_t + T_{\text{отцеп}} + T_{3,c} \quad (2)$$

где $T_{\text{пр}}$ – время приемки локомотива локомотивной бригадой, $T_{\text{пр}} = 0,5$ ч; $\sum T_{\text{след}}$ – время следования локомотива в обоих направлениях, ч; $T_{\text{приц}}$ – время на прицепку локомотива к составу, $T_{\text{приц}} = 0,06$ ч; T_m – время на зарядку

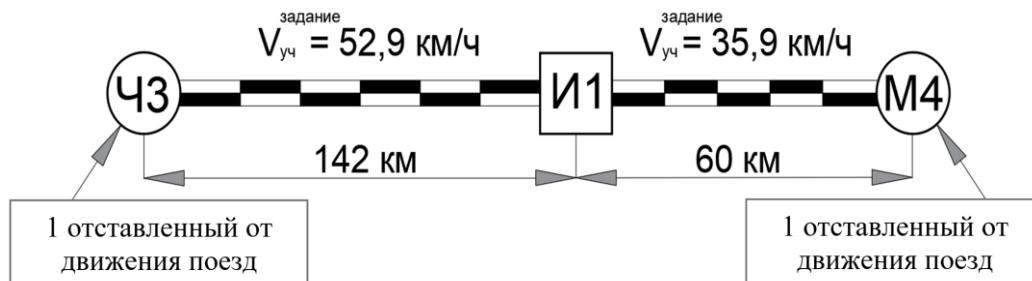
тормозной магистрали, $T_m = 0,1$ ч; T_t – время на полное опробование тормозов, $T_t = 0,42$ ч; $T_{\text{отцеп}}$ – время на отцепку локомотива, $T_{\text{отцеп}} = 0,06$ ч; $T_{3,c}$ – время на закрепление и снятие закрепления, $T_{3,c} = 0,17$ ч.

Для определения времени следования был проведен анализ отправления ранее отставленных поездов за февраль 2023 г. во всех районах управления по данным оперативной отчетности из программного комплекса «Диспарк». Суммарное и средневзвешенное расстояние и время хода локомотивов за отставленными от движения поездами по Транссибирскому, Среднесибирскому ходу и Кузбассу приведены в табл. 2.

Средневзвешенное расстояние и время хода локомотива за отставленным от движения поездом по итогам табл. 2 составляют: для Транссибирского района управления – 157,9 км и 3,56 ч; для Кузбасса – 154,38 км и 4,94 ч; для Среднесибирского района управления – 323,7 км и 7,4 ч.

Среднее время, затрачиваемое локомотивом на работу с отставленным от движения поездом, равно:

– на Транссибирском районе управления
 $T_{\text{общ}}^{\text{лок}} = 0,5 + 3,56 + 3,56 + 0,06 + 0,1 + 0,42 + 0,06 + 0,17 = 8,4$ ч;



Расчетная схема определения затрат времени следования до места дислокации отставленного от движения поезда

Суммарное и средневзвешенное расстояние и время хода локомотивов за отставленными от движения поездами

Таблица 2

Функция	Кол-во отставленных поездов	Расстояние от депо до станции, км	Участковая скорость, км/ч	Время хода, ч
<i>Транссибирский ход</i>				
Всего	501	8 842	–	199,64
Среднее значение	17	157,9	48,44	3,56
<i>Кузбасс</i>				
Всего	1 170	8 035	–	202,21
Среднее значение	39	154,38	31,25	4,94
<i>Среднесибирский ход</i>				
Всего	450	7 502	–	171,5
Среднее значение	15	323,7	43,74	7,4

- на Кузбасском районе управления
 $T_{\text{общ}}^{\text{лок}} = 0,7 + 4,94 + 4,94 + 0,16 + 0,2 + 0,72 + 0,16 + 0,17 = 11,99 \text{ ч};$
- на Среднесибирском районе управления
 $T_{\text{общ}}^{\text{лок}} = 0,5 + 7,4 + 7,4 + 0,06 + 0,1 + 0,42 + 0,05 + 0,15 = 16,11 \text{ ч}.$

Локомотивы, следующие для отправления ранее отставленных от движения поездов, относят к локомотивам одиночного следования. Это влечет за собой увеличение эксплуатируемого парка локомотивов. На проследование одного поезда в сутки для отправления ранее отставленных от движения поездов на Западно-Сибирской железной дороге целесообразно применить коэффициент потребности: на Транссибирском районе управления – 0,4; на Кузбасском – 0,51; а на Среднесибирском – 0,67.

Таким образом, выявлено, что появляется дополнительная составляющая затрат времени в пути следования, так как в обороте локомотива предусмотрен только учет времени нахождения на определенных станциях нахождения локомотивных депо или пунктов смены локомотивных бригад. Перечисленные элементы затрат времени использования локомотивного парка не учитываются при планировании.

Поэтому целесообразно дополнить оборот локомотива этим элементом, и формула примет вид

$$T_{\text{об}}^{\text{лок}} = \sum T_{\text{дв}} + T_{\text{осн}} + T_{\text{об}} + \sum T_{\text{см}} + \sum T_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{доп}}$ – дополнительные затраты времени локомотивов на ввод в ГДП отставленных от движения поездов и направление поездопотока не по кратчайшему расстоянию, ч.

При оперативном планировании на основании рассчитанных затрат времени на дополнительные виды работ целесообразно учитывать увеличение коэффициента потребности для этого поездопотока вследствие дополнительных затрат на проследование одного поезда кружным путем и на отправление ранее отставленных от движения грузовых поездов.

Таким образом, с учетом дополнительных факторов итоговое значение эксплуатируемого парка поездных локомотивов грузового движения только для одного района управления превышает значение, рассчитанное без их учета, на 17 локомотивов.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предлагаемая дополнительная составляющая в определении оборота локомотивов учитывает затраты времени на дополнительные операции, связанные с оперативной обстановкой на дороге, требующей направления поездов кружным маршрутом следования, или вынужденной отстановкой от движения составов с последующим отправлением. Она позволит точнее планировать потребность эксплуатируемого локомотивного парка.

2. Результаты исследования могут быть использованы для изменения существующей методики оперативного планирования локомотивного парка, которая не учитывает дополнительные затраты времени работы. На базе существующей методики производится сменно-суточное планирование эксплуатационной работы с помощью программного комплекса АСОУВ, и определение более точных объемов предстоящей работы локомотивного парка обеспечит своевременный вывоз грузов. Корректировка методики позволит усовершенствовать применяемый железной дорогой метод расчета парка локомотивов при оперативном планировании, будет способствовать оптимизации работы с поездопотоками.

3. Учет дополнительных факторов при корректировке методики определения объемов эксплуатируемого парка локомотивов грузового движения и применении ее в программных комплексах оперативного планирования позволит обеспечить рациональное использование локомотивов корпоративного парка для организации беспрепятственной поездной работы на сети железных дорог.

Список источников

1. О транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/727294161?marker=65A0IQ> (дата обращения: 17.12.2024).
2. Об утверждении Инструкции по учету локомотивов : распоряжение ОАО «РЖД» от 21.03.2022 № 2155 р // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456001763> (дата обращения: 17.12.2024).

3. ГОСТ Р 56046–2014. Показатели использования локомотивов. Термины и определения : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 июня 2014 г. № 661-ст // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200112024> (дата обращения: 17.12.2024).
4. Некрашевич В. И., Апатцев В. И. Управление эксплуатацией локомотивов : учеб. пособие. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2018. 223 с.
5. Немцов Э. Ф. Информационная поддержка в ИСУЖТ оперативного управления тяговыми ресурсами на Восточном полигоне // Сборник трудов «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (ИСУЖТ–2016, Москва, 17–18 ноября 2016 г.). Москва : Изд-во ОАО «НИИАС», 2016. С. 198–201.
6. Валинский О. С. Повышать эффективность планирования и управления локомотивным парком // Железнодорожный транспорт. 2017. № 2. С. 41–44.
7. Ходакевич А. Н. Обеспечение тяговым подвижным составом // Железнодорожный транспорт. 2012. № 6. С. 27–29.
8. Об утверждении типового порядка оперативного управления тяговыми ресурсами на выделенных полигонах сети железных дорог : распоряжение ОАО «РЖД» от 13.05.2021 № 1020/р // Гарант : информационно-правовое обеспечение. URL: <https://base.garant.ru/408563109/?ysclid=m71nhgvfbp153378422> (дата обращения: 17.12.2024).
9. Технология автоматизированного планирования и управления маршрутными перевозками / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, С. Л. Щепанов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2018. № 3. С. 8–15.
10. Осминин А. Т., Сотников Е. А. Основные факторы и условия перехода на polygonную модель управления // Железнодорожный транспорт. 2017. № 5. С. 22–27.

References

1. Order of the Government of the Russian Federation dated 27.11.2021 No. 3363-r. On the transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035. *Electronic fund of legal and normative-technical documents*. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/727294161?marker=65A0IQ>.
2. Order of Russian Railways dated 21.03.2022 No. 2155 r. On approval of the Instructions for the registration of locomotives. *Electronic fund of legal and regulatory-technical documents*. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/456001763>.
3. GOST R 56046-2014. Indicators of locomotive usage. Terms and definitions. Approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from 11.06.2014 No. 661-st. *Electronic fund of legal and normative-technical documents*. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200112024>.
4. Nekrashevich V. I., Apattsev V. I. Management of locomotive operation. Textbook. 4th edition revised and supplemented. Moscow: Russian University of Transport (MIIT); 2018. 223 p. (In Russ.).
5. Nemtsov E. F. Information support in ISUZhT for the operational management of traction resources at the Eastern training ground. *Proceedings. Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2016, Moscow, November 17–18, 2016)*. Moscow: Publishing house NIIAS; 2016. P. 198–201. (In Russ.).
6. Valinsky O. S. Increase the efficiency of planning and management of the locomotive fleet. *Railway Transport*. 2017;(2):41–44. (In Russ.).
7. Khodakevich A. N. Providing traction rolling stock. *Railway Transport*. 2012;(6):27–29. (In Russ.).
8. Russian Railways Order No. 1020/r dated 13.05.2021. On Approval of the Standard Procedure for Operational Management of Traction Resources at Designated Landfills of the Railway Network. *Garant: information and legal support*. (In Russ.). URL: <https://base.garant.ru/408563109/?ysclid=m71nhgvfbp153378422>.
9. Borodin A. F., Panin V. V., Shchepanov S. L. [et al.]. Technology of automated planning and management of route transportation. *Railway Transport*. 2018;(3):8–15. (In Russ.).
10. Osminin A. T., Sotnikov E. A. Main factors and conditions for the transition to a polygon management model. *Railway Transport*. 2017;(5):22–27. (In Russ.).

Информация об авторах

Л. С. Жарикова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения.

О. П. Югринा – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

L. S. Zharikova – Candidate of Engineering, Associate Professor, Operational Management Department, Siberian Transport University.

O. P. Yugrina – Candidate of Engineering, Associate Professor, Operational Management Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 23.01.2025; одобрена после рецензирования 31.01.2025; принятая к публикации 18.02.2025.

The article was submitted 23.01.2025; approved after reviewing 31.01.2025; accepted for publication 18.02.2025.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 625.172:658.51
doi 10.52170/1815-9265_2025_73_29

Анализ сокращения затрат труда на выправку пути за счет применения машинных комплексов

Александр Александрович Севостьянов^{1✉}, Сергей Андреевич Пономарев²,
Анна Сергеевна Пуха³

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

¹ seva2233@yandex.ru[✉]

² sbarkov943@gmail.com

³ annapuha96@mail.ru

Аннотация. Обеспечение стабильности геометрии рельсовой колеи является неотъемлемой частью текущего содержания железнодорожного пути. На выправку пути приходится треть от всех трудозатрат на дистанции пути, состояние геометрии рельсовой колеи влияет на уровень безопасности движения поездов и определяет оценку эффективности работы структурного подразделения. Выправка пути по уровню, в плане и профиле осуществляется как вручную бригадой монтеров пути, так и за счет работы машинного комплекса в рамках планово-предупредительной выправки пути. В условиях дефицита рабочих кадров встает закономерный вопрос о снижении затрат труда путем машинизации основных технологических процессов по содержанию пути.

В данной работе представлены результаты исследования по анализу зависимости периодичности планово-предупредительной выправки и состояния геометрии рельсовой колеи, в том числе с учетом потребных трудозатрат на выправку пути вручную. Для анализа выбраны участки Среднесибирского хода с величиной пропущенного тоннажа от 300 до 1 200 млн т, с разной периодичностью проведения машинной выправки. Для обработки исходных данных использовался язык программирования Python, что позволило автоматизировать процесс расчета потребных трудозатрат на выправку пути вручную. В статье приведены зависимости трудозатрат на содержание пути от величины пропущенного тоннажа с учетом периодичности планово-предупредительной выправки. Определена степень эффективности выправки пути машинным комплексом в зависимости от величины пропущенного тоннажа и количества выправок. Отмечено, что в условиях дефицита рабочих кадров для назначения планово-предупредительной выправки рационально использовать дополнительный критерий – величину трудозатрат на выправку пути, так как этот параметр напрямую отражает трудоемкость содержания рельсовой колеи на линейном участке.

Ключевые слова: железнодорожный путь, планово-предупредительная выправка, геометрия рельсовой колеи, текущее содержание, затраты труда, планирование работ

Для цитирования: Севостьянов А. А., Пономарев С. А., Пуха А. С. Анализ сокращения затрат труда на выправку пути за счет применения машинных комплексов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 29–38. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_29.

TRANSPORT

Original article

Analysis of labour cost reduction for track straightening through the use of machine complexes

Alexander A. Sevostyanov^{1✉}, Sergey A. Ponomarev², Anna S. Pukha³

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

¹ seva2233@yandex.ru[✉]

² sbarkov943@gmail.com

³ annapuha96@mail.ru

Abstract. Ensuring the stability of the track geometry is an integral part of the current track maintenance. Track straightening accounts for a third of all labour costs at the track distance, the state of the track geometry affects the safety level of driving and determines the efficiency assessment of the structural subdivision. Track straightening by level, plan and profile is carried out both manually by a team of track installers, and due to the operation of the machine complex as part of the planned preventive track straightening. In the context of the workers shortage, a

natural question arises about reducing labour costs due to the mechanization of the main technological processes to maintain the track.

This paper presents the results of a study on the analysis of the dependence between periodicity of preventive maintenance and the state of track geometry, including taking into account the required labour costs for manual track straightening. Sections of the Central Siberian passage with the value of the passed tonnage from 300 to 1200 million tons with different frequency of machine straightening were selected for the analysis. To process the initial data for the analysis, the Python programming language was used, which made it possible to automate the process of calculating the required labour costs for manual straightening of the path. The article shows the dependence of labour costs for track maintenance depending on the amount of missed tonnage, taking into account the periodicity of planned preventive straightening. Degree of track straightening efficiency is determined by machine complex depending on value of passed tonnage and number of straightening. It was noted that in the conditions of a shortage of working personnel for the purpose of planned and preventive straightening, it is rational to use an additional criterion – the amount of labour costs for straightening the track, since this parameter directly reflects the labour intensity of maintaining the rail track on the linear section.

Keywords: railway track, preventive straightening, track geometry, current maintenance, labour costs, work planning

For citation: Sevostyanov A. A., Ponomarev S. A., Pukha A. S. Analysis of labour cost reduction for track straightening through the use of machine complexes. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):29–38. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_29.

Введение

Повышение уровня механизации и автоматизации всегда являлось приоритетной задачей в части технического обслуживания железнодорожного пути. Одним из перспективных направлений в этой сфере является снижение влияния человеческого фактора на планирование и организацию работ. Применение беспилотных летательных аппаратов направлено на повышение эффективности диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры [1, 2] с последующим созданием цифровых двойников [3, 4], а совершенствование автоматизированных систем [5, 6] позволит активно использовать предиктивную аналитику. Выявление закономерности развития дегационных процессов пути способствует повышению эффективности планирования и организации технического обслуживания и ремонта железнодорожного пути.

Использование современных машин и механизмов повышает производительность работ и исключает трудоемкие операции, которые выполняются за счет ручного труда. Исследования в области внедрения высокопроизводительных машинных комплексов, способствующих снижению трудоемкости работ и повышению качества текущего содержания пути, ведутся непрерывно. В рамках текущего содержания железнодорожного пути, в зависимости от условий эксплуатации, доля трудозатрат на содержание основных параметров геометрии рельсовой колеи (ГРК) может превышать 40 % от всех видов работ [7, 8]. Сравнительно невысокая трудоемкость работы по укладке регулировочных прокладок привела к широкому применению этого

способа работниками путевого хозяйства. Вместе с тем необходимо помнить, что данный способ устранения отступлений по ГРК является временной мерой и требует извлечения прокладок и последующей выпрямки пути с использованием электрошпалоподбоек или же планово-предупредительной выпрямки пути (ППВ). В исследованиях Н. И. Коваленко отмечается, что использование регулировочных прокладок может привести к уменьшению модуля упругости подрельсового основания (на 7–15 %), а также увеличению усталостных процессов деградации рельсовой стали (на 8–12 %) [9]. Вместе с тем стоит учитывать, что существующий дефицит сотрудников рабочих профессий (монтажеров пути) в ряде регионов ставит вопрос о необходимости увеличения объема работ с использованием машинизированных комплексов. В рамках исследования [10] отмечается, что современный метод участкового технического обслуживания предусматривает широкое применение механизированных комплексов, а также предлагается ряд мероприятий, которые приведут к повышению эффективности текущего содержания. В частности, использование «глухих окон», увеличение продолжительности технологических «окон» и непосредственное увеличение объема работ с применением механизированных комплексов. Оценка рисков нарушения численности персонала в путевом хозяйстве [11] показывает, что количество работников дистанции пути имеет прямое влияние на безопасность движения поездов. В условиях дефицита кадров обеспечения бесперебойного движения поездов с установленными скоростями возможно достичь за счет увеличения объема выпрямки пути

выправочными комплексами. Актуальным является соотношение затрат на выправку путем ручным способом и с использованием выправочных комплексов при учете качества выполнения работ. В части планирования и организации работ выправочных комплексов рассматриваются различные варианты повышения эффективности выправки пути как в части рационального выбора типа и количества машин [12, 13], так и в области повышения выработки [14, 15]. Также стоит отметить, что периодичность проведения ППВ регламентируется ремонтной схемой [16], но на практике машинная выправка не всегда назначается в соответствии с указаниями нормативных документов.

Вместе с тем открытым остается вопрос о степени эффективности использования выправочных машин с точки зрения продолжительности стабильного состояния подшпального основания после выправки пути в различных условиях эксплуатации. В данной работе представлены результаты исследования влияния выправки пути на стабильность подшпального основания с точки зрения распределения трудозатрат на ручную выправку пути в плане и профиле бригадами монтеров пути.

Материалы и методы исследования

Оценка эффективности выправки путем машинным комплексом проводилась на примере участков Среднесибирского хода по результатам эксплуатации пути с 2018 по 2023 г. Всего анализировалось шесть участков, характеристика которых представлена в табл. 1.

Сравнение участков проведено по группам, которые зависят от года укладки пути (см. табл. 1). Так, участки 1, 2, 6 были уложены в 2012 г. и к 2022 г. претерпели различное количество выправок пути (табл. 2). На участке 6 проводилась только одна ППВ в 2019 г., на участке 1 – три, а на участке 2 – пять.

На участках 3 и 5 проводилось по три выправки машинным комплексом с разной периодичностью, а на участке 4 – четыре выправки, причем каждые два года. В рамках рассматриваемого периода принимаются во внимание только те ППВ, которые были выполнены в период с 2018 по 2022 г.

В рамках текущего содержания пути ГРК оценивается путеизмерительными средствами, результаты передаются в виде графических диаграмм на каждый километр в дистанцию пути. В ходе анализа данных диаграмм сотрудники структурных подразделений планируют работу

Характеристика участков исследования

Характеристика	Номер участка исследования					
	1	2	3	4	5	6
Грузонапряженность, млн т брутто / 1 км в год	130					
Длина, км	4	3	3	3	3	3
Конструкция пути	Бесстыковая, рельсы Р65, шпалы Ш-3Д, скрепление ЖБР-65Ш, балласт щебеночный					
Скорость движения поездов, км/ч	Пассажирские – 120, грузовые – 80					
Год укладки	2012	2015			2012	

Таблица 1

Периодичность проведения ремонтов и ППВ на участках

Год	Вид ремонта в отчетный год на участке					
	1	2	3	4	5	6
2012	Капитальный ремонт					
2013	ППВ	ППВ	–	–	–	Капитальный ремонт
2014	–	–	Капитальный ремонт			
2015	–	–	–	–	–	–
2016	ППВ	ППВ	ППВ	ППВ	ППВ	–
2017	–	–	–	–	–	–
2018	–	ППВ	–	ППВ	ППВ	–
2019	ППВ	ППВ	–	–	–	ППВ
2020	–	ППВ	ППВ	ППВ	–	–
2021	–	–	–	–	–	–
2022	Капитальный ремонт					

Таблица 2

по выправке пути, а также оценивают эффективность уже выполненных работ. Помимо графических диаграмм, по результатам оценки состояния пути формируется ведомость выявленных отступлений в электронном варианте (в формате `xlsx`), которая хранится в региональном центре диагностики и мониторинга. В данной ведомости содержится информация обо всех отступлениях, выявленных на каждом километре, с привязкой по метражу, что позволяет осуществлять расчет трудозатрат на выправку пути в первом приближении.

С целью автоматизации процесса анализа и обработки было принято решение использовать язык программирования Python. Также была использована внешняя библиотека Pandas. В качестве исходных данных были получены Excel-файлы, содержащие в себе результаты проезда путеизмерительного вагона. Работа алгоритма начинается с функции загрузки Excel-файлов и перевода их в Python-формат. Далее в виде словарей и списков задаются все необходимые для обработки коэффициенты и параметры. После этого начинается работа основного цикла обработки (рис. 1), в процессе которой происходит поэтапная фильтрация необходимых данных, присвоение промежуточных рельсовых скреплений по заданным километрам и определение соответствующих коэффициентов. По окончании ра-

боты цикла формируется готовый вид выходных данных: количество отступлений и трудозатрат для их устранения для каждого километра по заданным участкам с учетом всех коэффициентов и зависимостей. Результатом работы алгоритма является Excel-файл, в который сводятся готовые выходные данные по всему году, с разделением на листы по участкам.

Особенностью данного алгоритма является его автономность и возможность обработки больших объемов данных без необходимости дополнительного вмешательства человека, что позволяет проводить расчет потребных трудозатрат для любого участка при наличии данных об условиях эксплуатации пути.

На основе расчетных данных осуществлялся статистический анализ изменения состояния ГРК. Влияние машинной выправки в рамках ППВ оценивается как по изменению среднего количества отступлений по ГРК в зависимости от периодичности ППВ, так и по величине трудозатрат, необходимых на устранение выявленных отступлений, которые определялись по методике, представленной в предыдущей работе [7].

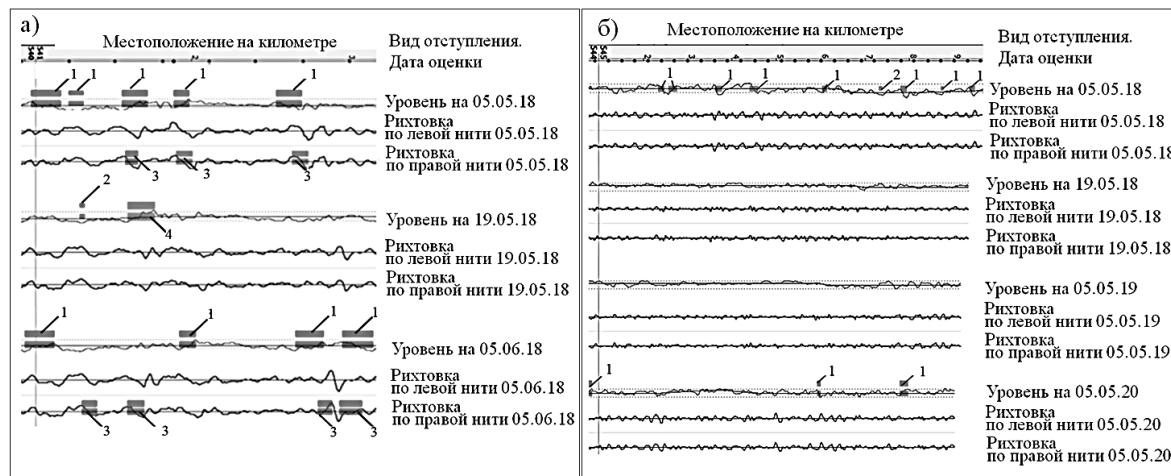
Результаты исследования

Для сравнения состояния пути до и после выправки рассмотрен перегон, на котором частично проводилась ППВ (рис. 2). На участке

a)	
b)	
c)	

Рис. 1. Автоматизация процесса обработки исходных данных:

a – исходные данные; *b* – программный код основного алгоритма обработки данных;
c – конечный результат работ алгоритма



Rис. 2. Результаты оценки состояния пути:
а – устранение отступлений вручную; б – устранение отступлений в рамках ППВ;
1 – перекос II степени; 2 – уровень II степени; 3 – рихтовка II степени;
4 – перекос IV степени

перегона, где машинная выправка пути проводилась 15 мая 2018 г., на протяжении последующих двух лет отступления практически не выявлялись (см. рис. 2, б). В то время как на участке, где машинная выправка не проводилась, каждые две недели выявлялись новые отступления, в том числе неисправность IV степени (см. рис. 2, а).

Таким образом, выправка пути вручную является временной мерой, которая направлена на поддержание стабильного состояния подшпального основания. Эффективность выправки пути машинным способом в сравнении с ручной выправкой однозначно выше, но длительность стабильного состояния пути после работы машины зависит от ряда параметров. Под эффективностью понимаются сокращение среднего количества отступлений и продолжительность стабильного состояния

пути. Признак стабильности пути достаточно полно сформирован в работе А. В. Дворникова [17] и определяется исходя из показателя роста количества отступлений.

Сравнение средних значений отступлений по ГРК в конкретные периоды (до непосредственной ППВ, в весенний период, после проведения ППВ) представлено в табл. 3. Весенний период выделен отдельно, поскольку он характеризуется неравномерной осадкой подшпального основания, что отражается на резком увеличении отступлений по ГРК.

На участках, где пропущенный тоннаж варьируется в диапазоне от 300 до 900 млн т, наиболее существенный эффект выявлен при проведении ППВ каждые два года (240–280 млн т). Среднее количество отступлений после машинной выправки в 2018 г. сократилось практически в три раза и составляло 0,9 шт./км на протя-

Таблица 3

Анализ влияния машинной выправки пути на состояние ГРК

Период сравнения	Среднее значение отступлений, шт./км, на участке					
	1	2	3	4	5	6
2018 г.:						
до ППВ	3,9	3,5	3,3	1,8	2,2	4,0
в весенний период	6,7	10,3	4,7	4	4,7	6,6
после ППВ	–	2,3	–	0,5	1,2	–
2019 г.:						
в весенний период	13,9	12,1	6,4	0,7	2,4	10,3
после ППВ	5,6	2,7	–	–	–	4,2
2020 г.:						
в весенний период	10,5	3,6	5,4	2,3	7,8	6,9
после ППВ	–	1,5	1,5	0,2	–	–
2021 г. В весенний период	9	6,5	3,07	0,2	3,6	6,09
2022 г. В весенний период	16,5	14,4	3,1	1,43	5,4	11,5

жении двух лет (с учетом весеннего периода) и снизилось до 0,2 шт./км после проведения ППВ в 2020 г. (участок 4).

Проведение ППВ с периодичностью раз в два года позволило обеспечить стабильность пути в течение пяти лет (участок 4). На участках, где ППВ проводилась лишь один раз (участки 3 и 5), отчетливо заметно нарастание среднего количества отступлений, соответственно, потеря стабильности.

На участках, где пропущенный тоннаж варьируется в диапазоне от 600 до 1 200 млн т, наилучший эффект от ППВ был достигнут при ежегодном проведении машинной выправки (участок 2). Среднее количество отступлений после ППВ в 2018 г. снизилось в 2,5 раза и составляло 2,3 шт./км до следующего периода неравномерной осадки, где возросло до 12,3 шт./км. После проведения машинной выправки в 2019 г. это значение снизилось до 2,7 шт./км. Весной 2020 г. среднее количество отступлений составило 6,7 шт./км и после очередной ППВ сократилось до 2,6 шт./км при проpusке тоннажа свыше 900 млн т. В 2021 г. на участке 2 ППВ не проводилась, в результате чего весной 2021 г. среднее значение отступлений составило 14,4 шт./км и продолжило расти в течение всего года (максимальное значение выявлено в октябре 2021 г. – 33 шт./км).

Анализ распределения среднего количества отступлений на исследуемых участках

(рис. 3) показал, что одним из основных параметров, влияющих на эффективность машинной выправки, является продолжительность эксплуатации пути, в частности состояние балластной призмы, которое можно привязать к величине пропущенного тоннажа.

График распределения трудозатрат на выправку пути вручную, в зависимости от периодичности ППВ (рис. 4), позволяет оценить влияние выправки пути машинным комплексом на трудоемкость процесса текущего содержания основных параметров ГРК с учетом величины пропущенного тоннажа.

Видно, что на участке 4 (две ППВ с периодичностью раз в два года) трудозатраты на выправку пути вручную минимальны, в то время как на участках 3 и 5 динамика нарастания трудозатрат на выправку существенно отличается. После выправки машинным комплексом в 2018 г. разница по трудозатратам между участками 4 и 5 к весне 2020 г. сравнительно небольшая (30 %), но отсутствие ППВ на участке 5 привело к резкому нарастанию отступлений, в то время как проведенная на участке 4 ППВ позволила сохранить стабильность пути. На участке 3 проведение в 2020 г. ППВ позволило снизить динамику нарастания трудозатрат, но не обеспечило стабильности пути, в результате чего на участке 3 потребные трудозатраты на выправку пути существенно выше, чем на участке 4.

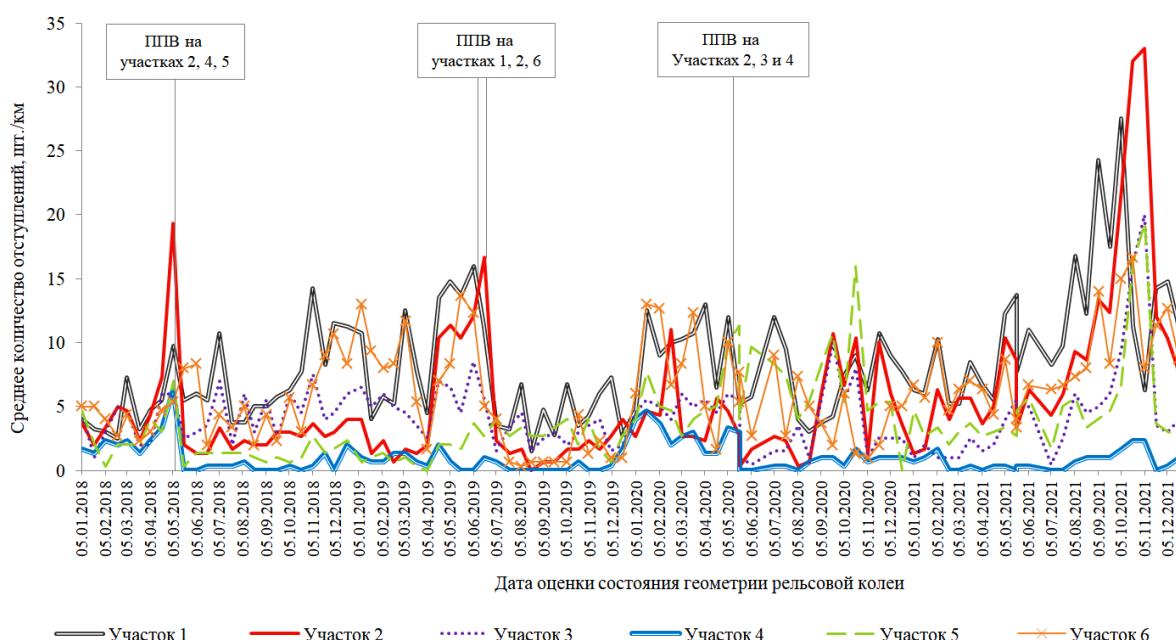


Рис. 3. Распределение среднего количества отступлений в зависимости от периодичности ППВ

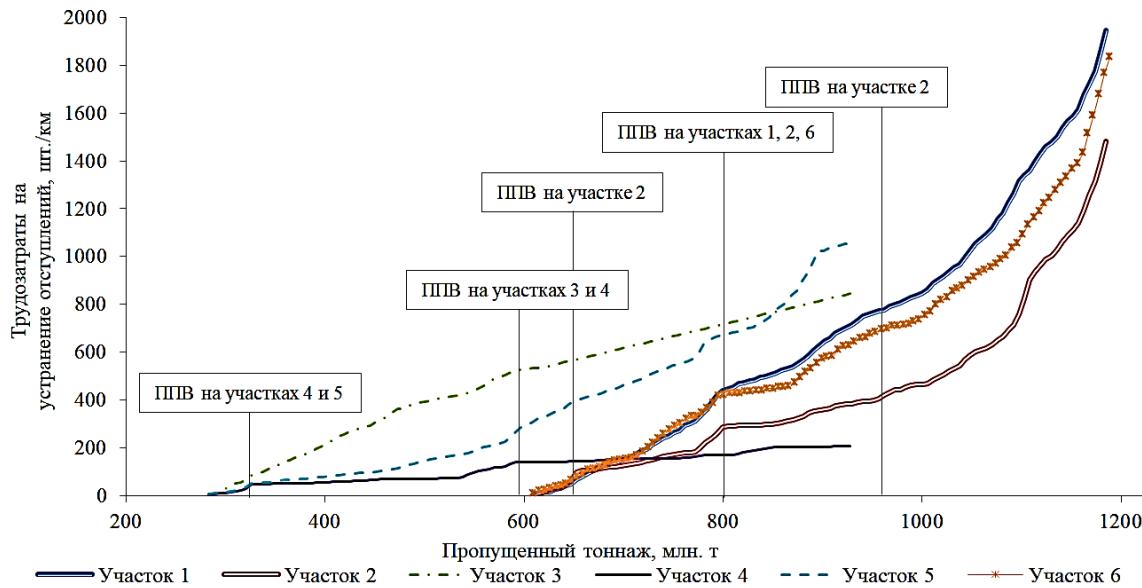


Рис. 4. Распределение трудозатрат на выправку пути вручную в зависимости от периодичности ППВ

На участках с пропущенным тоннажем свыше 600 млн т видно, что динамика нарастания трудозатрат на выправку пути на всех участках схожая. Ежегодная выправка пути машинным комплексом позволяла снизить потребные трудозатраты на участке 2, но при отсутствии ППВ в 2021 г. динамика резко изменилась, что привело к увеличению трудозатрат в три раза относительно прошлого года.

Сравнение трудозатрат на выправку пути вручную за анализируемый период с учетом количества ППВ (рис. 5) показывает влияние машинной выправки на потребное количество трудозатрат. На участках пропущенного тоннажа в

пределах 300–900 млн т наибольшая эффективность выявлена при двух ППВ с периодичностью раз в два года. При одноразовой машинной выправке среднее количество трудозатрат на 1 км в 4–5 раз (на 630–850 чел.-ч) выше, чем на участке с двумя ППВ. Таким образом, проведение ППВ с периодичностью каждые два года на участке в схожих условиях может обеспечить существенное сокращение трудозатрат на выправку пути вручную, что особенно актуально в условиях дефицита рабочих кадров.

На участках с пропущенным тоннажем в диапазоне от 600 до 1 200 млн т эффективность ППВ существенно ниже. При выполнении еже-

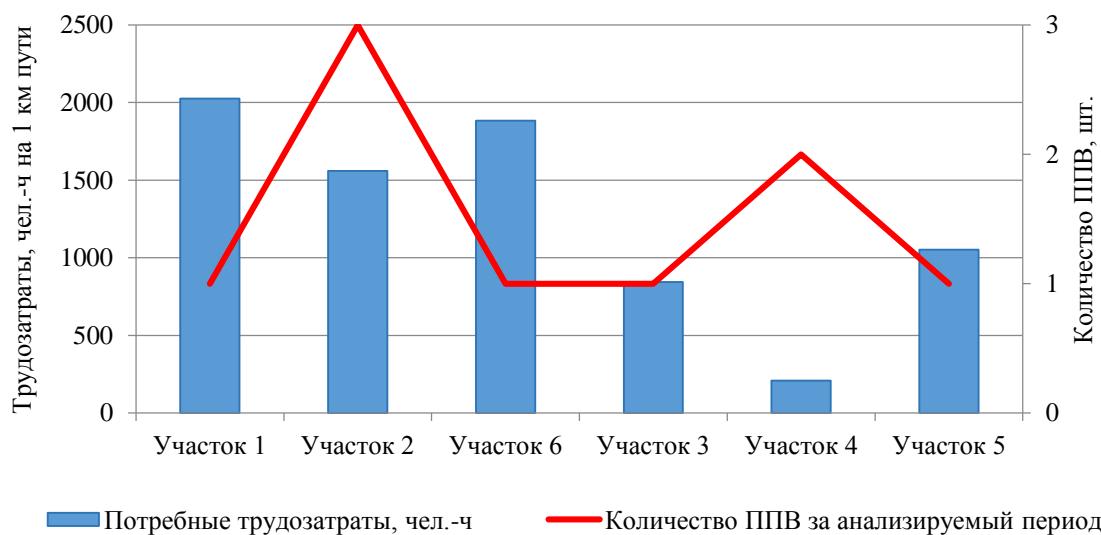


Рис. 5. Распределение трудозатрат на выправку пути вручную с учетом стоимости выправки пути машиной «Думоматик 09-32»

годной ППВ на участке в течение трех лет потребность в трудозатратах лишь в 1,2–1,3 раза (320–460 чел.-ч) ниже, чем на участках, где ППВ проводилась один раз. С учетом затрат на проведение ППВ достигнутый эффект не может считаться положительным. Вместе с тем стоит отметить, что на данных участках (участки 1, 2 и 6) нарушена схема периодичности проведения ремонтов. Величина пропущенного тоннажа составила 1 200 млн т на момент проведения капитального ремонта, но средний ремонт не проводился, что также пагубно сказалось на состоянии подшпального основания.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для повышения эффективности машинной выправки дополнительным параметром назначения ППВ могут выступать потребные трудозатраты на выправку пути вручную. В отличие от среднего количества отступлений потребные трудозатраты показывают влияние выявленных отступлений на процесс планирования и организации работ, а также трудоемкость содержания пути. В условиях дефицита рабочих кадров и стратегии ОАО «РЖД» по машинизации процессов содержания пути планирование работ путевой техники на основе анализа изменения трудозатрат является достаточно актуальным.

2. Использование современных языков программирования, в частности Python, позволяет повысить эффективность обработки

большого количества исходных данных для формирования расчетных параметров (среднего количества отступлений; трудозатрат, потребных на устранение выявленных отступлений). Разработанный алгоритм автоматизации расчета потребных трудозатрат позволяет оперативно оценить влияние машинной выправки на трудоемкость содержания пути. Также стоит отметить, что при наличии исходных данных можно отследить влияние машинной выправки не только в краткосрочной перспективе (в течение года), но и за весь период эксплуатации пути.

3. Одним из основных параметров, влияющих на эффективность машинной выправки, является величина пропущенного тоннажа. Наиболее высокая эффективность от ППВ выявлена при организации двух ППВ с периодичностью раз в два года (130 млн т) на участках с пропущенным тоннажем от 300 до 900 млн т. На участках, где пропущенный тоннаж варьируется от 600 до 1 200 млн т, эффект от более частого проведения машинной выправки существенно ниже.

4. В условиях дефицита рабочих кадров увеличение объемов выправки пути машинным комплексом является актуальным способом обеспечения стабильного состояния ГРК, но для повышения эффективности использования выправочных машин необходимы исследования по оптимальным срокам проведения ППВ с учетом различных условий эксплуатации.

Список источников

1. Асалханова Т. Н., Давтян А. М. Технологический процесс видеоконтроля проведения ремонтных работ железнодорожного пути // Путь XXI века : сборник трудов V Национальной научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 14–15 сентября 2023 года. Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. С. 210–215.
2. Давтян А. М., Дружинина Т. Я. Диагностика и мониторинг железнодорожной инфраструктуры с помощью беспилотных летательных аппаратов // Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2023 : материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов, посвященной празднованию 100-летия отечественной гражданской авиации, Иркутск, 07–08 декабря 2023 года. Иркутск : Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2024. С. 249–254.
3. Асалханова Т. Н., Осколков А. А. Повышение качества планирования и организации работ по текущему содержанию железнодорожного пути // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 73–82.
4. Тимофеев Е. Н., Севостьянов А. А., Сокольников А. В. Создание цифровой модели железнодорожного пути с использованием беспилотных летательных аппаратов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (68). С. 73–82.

5. Асалханова Т. Н., Осколков А. А. Повышение качества планирования и организации работ по текущему содержанию железнодорожного пути // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 73–82.
6. Ковальчук А. С., Коваль С. И. Применение цифровых технологий и сервисов для развития ж/д инфраструктуры // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 50. С. 476–481.
7. Севостьянов А. А., Величко Д. В. Моделирование организации технологических процессов по содержанию геометрии рельсовой колеи // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2023. Т. 82, № 2. С. 168–176.
8. Севостьянов А. А. Планирование и организация работ по содержанию геометрии рельсовой колеи в зимний период эксплуатации // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 4 (7). С. 95–102.
9. Коваленко Н. И. Повышение уровня технического состояния железнодорожного пути // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 3 (91). С. 125–134.
10. Коваленко Н. И., Коваленко Н. А. Обеспечение современных направлений технического обслуживания путевой инфраструктуры при организации перевозочного процесса // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : труды Международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года. Москва : Российский университет транспорта, 2021. С. 382–388.
11. Коваленко Н. И., Коваленко А. Н. Оценка рисков нарушения численности персонала в путевом хозяйстве / Н. И. Коваленко, А. Н. Коваленко // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 2. С. 25–29.
12. Сергеев Е. А., Фазилова З. Т. Повышение эффективности работы выправочной техники // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 2. С. 9–11.
13. Севостьянов А. А., Величко Д. В. Повышение эффективности технологического процесса планово-предупредительной выправки железнодорожного пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 4 (59). С. 37–46.
14. Повышение производительности выправочных машин / Е. А. Садырин, В. А. Покацкий, Д. А. Ковенькин, К. М. Титов // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 11. С. 34–36.
15. Таранцев А. А., Тимченко В. С. Определение оптимальной продолжительности «окна» методом имитационного моделирования процессов железнодорожных перевозок // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 6. С. 30–35.
16. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 2888/р от 17.12.2021. Москва, 2021. 273 с.
17. Дворников А. В. Выявление нестабильных участков пути и прогнозирование их состояния : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дворников Андрей Владимирович. Москва, 2008. 24 с.

References

1. Asalkhanova T. N., Davtyan A. M. Technological process of video monitoring of the repair work of the railway track. *Track of the XXI century: Proceedings of the V National Scientific and Practical Conference with international participation, St. Petersburg, September 14–15, 2023*. St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2024. P. 210–215. (In Russ.).
2. Davtyan A. M., Druzhinina T. Ya. Diagnostics and monitoring of railway infrastructure using unmanned aerial vehicles. *Actual Problems of Aviation Equipment Development and Methods of its Operation – 2023: Proceedings of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference of students and graduate students dedicated to the celebration of the 100th anniversary of domestic civil aviation, Irkutsk, 7–8 December 2023*. Irkutsk: Moscow State Technical University of Civil Aviation; 2024. P. 249–254. (In Russ.).
3. Asalkhanova T. N., Oskolkov A. A. Improving the quality of planning and organization of work on the current maintenance of the railway track. *Modern Technologies. Systems Analysis. Modeling*. 2023;(77):73–82. (In Russ.).
4. Timofeev E. N., Sevostyanov A. A., Sokolnikov A. V. Creation of a digital model of a railway track using unmanned aerial vehicles. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(68):73–82. (In Russ.).
5. Asalkhanova T. N., Oskolkov A. A. Improving the quality of planning and organization of work on the current maintenance of the railway track. *Modern Technologies. Systems Analysis. Modeling*. 2023;(77):73–82. (In Russ.).
6. Kovalchuk A. S., Koval S. I. The use of digital technologies and services for the development of railway infrastructure. *Innovations. Science. Education*. 2022;(50):476–481. (In Russ.).
7. Sevostyanov A. A., Velichko D. V. Modeling of technological processes organizations for the content of track geometry. *Bulletin of the Railway Transport Research Institute*. 2023;82(2):168–176. (In Russ.).

8. Sevostyanov A. A. Planning and work organization on the maintenance of track geometry in the winter period of operation. *Fundamental and Applied Issues of Transport*. 2022;(7):95–102. (In Russ.).
9. Kovalenko N. I. Increasing the level of technical condition of the glandular path. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(91):125–134. (In Russ.).
10. Kovalenko N. I., Kovalenko A. N. Provision of modern directions of track infrastructure maintenance in the organization of the transportation process. *Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov – founder of transport science. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 125th Anniversary of the University, Moscow, October 22, 2021*. Moscow: Russian University of Transport; 2021. P. 382–388. (In Russ.).
11. Kovalenko N. I., Kovalenko N. A. Assessment of the risks of violation of the number of personnel in the track economy. *Track and Track Facilities*. 2024;(2):25–29. (In Russ.).
12. Sergeev E. A., Fazilova Z. T. Increasing the efficiency of the straightening technology. *Track and Track Facilities*. 2023;(2):9–11.
13. Sevostyanov A. A., Velichko D. V. Increasing the efficiency of the technological process of planned preventive straightening of the railway track. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(59):37–46. (In Russ.).
14. Sadyrin E. A., Pokatsky V. A., Kovchenko D. A., Titov K. M. Improving the productivity of straightening machines. *Track and Track Facilities*. 2020;(11):34–36. (In Russ.).
15. Tarantsev A. A., Timchenko V. S. Determination of the optimal duration of possession by simulation modeling of railway transportation processes. *Transport: Science, Technology, Management*. 2016;(6):30–35. (In Russ.).
16. Rules for assigning railway track repairs. Approved by Russian Railways Order No. 2888/r dated 17.12.2021. Moscow; 2021. 273 p. (In Russ.).
17. Dvornikov A. V. Identification of unstable track sections and forecasting of their condition. Specialty 05.22.06 Railway Track, Research and Design of Railways. Abstract of the Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Andrey Vladimirovich Dvornikov. Moscow; 2008. 24 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А. А. Севостянов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.
 С. А. Пономарев – студент факультета транспортного строительства Сибирского государственного университета путей сообщения.
 А. С. Пуха – студентка факультета транспортного строительства Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. A. Sevostyanov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Track and Track Facility Department, Siberian Transport University.
 S. A. Ponomarev – student of the Transport Construction Faculty, Siberian Transport University.
 A. S. Pukha – student of the Transport Construction Faculty, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 16.12.2024; одобрена после рецензирования 27.01.2025; принята к публикации 03.02.2025.

The article was submitted 16.12.2024; approved after reviewing 27.01.2025; accepted for publication 03.02.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 39–48.
The Siberian Transport University Bulletin. 2025. No. 1 (73). P. 39–48.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.21

doi 10.52170/1815-9265_2025_73_39

Экспериментальное определение коэффициентов закона Пэриса для моделирования процесса коррозионно-усталостного разрушения арматуры пролетных строений железобетонных мостов

Глеб Александрович Ефремов^{1✉}, Дмитрий Александрович Шестовицкий²

^{1,2} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

¹ frost0077@mail.ru[✉]

² shestovitsky@mail.ru

Аннотация. Многообразие природных и техногенных факторов и сложность железобетона с точки зрения расчета делают проблему определения срока службы железобетонных пролетных строений многогранной и комплексной. Наряду с этим в России дан старт строительству высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург, что делает проблему долговечности железобетонных пролетных строений мостов еще более актуальной. Выполнение требования СП 453.1325800 об обеспечении срока службы в 100 лет является на данный момент для проектировщика труднодостижимым, кроме того, нет способов проверки выполнения этого требования. Железобетонные мосты в условиях ВСЖМ будут подвергаться значительным динамическим воздействиям, что в совокупности с агрессивной средой может значительно снизить срок службы сооружения. В данной статье рассматривается модель расчета коррозионно-усталостной долговечности как одного из аспектов методики прогнозирования срока службы моста с учетом динамической нагрузки. Данный вид деградации железобетона вызывается комбинированным действием питтинговой коррозии арматуры и циклической нагрузки, которое приводит к зарождению и росту усталостной трещины в арматурном стержне. Проанализированы способы расчета времени роста трещины в арматуре до критической величины, выделен закон Пэриса как широко применяемый в механике разрушения. Проблема применения закона Пэриса заключается в коэффициентах материала, определяемых эмпирическим путем. При анализе зарубежной литературы обнаружено, что коэффициенты могут зависеть не только от материала, но и от конкретного сплава. Была поставлена задача провести эксперимент, позволяющий определить коэффициенты закона Пэриса для арматурной стали марки 25Г2С, которая широко используется в пролетных строениях мостов. Испытание проводилось с использованием вибромашины и образцов арматуры с начальным концентратором напряжений. По результатам эксперимента были определены коэффициенты уравнения Пэриса для арматурной стали 25Г2С, что позволяет использовать их в методике предсказания развития усталостной трещины.

Ключевые слова: железобетонные пролетные строения, срок службы, коррозионная усталость, линейная механика разрушения, железнодорожные мосты, уравнение Пэриса

Благодарности: авторы выражают искреннюю благодарность ООО «Ленспецсталь» за предоставленные образцы арматуры, а также всему коллективу лаборатории им. Белебюбского Петербургского государственного университета путей сообщения.

Для цитирования: Ефремов Г. А., Шестовицкий Д. А. Экспериментальное определение коэффициентов закона Пэриса для моделирования процесса коррозионно-усталостного разрушения арматуры пролетных строений железобетонных мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 39–48. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_39.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Experimental determination of Paris law coefficients for modeling the process of corrosion-fatigue destruction of reinforced concrete railway bridges superstructures

Gleb A. Efremov^{1✉}, Dmitriy A. Shestovitskiy²

^{1,2} Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Russia

¹ frost0077@mail.ru[✉]

² shestovitsky@mail.ru

Abstract. The variability of natural and man-made factors and the complexity of reinforced concrete calculations make the problem of estimating the service life of reinforced concrete bridges spans multifaceted and complex. Along with this, the construction of the Moscow – St. Petersburg high-speed railway has started in Russia, which makes the problem of the durability of reinforced concrete bridge spans even more actual. Fulfilling the requirement of SP 453.1325800 to ensure a service life of 100 years is currently difficult for the designer to achieve, just as there are no ways to verify compliance with this requirement. Reinforced concrete bridges under HSR conditions will be subject to significant dynamic impacts, which, together with an aggressive environment, can significantly reduce the service life of the structure. This article discusses corrosion-fatigue durability as one of the aspects of the method for predicting the service life of a bridge, taking into account the dynamic load. This type of degradation of reinforced concrete is caused by the combined action of pitting corrosion of reinforcement and cyclic loading, which leads to the initiation and growth of a fatigue crack in the reinforcing bar. Methods of calculating the time of crack growth in reinforcement up to the critical value are analysed, Paris law is highlighted as widely used in fracture mechanics. The problem of applying Paris law lies in the empirically determined material coefficients. Literature analysis shown that coefficients can depend not only from type of material but from specific alloy as well. The task was set to conduct an experiment to determine the coefficients of Paris's law for reinforcing steel grade 25G2S, which is widely used in bridge superstructure. The test was carried out using a vibrating machine and reinforcement samples with an initial stress concentrator. Based on the results of the experiment, the coefficients of the Paris equation were determined for reinforcing steel 25G2S, which will make it possible to use them in the methodology for predicting the development of fatigue cracks.

Keywords: concrete bridges, service life, corrosion-fatigue, linear elastic fracture mechanics, railway bridges, Paris law

Acknowledgments: the authors express sincere gratitude to OOO'Lenspetsstal' for providing samples of reinforcement, as well as to the entire team of the Belelubsky Laboratory at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

For citation: Efremov G. A., Shestovitskiy D. A. Experimental determination of Paris law coefficients for modeling the process of corrosion-fatigue destruction of reinforced concrete railway bridges superstructures. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2025;(73):39–48. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_39.

Введение

В настоящее время расчет железобетонных конструкций пролетных строений мостов при проектировании выполняется по двум группам предельных состояний и заключается в выполнении проверок прочности, устойчивости, выносливости, деформаций, различного рода смещений и кренов, трещиностойкости и т. д. Однако данные проверки не затрагивают проблему долговечности конструкций, метод расчета которой в нормативной документации отсутствует. Расчет срока службы сооружения не является обязательным при проектировании. Поэтому необходимы и до сих пор ведутся дальнейшие исследования в этом направлении.

В практике эксплуатации железобетонных сооружений есть случаи прихода конструкции в аварийное состояние через 5–10 лет [1]. Согласно источнику [2], около 10 % ИССО в сети ОАО «РЖД» являются дефектными. А по данным [3], срок эксплуатации пролетных строений, запроектированных под нагрузку С14, как правило, не превышает 50 лет.

Факторов, действующих на железобетонную конструкцию, огромное множество, так же как и причин, которые могут вызвать отказ и невозможность дальнейшей эксплуатации. Чтобы разработать достаточно полную модель,

охватывающую все возможные сценарии деградации железобетонного пролетного строения моста, нужны многочисленные эксперименты и исследования. В данной статье будет рассматриваться лишь часть из возможных процессов, приводящих к ухудшению эксплуатационных свойств железобетона, а именно *коррозионно-усталостное разрушение* арматуры. В железобетонных конструкциях пролетных строений мостов со временем нарушается гидроизоляция, и влага попадает внутрь, что приводит к коррозии рабочей арматуры. Коррозия бывает различных видов и может приводить как к равномерной потере сечения по всей площади рабочей арматуры, так и к разрушению металла в локальных участках. Последний вид коррозии, как правило, развивается вглубь и может привести к значительной концентрации напряжений. При этом сооружение испытывает постоянный процесс нагружения/разгружения при воздействии временной нагрузки, что, в совокупности с коррозией арматуры, оказывает негативное воздействие на долговечность конструкции с точки зрения выносливости. Методика оценки долговечности железобетонного пролетного строения в случае коррозионно-усталостного разрушения в данном исследовании базируется на методах линейной механики разрушения, одним из которых является уравнение Пэриса – Эрдогана [4]:

$$\frac{da}{dN} = C_p \Delta K^{m_p}, \quad (1)$$

где a – размер трещины; N – количество циклов временной нагрузки; C_p , m_p – коэффициенты, зависящие от материала; ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений.

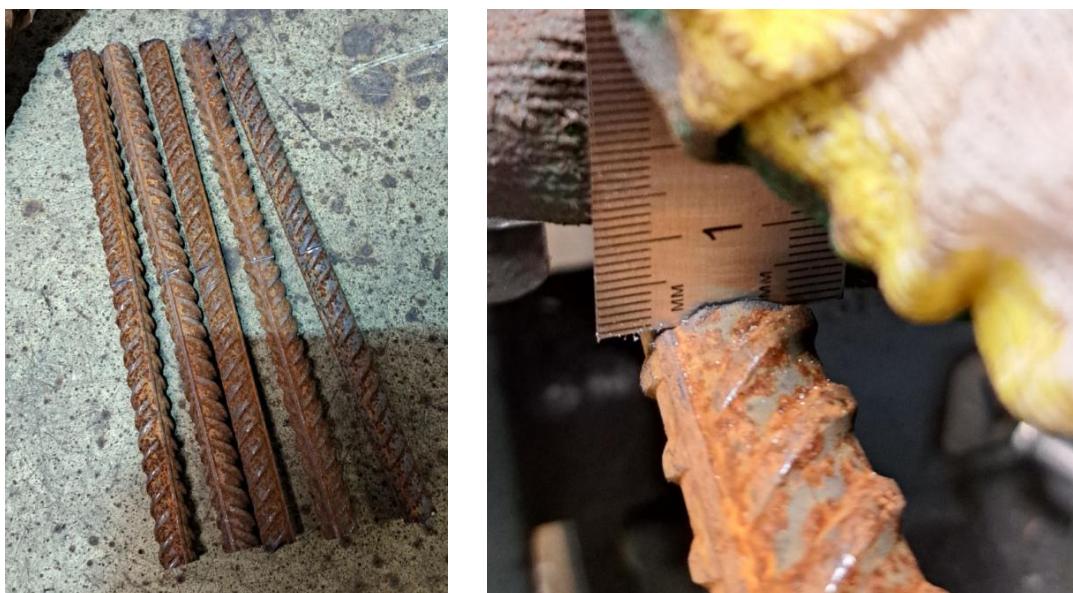
Используя данное уравнение, можно вычислить количество циклов нагрузки до роста трещины до критического значения [5, 6]. Однако уравнение может быть чувствительно к коэффициентам C_p , m_p , которые могут изменяться в зависимости от состава стали, используемой для изготовления арматуры [6]. При этом для отечественных арматурных сплавов таких исследований не производилось. Поэтому целью данного исследования было определить коэффициенты уравнения Пэриса для арматурной стали, используемой в РФ, и оценить степень влияния изменчивости коэффициентов на итоговый расчет срока роста трещины.

Метод проведения исследования

Коэффициенты уравнения Пэриса определялись экспериментальным путем. Способ вычисления коэффициентов принят с опорой на исследование [7]. Для испытаний были выбраны отдельные арматурные стержни периодического профиля, класса А-III, сталь 25Г2С, диаметр стержней 18 мм, длина – 30 см. Всего было испытано шесть образцов (рис. 1). Для создания концентрации напряжений в каждом образце был сделан пропил ножковкой глубиной 3 мм. Глубина пропила выбрана так, чтобы он составлял

около 20 % диаметра стержня, принято ближайшее целое число. Глубина пропила влияет на время зарождения усталостной трещины, однако не влияет на скорость роста трещины в единицу времени и, следовательно, на итоговые константы уравнения Пэриса, поэтому может быть выбрана произвольно. В качестве испытательной установки была использована машина с сервогидравлическим приводом, реализующая осевое нагружение с переменным усилием. Образец закрепляется в верхних и нижних зажимах машины. После проведения тестовых испытаний был определен оптимальный диапазон нагрузки 9...90 кН при частоте нагружения 10 Гц. Стоит отметить, что искомые коэффициенты уравнения Пэриса являются константами материала и не изменяются в зависимости от нагрузки и ее частоты. Поэтому решающим критерием выбора определенного диапазона и частоты стало время проведения эксперимента. При недостаточно большой частоте нагружения одного образца или самой величины нагрузки время разрушения одного стержня может составлять несколько часов, тогда как слишком большая частота сделает затруднительной видеофиксацию роста трещины. Поэтому для определения оптимального диапазона нагрузки и частоты были проведены тестовые испытания одного образца, в ходе которых калибровались данные значения.

Основная цель испытаний состоит в получении графика зависимости величины трещины a от количества циклов N . Для этого было использовано два способа: первый вклю-

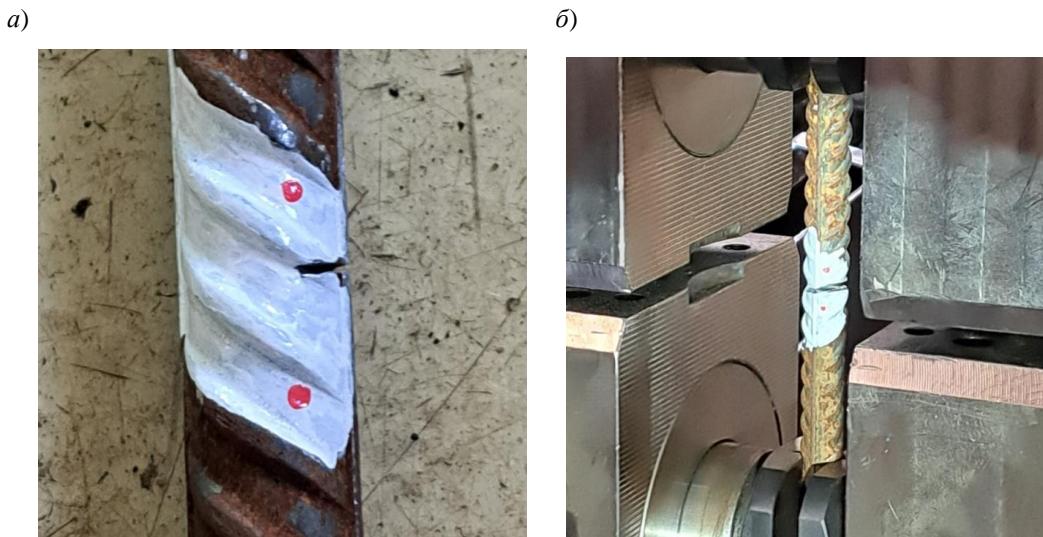


Rис. 1. Общий вид испытываемых образцов

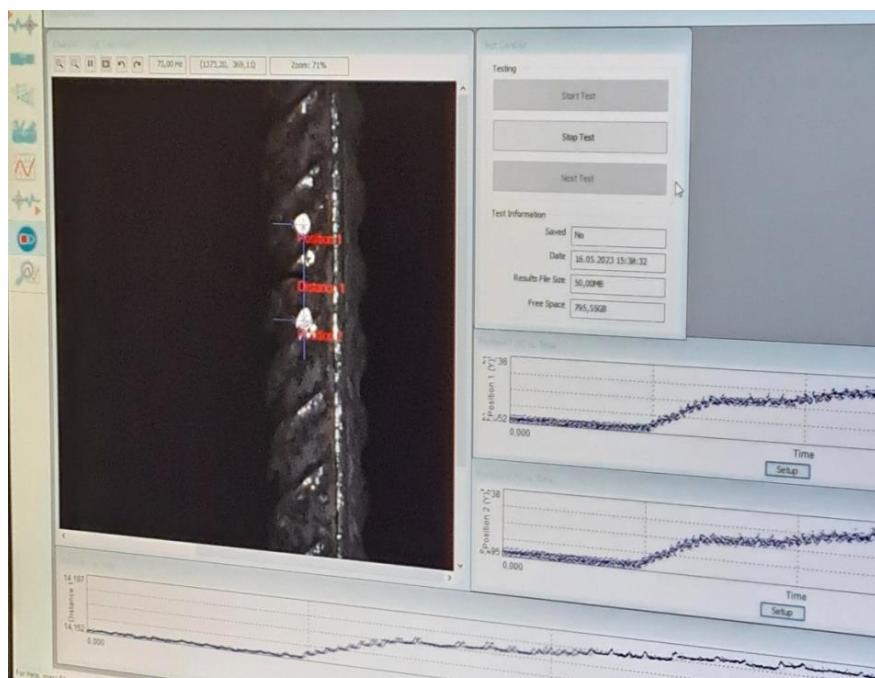
чает использование видеоэкстензометра системы iMetrum, второй предполагает применение метода инфракрасной термографии [8]. Общий вид подготовленного образца и экран записи данных видеоэкстензометра представлены на рис. 2, 3; общий вид экспериментальной установки – на рис. 4.

Для определения величины трещины впоследствии устанавливается зависимость между изменением температуры образца и приростом трещины.

Испытания проводились до разрушения образца, т. е. до момента, когда усталостная трещина разделит его на две части.



Rис. 2. Подготовленный для испытаний образец (а) и процесс испытаний (б)



Rис. 3. Экран записи данных видеоэкстензометра

На рис. 5 приведены фотографии разлома стержня; в месте, где был произведен пропил, видны полосы и глянцевый блеск. Далее начинается зона зарождения и роста усталостной трещины, в которой металлическая поверхность имеет матовый блеск и зернистую структуру.

Результаты

После проведения испытаний были получены записи данных с видеоэкстензометра в табличном формате для всех образцов (координаты отмеченных точек и расстояние между ними). Помимо этого, были сохранены видеозаписи испытаний трех образцов из семи. Сохранялись не



Рис. 4. Общий вид регистрирующих приборов и испытательной машины

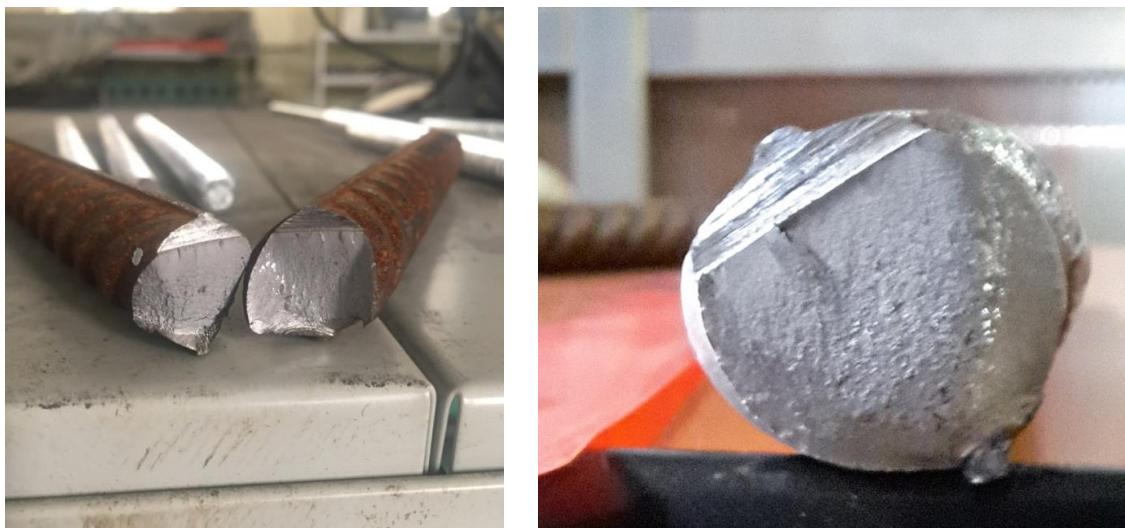


Рис. 5. Характерное поперечное сечение стержня в месте усталостного разрушения

все видеозаписи с камеры, поскольку каждая занимает значительный объем, а их обработка может быть очень продолжительной.

Для получения коэффициентов C и t уравнения Пэриса был использован его закон, представленный в графическом виде в логарифмическом масштабе (рис. 6). Представленную на рисунке кривую можно разделить на три части: I – зарождение трещины, когда она не видна, при этом КИН остается постоянным; II – линейная часть, когда наблюдается рост усталостной трещины; III – зона разрушения образца. Коэффициент C представляет собой

точку пересечения линейной части графика с осью ординат, а t – уклон линии.

Для того чтобы получить данный график, необходимо выполнить следующий алгоритм:

1. Установление зависимости между величиной трещины и расстоянием между двумя точками. Поскольку непосредственная возможность измерения величины трещины отсутствовала, были использованы видеозаписи с экстензометром, полученные при испытании образца 6. Было сделано кадрирование нескольких этапов эксперимента (с промежутком в 20 с), кадры отмасштабированы, и вели-

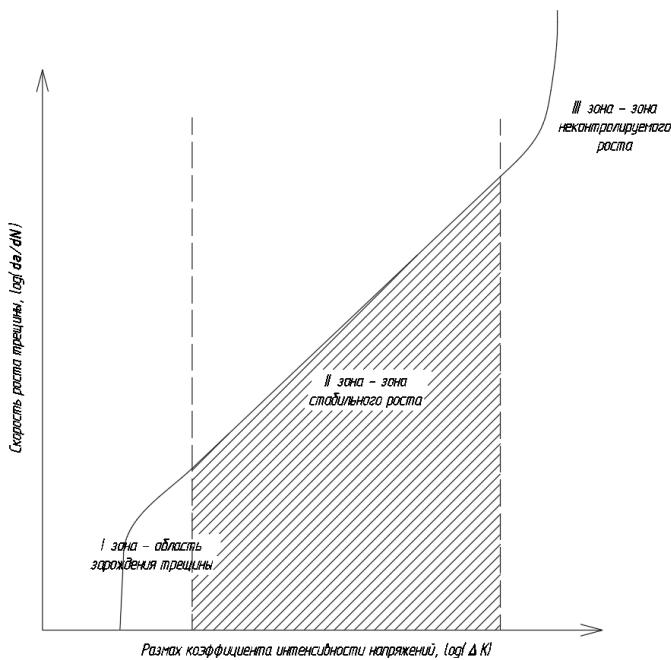


Рис. 6. График зависимости скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжений

чина трещины измерена непосредственно по полученным снимкам. На рис. 7 в качестве примера показана величина трещины с разницей в 80 с.

2. Построение графика зависимости между величиной трещины и расстоянием между отмеченными на образце точками (рис. 8).

Как видно на рис. 8, зависимость практически линейная, линия тренда и ее уравнение

также представлены на графике. Таким образом, данная функция была использована для анализа величины трещины для остальных образцов.

3. После установления функциональной зависимости между величиной трещины и расстоянием между точками, которое записывает видеоконстантом, можно построить график зависимости величины трещины и ко-

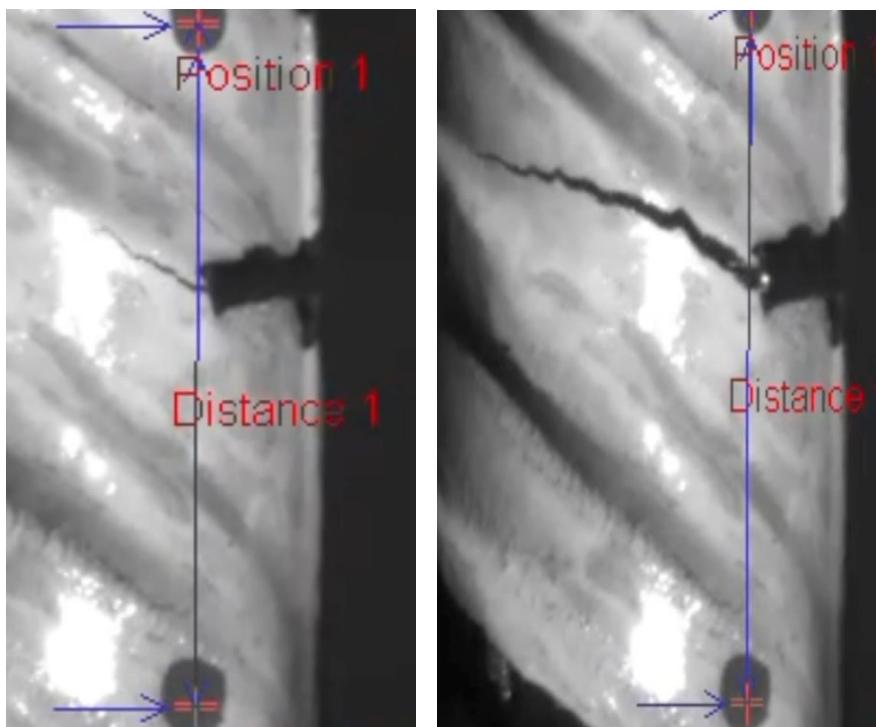


Рис. 7. Величина трещины, зафиксированная с разницей в 80 с

личества циклов нагрузки. Для этого входные данные также подверглись некоторой обработке: большая частота записи (75 Гц) приводит к трудностям аппаратной обработки данных, поэтому запись были прорежена и взята каждая 10-я строка. Также были отсечены данные, которые относятся к начальному периоду, когда роста трещины не происходило. В качестве примера на рис. 9 приведен вид графика для образца 5.

После построения графика методом экспоненциальной регрессии авторами была подобрана функция вида $a = f(N) = \beta_0 e^{\beta_1 N} + \beta_2$. Аппроксимирующая функция показана на графике красным цветом. Синим цветом нанесены точки, полученные экспериментально.

Следовательно, функция скорости роста трещины имеет следующий вид:

$$\frac{da}{dN} = \beta_0 \beta_1 e^{\beta_1 N}, \quad (2)$$

где a – размер трещины; N – количество циклов временной нагрузки; β_0 , β_1 – константы уравнения экспоненциальной регрессии.

4. Необходимо установить величину изменения коэффициента интенсивности напряжений ΔK . Формула для коэффициента интенсивности напряжений следующая:

$$\Delta K(a) = \Delta \sigma Y \left(\frac{a}{d_0} \right) \sqrt{\pi a}, \quad (3)$$

где a – величина трещины; $\Delta \sigma$ – разность напряжений в образце от прикладываемой нагрузки; d_0 – первоначальный диаметр

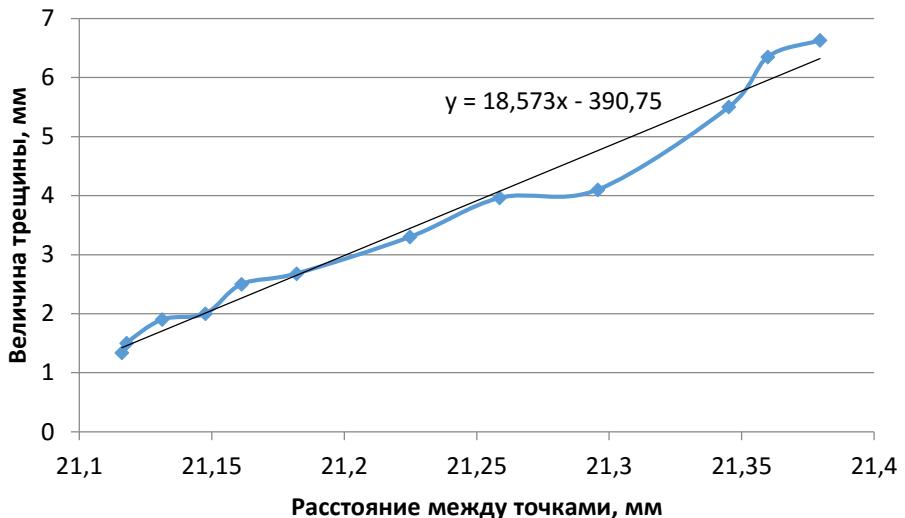


Рис. 8. График зависимости величины трещины от расстояния между точками

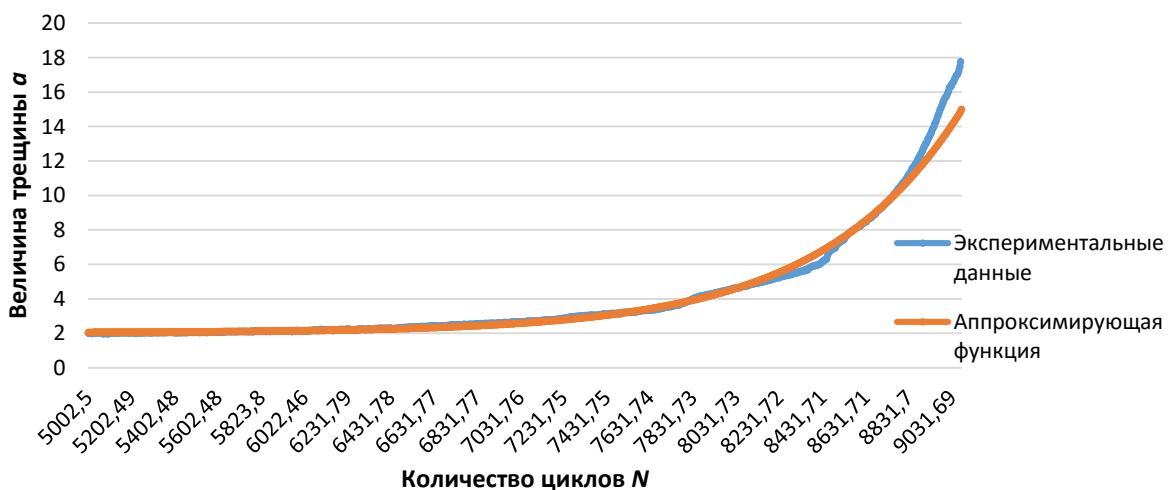


Рис. 9. График зависимости величины трещины a от количества циклов N

стержня; $Y(a/d_0)$ – эмпирическая функция, учитывающая геометрию образца.

$Y(a/d_0)$ принята по данным британского стандарта BS 7910 [9]:

$$Y\left(\frac{a}{d_0}\right) = \frac{\frac{1,84}{\pi} \left[\tan\left(\frac{\pi a}{4d_0}\right) / \frac{\pi a}{4d_0} \right]^{0,5}}{\cos\left(\frac{\pi a}{4d_0}\right)} \times \\ \times \left\{ 0,752 + 2,02 \frac{\pi a}{4d_0} + \right. \\ \left. + 0,37 \left[1 - \sin\left(\frac{\pi a}{4d_0}\right) \right]^3 \right\}. \quad (4)$$

5. После нахождения значений $\Delta K(a)$ и $\frac{da}{dN}$ строится график (в логарифмическом масштабе), отображающий закон Пэриса, и путем анализа его линейной части находятся коэффициенты уравнения (рис. 10).

Исходя из анализа графиков точка пересечения графика с осью ординат, т. е. среднее значение коэффициента C , – $1,8 \cdot 10^{-11}$, а уклон кривой, или среднее значение коэффициента m , – 3,34.

Выводы

В иностранных источниках есть некоторые расхождения относительно величины коэффициентов уравнения Пэриса. В [10] приводятся следующие значения: $C = 3,6 \cdot 10^{-10}$ и $m = 3$. Авторы исследования [7] получили

значения $C = 1,435 \cdot 10^{-10}$ и $m = 2,24$. В некоторых работах линейный участок роста трещины делится на две стадии с различными коэффициентами, так, в [5]:

$$\frac{da}{dt} = \\ = \begin{cases} 3,83 \cdot 10^{-29} \Delta K^{20,863} f & \text{for } \Delta K \leq 9 \text{ МПа}\sqrt{m}, \\ 3,16 \cdot 10^{-12} \Delta K^{3,143} f & \text{otherwise,} \end{cases}$$

где a – величина усталостной трещины в момент времени t ; ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений; f – частота прохождения поездов.

Очевидно, что коэффициенты могут быть различными в зависимости от материала, способа проведения эксперимента, способов расчета и обработки данных и т. п. Полученные значения в целом близки к существующим в литературе.

Проанализируем влияние разницы коэффициентов на итоговую величину циклов до развития трещины до критического значения. Модель роста трещины, которая будет при этом использоваться, описана в статье [11]. Путем подстановки в модель коэффициентов, полученных опытным путем и описанных в литературе, были определены значения времени роста трещины в циклах (таблица). Входные параметры были заданы следующие: номинальное изменение напряжений за один цикл $\sigma = 100$ МПа; максимальная величина трещины, при которой

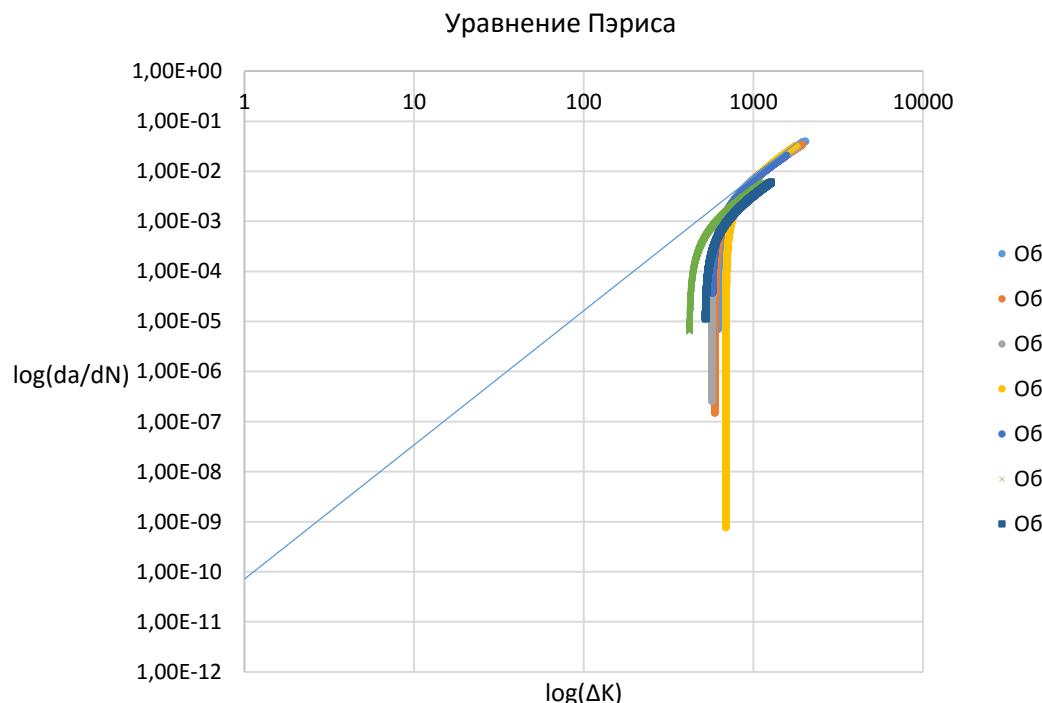


Рис. 10. Графики закона Пэриса для каждого из образцов

Сравнение результатов расчета

Коэффициент C	Коэффициент t	Количество циклов до критической величины N_{cr}
<i>С использованием различных коэффициентов C</i>		
$3,6 \cdot 10^{-10}$	3,34	2 135
$1,435 \cdot 10^{-10}$		5 346
$1,8 \cdot 10^{-11}$		42 573
$3,16 \cdot 10^{-12}$		212 800
<i>С использованием различных коэффициентов t</i>		
$1,8 \cdot 10^{-11}$	3,34	42 573
	3,00	180 300
	2,24	5 285 000
	3,14	99 090

алгоритм расчета прерывается, $a_{max} = 0,75d_0$, где $d_0 = 18$ мм – диаметр стержня.

Отсюда можно сделать вывод, что использование в расчетах различных коэффициентов уравнения Пэриса может привести к значительной погрешности итогового результата и следует уточнять их экспериментально для различных стальных сплавов.

Таким образом, подводя итоги выполненной работы, можно заключить следующее:

1. Авторами проведена экспериментальная работа, в ходе которой были установлены коэффициенты уравнения Пэриса для арматуры класса 25Г2С, а также получена зависимость скорости роста трещины от количества циклов изменения нагрузки.

2. Данное исследование позволит внедрить уравнение Пэриса в методику расчета срока службы железобетонных пролетных строений, что дает возможность напрямую оценивать влияние динамической нагрузки на скорость роста трещины и на время до разрушения стержня.

3. Уточнение методик расчета срока службы с применением полученных авторами результатов позволит проектировать более долговечные сооружения, обосновывать нормативные сроки службы, более правильно рассчитывать выделение бюджетных средств на ремонты ИССО, в том числе внеплановые, и проектировать более долговечные сооружения.

Список источников

1. Селяев В. П. Расчет долговечности железобетонных конструкций // Вестник Мордовского университета. 2008. № 4. С. 140–149.
2. Бокарев С. А., Яшнов А. Н., Прибыtkov C. S. Концепция системы управления состоянием инженерных сооружений на железных дорогах России // Политранспортные системы : материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». Новосибирск, 2015. С. 92–98.
3. Бокарев С. А., Прибыtkov C. S., Ефимов С. В. Остаточный ресурс железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20, № 3. С. 169–183.
4. Sun J., Ding Z., Huang Q. Corrosion fatigue life prediction for steel bar in concrete based on fatigue crack propagation and equivalent initial flaw size // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 195. P. 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.056>.
5. Probabilistic lifetime assessment of RC structures under coupled corrosion-fatigue deterioration / Emilio Bastidas-Arteaga, Philippe Bressolette, Alaa Chateauneuf, Mauricio Sanchez-Silva // Structural Safety. 2009. Vol. 31. P. 84–96.
6. Assessment of fatigue resistance of concrete: S-N curves to the Paris' law curves / P. Miarka, S. Seitl, V. Bilek, H. Cifuentes // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127811>.
7. Sobieck Tyler, Atadero Rebecca A., Mahmoud Hussam N. Fatigue Crack Propagation of Notched Steel Rebar in RC Beams Repaired with Externally Bonded CFRP // Journal of Composites for Construction. 2014. Vol. 19, No. 5. 11 p.
8. Глушков С. П, Соловьев Л. Ю., Соловьев А. Л. Экспериментальная оценка долговечности сварных металлических пролетных строений мостов методом инфракрасной термографии // Строительство и архитектура. 2018. № 2 (45). С. 63–71.
9. BS 7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. British Standards Institution (BSI). London, 2013. 306 p.

10. Barsom J. M., Rolfe S. T. Fracture and fatigue control in structures: Applications of fracture mechanics. Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, 1999. 562 p.

11. Ефремов Г. А., Мячин В. Н., Шестовицкий Д. А. Влияние циклической нагрузки на коррозионно-усталостную долговечность пролетных строений железобетонных мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 3 (66). С. 51–60.

References

1. Selyaev V. P. Calculation of durability of reinforced concrete structures. *Bulletin of the Mordovian University*. 2008;(4):140–149. (In Russ.).
2. Bokarev S. A., Yashnov A. N., Pribytkov S. S. Concept of the condition management system of engineering structures on railways of Russia. *Polytransport systems: Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference within the framework of the Russia-EU Year of Science. Scientific problems of implementing transport projects in Siberia and the Far East*. Novosibirsk; 2015. P. 92–98. (In Russ.).
3. Bokarev S. A., Pribytkov S. S., Efimov S. V. Residual life of reinforced concrete superstructures of railway bridges. *Journal of Construction and Architecture*. 2018;20(3):169–183. (In Russ.).
4. Sun J., Ding Z., Huang Q. Corrosion fatigue life prediction for steel bar in concrete based on fatigue crack propagation and equivalent initial flaw size. *Construction and Building Materials*. 2019;195:208–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.056>.
5. Bastidas-Arteaga Emilio, Bressolette Philippe, Chateauneuf Alaa, Sanchez-Silva Mauricio. Probabilistic lifetime assessment of RC structures under coupled corrosion-fatigue deterioration. *Structural Safety*. 2009;31:84–96.
6. Miarka P., Seitl S., Bilek V., Cifuentes H. Assessment of fatigue resistance of concrete: S-N curves to the Paris' law curves. *Construction and Building Materials*. 2022;341. 10.1016/j.conbuildmat.2022.127811.
7. Sobieck Tyler, Atadero Rebecca A., Mahmoud Hussam N. Fatigue Crack Propagation of Notched Steel Rebar in RC Beams Repaired with Externally Bonded CFRP. *Journal of Composites for Construction*. 2014;19(5):11.
8. Glushkov S. P., Solovyev L. Yu., Solovyev A. L. Experimental assessment of the durability of welded metal bridge spans using the infrared thermography method. *Construction and Architecture*. 2018;(45):63–71. (In Russ.).
9. BS 7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. *British Standards Institution (BSI)*. London; 2013. 306 p.
10. Barsom J. M., Rolfe S.T. Fracture and fatigue control in structures: Applications of fracture mechanics. Butterworth-Heinemann, Woburn, MA; 1999. 562 p.
11. Efremov G. A., Myachin V. N., Shestovitskiy D. A. Influence of cyclic loading on corrosion-fatigue life of concrete bridges superstructure. *Bulletin of Siberian State Transport University*. 2023;(66):51–60. (In Russ.).

Информация об авторах

Г. А. Ефремов – аспирант кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, ведущий специалист ООО «Научно-исследовательский и проектный институт “Транспортной и строительной безопасности”».

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

Information about the authors

G. A. Efremov – Postgraduate of the Bridges Department, Leading Specialist of the Research and Design Institute of Transport and Construction Safety, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

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

Статья поступила в редакцию 10.09.2024; одобрена после рецензирования 15.10.2024; принятая к публикации 13.01.2025.

The article was submitted 10.09.2024; approved after reviewing 15.10.2024; accepted for publication 13.01.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.159.2

doi 10.52170/1815-9265_2025_73_49

Резервы увеличения производительности кольцевой пневмоударной машины при сооружении нагельных креплений грунтовых откосов

Валерий Николаевич Анферов¹, Павел Юрьевич Сырямин²,
Юрий Николаевич Сырямин^{3✉}

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

¹ avn43@mail.ru

² usokstu@ya.ru

³ syryaminun@stu.ru✉

Аннотация. В статье рассмотрена сущность нагельного крепления для обеспечения устойчивости стен глубоких котлованов, откосов оврагов или крутых склонов поверхности земли. Для реализации этого прогрессивного вида крепи, особенно в стесненных условиях строительства, при «точечной застройке» в городских условиях, рассматриваются возможности применения кольцевой пневмоударной машины типа ПУМ. На основе анализа особенностей конструкции, рабочего цикла этих машин и производственных испытаний выявлены резервы увеличения эксплуатационной производительности при работе ударной системы в целом.

Расчеты показали, что даже при незначительной подвижности забиваемого в грунт стержневого элемента большая часть энергии первой волны ударного импульса (более 75 %) не расходуется на совершение полезной работы. Кроме этого, теряется достаточно много времени (до 20 % времени цикла забивки) на восприятие реактивной силы отдачи, т. е. ручное поджатие машины к забою в начале внедрения стержня. Имеются дополнительные потери времени на замену клиновых кулаков по мере их износа.

Обоснована целесообразность разработки и внедрения податчика – устройства для создания внешней поджимающей силы на корпус ударной машины, которая позволяет выбрать все возникающие в ударной системе зазоры и создать оптимальные условия для работы зажимного механизма. Предложена конструкция быстроразборного клинового зажимного механизма, позволяющего в течение 5...7 мин произвести замену кулаков.

Ключевые слова: нагельное крепление, кольцевая ударная машина, подвижность стержня, потери энергии удара, податчик, зажимной механизм

Для цитирования: Анферов В. Н., Сырямин П. Ю., Сырямин Ю. Н. Резервы увеличения производительности кольцевой пневмоударной машины при сооружении нагельных креплений грунтовых откосов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 49–56. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_49.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Reserves for increasing the productivity of an annular pneumatic impact machine during the construction of dowel fastenings of soil slopes

Valery N. Anferov¹, Pavel Yu. Syryamin², Yury N. Syryamin^{3✉}

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

¹ avn43@mail.ru

² usokstu@ya.ru

³ syryaminun@stu.ru✉

Abstract. The essence of dowel fastening for ensuring the stability of the walls of deep pits, slopes of ravines or steep slopes of the earth's surface is considered. To implement this progressive type of support, especially in cramped construction conditions, during “spot development” in urban conditions, the possibility of using an annular pneumatic impact machine of the PUM type is being considered. Based on an analysis of the design features, the operating cycle of these machines and production tests, reserves for increasing operational productivity during the operation of the impact system as a whole were identified.

Calculations have shown that even with insignificant mobility of the rod element driven into the ground, most of the energy of the first wave of the shock impulse (more than 75 %) is not spent on performing useful work. In

addition, quite a lot of time is lost (up to 20 % of the driving cycle time) on the perception of the reactive recoil force, i. e. there is manually pressing the machine towards the face at the beginning of the insertion of the rod. There is additional time lost in replacing the wedge cams as they wear out.

The feasibility of the development and implementation of a feeder is substantiated – a device for creating an external pressing force on the body of the impact machine, which allows you to select all the gaps that arise in the impact system and create optimal conditions for the operation of the clamping mechanism. The design of a quick-dismounting wedge clamping mechanism has been proposed, which allows replacing cams within 5...7 minutes.

Keywords: dowel fastening, annular impact machine, rod mobility, impact energy loss, feeder, clamping mechanism

For citation: Anferov V. N., Syryamin P. Yu., Syryamin Yu. N. Reserves for increasing the productivity of an annular pneumatic impact machine during the construction of dowel fastenings of soil slopes. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):49–56. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_49.

Введение

В стесненных условиях строительства, особенно при «точечной застройке», рядом с уже существующими сооружениями, действующими транспортными коммуникациями, при строительстве метрополитенов мелкого заложения очень важным является усиление и стабилизация свойств грунтовых оснований, обеспечение устойчивости стен глубоких котлованов, откосов оврагов или крутых склонов поверхности земли. Прогрессивным видом крепи котлованов является метод облегченного стержневого крепления, основанный на идее армирования нагелями грунтового массива, который успешно применяется в России при строительстве объектов различного назначения, в том числе и метрополитенов [1, 2]. На рис. 1 приведена схема работы стержневой крепи. Суть метода состоит в том, что в стенки или откосы котлована внедряются стержни (нагели) из арматурной стали или других материалов. Армированный таким образом слабый малосвязный грунт образует квазимонолитный блок – стенку конечной толщины, которая приобретает свойства подпорной стенки, способной выдержать нагрузку как

от бокового давления грунта, так и располагаемую на поверхности по бортам котлована. В итоге создается «грунтостальная» гравитационная подпорная стена, в которой растягивающие усилия воспринимаются армирующими стержнями, а сжимающие – грунтом.

Грунт, находящийся в соприкосновении с арматурой, воспринимает усилия благодаря арочному эффекту, по линиям равных давлений в виде «арок», протянувшихся между соседними стержнями. Стержни воспринимают растягивающие силы благодаря силам сцепления с грунтом. Растяжение в арматуре возникает потому, что грунт стремится расширяться в поперечном направлении под влиянием приложенной нагрузки.

Малая жесткость подобного рода элементов (длина до 10 м при диаметре 16...60 мм) не позволяет эффективно производить погружение торцевым воздействием и приводит к росту трудоемкости производства этих работ. В технологических картах иногда даже не указывается конкретное средство механизации, т. е. решение должен принимать производитель работ. У производителей работ выбор

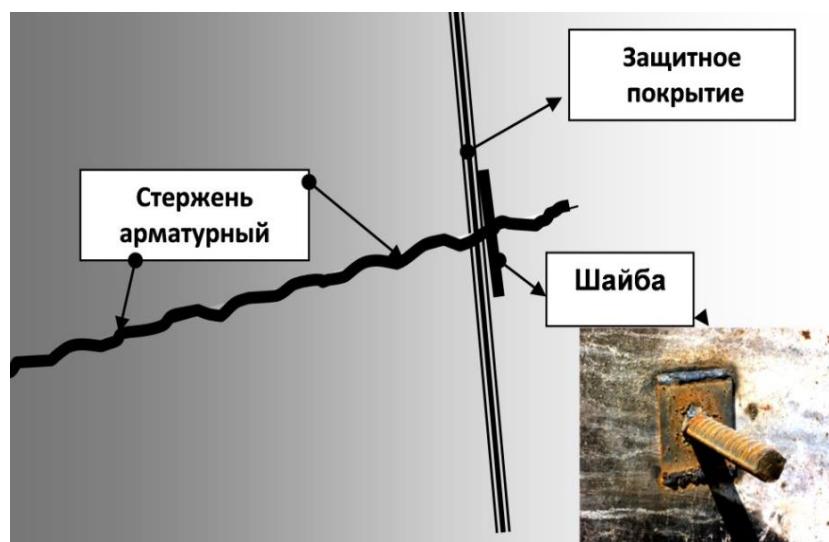


Рис. 1. Схема стержневой крепи

обычно невелик: либо использовать дорогостоящие буровые станки в таких стесненных условиях, либо производить погружение неяжестких стержневых элементов ручным пневмоинструментом торцевым ударным воздействием при больших затратах ручного труда.

Для механизации подобного рода работ в ИГД СО РАН и СГУПС (г. Новосибирск) был создан типоразмерный ряд пневмоударных машин со сквозным осевым каналом и зажимным механизмом [3, 4] (ПУМ-3, ПУМ-35, ПУМ-65). Конструкция машин позволяет наносить удар в произвольном сечении погружаемому элементу, торец которого остается свободным. Наличие свободного торца открывает новые технологические возможности. Например, при сооружении буроинъекционных нагелей, инъектировании и пр. возможна подача через осевой канал к забою технологических элементов, растворов и смесей одновременно с процессом погружения или извлечения.

При сооружении нагельного крепления грунтовых стенок котлованов и откосов нормативные документы (СТО-ГК «Трансстрой»-013-2007) рекомендуют для забивки в грунт стержневых технологических элементов диаметром 12...30 мм использовать специальные пневмоударные машины типа ПУМ. На рис. 2 изображена конструкция одной из первых модификаций таких машин – ПУМ-65. В серии машин ПУМ (ПУМ-3, ПУМ-35) принята бесклапанная система воздухораспределения с одной

управляемой камерой, а в ПУМ-65 та же система, но с двумя управляемыми камерами.

Управляемой называется камера, которая периодически сообщается с атмосферой. В бесклапанной системе воздухораспределительным элементом является сам ударник 6 (рис. 2). При любой системе под действием давления сжатого воздуха в камере рабочего хода ударник 6 разгоняется и наносит удар по наковальне 2, связанной через клиновой зажимной механизм со стержневым элементом. На рис. 3 показан момент производственных испытаний машины ПУМ-65 при сооружении нагельного крепления котлована на ул. Восход (г. Новосибирск).

Задачи исследования

Анализ применения кольцевых пневмоударных машин в различных условиях показывает, что имеются резервы для увеличения их производительности при забивке технологических элементов в горизонтальном или пологонаклонном направлении. Особенно явно это проявляется при нагельном креплении в супесчаных, мало связанных и насыпных грунтах.

На первых стадиях забивки армирующего элемента в любых условиях заметно снижена производительность, а в песчаных грунтах низкой влажности процесс забивки в целом практически прекращается. На наш взгляд, это связано с появлением осевой подвижности стержня, т. е. с циклическим возникновением зазора между забоем и нагелем.

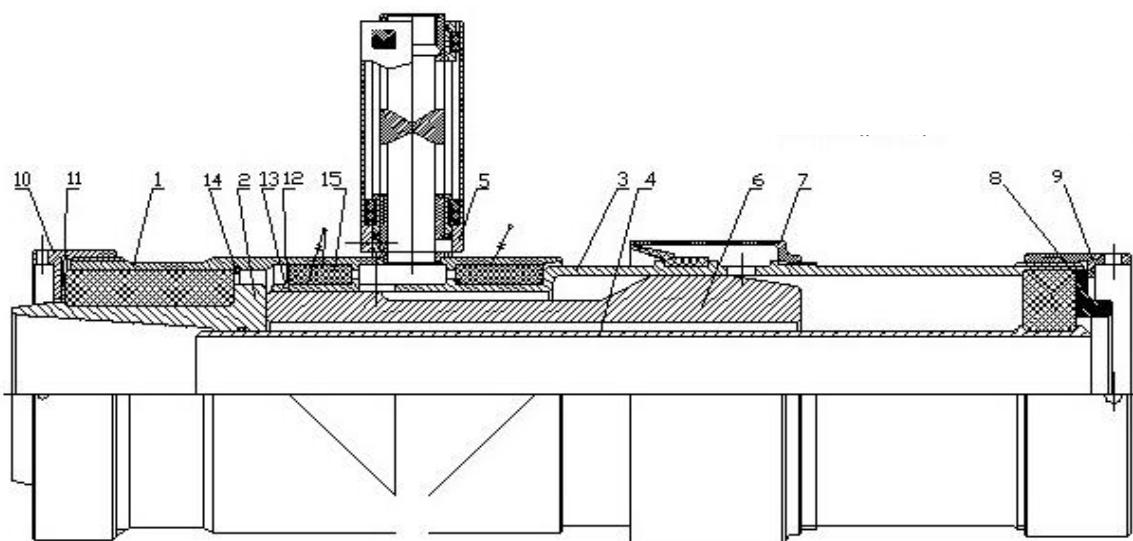


Рис. 2. Машина ПУМ-65:

1 – корпус; 2 – наковальня; 3 – гильза; 4 – трубка центральная; 5 – штуцер; 6 – ударник; 7 – глушитель; 8 – шайба; 9, 10 – гайки; 11–14 – кольца стопорные; 15 – амортизатор

Основной причиной появления подвижности нагеля (зазора) является действие на корпус машины реактивной силы отдачи от давления сжатого воздуха в камере прямого хода. На этапе внедрения реактивные силы отдачи практически всегда превышают силы трения грунта, удерживающие нагель от извлечения. Это подтверждается серией натурных опытов, проведенных на полигоне «Зеленая горка» (ИГД СО РАН) по определению сил трения по боковой поверхности забитого в грунт стержня, удерживающих его от извлечения [2, 5] (рис. 3).

Кроме этого, при погружении в грунт нагелей с боковой рифленой поверхностью (строительной арматуры) вокруг образуемой скважины из-за выступов на рифлении арматуры происходит местное изменение (разрушение) структуры грунтового массива, связность его частиц падает, а значит, уменьшаются и силы трения, удерживающие нагель в

грунте. Анализ показывает, что даже при отсутствии явных зазоров в системе вследствие возможного обратного продвижения нагеля на извлечение может существенно снижаться производительность работы.

Результаты исследования

Рассмотрим физическую картину передачи ударного импульса в системе «ударник – стержневой элемент – грунт» при наличии зазора между стержнем и грунтовым забоем, показанную на рис. 4. Ударное воздействие на стержень неторцевое, через зажимной механизм. Зазор между зажимом и стержнем принят равным нулю, так как в изготавливаемой для производства пневмоударной машине применен внутренний принудительный пневмоподжим клиновых кулачков к стержню [5].

В качестве исходных данных приняты параметры машины ПУМ-65 и нагель из прутка

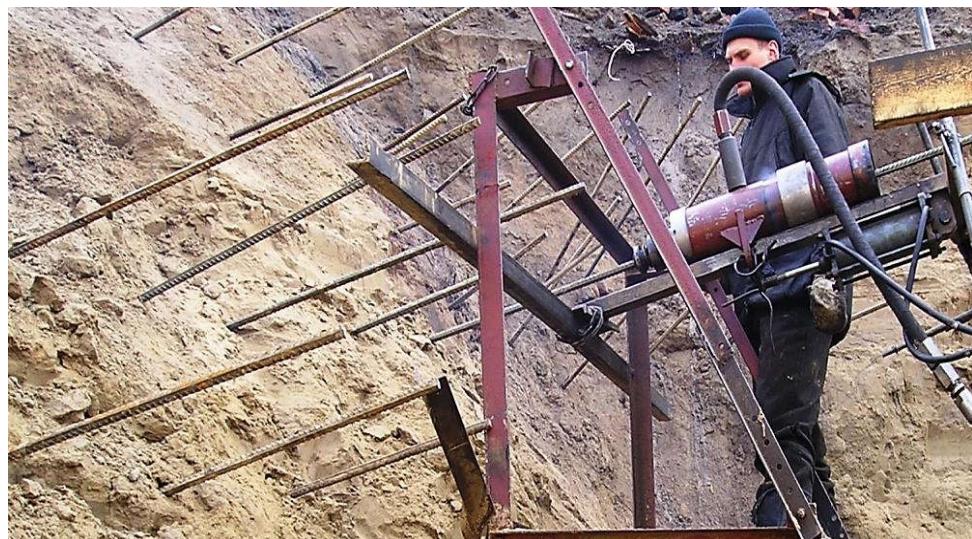


Рис. 3. Производственные испытания машины ПУМ-65

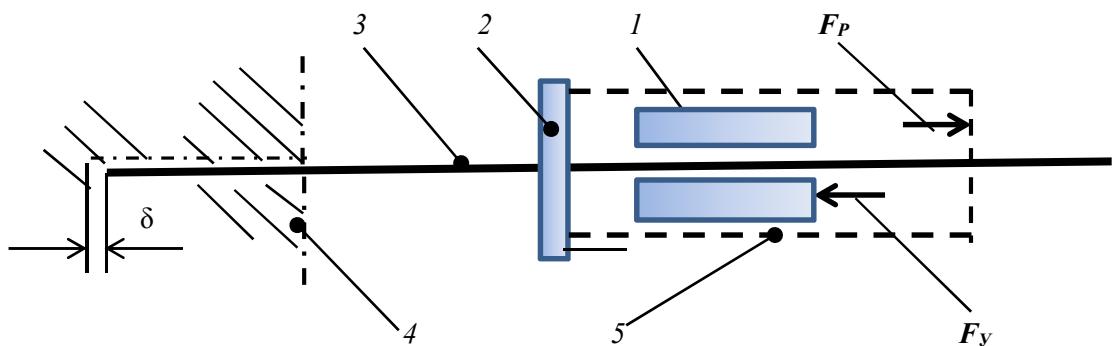


Рис. 4. Схема ударной системы:

1 – ударник; 2 – зажимной механизм с корпусом машины; 3 – стержень; 4 – грунтовый массив; 5 – корпус машины; F_y , F_p – силы от давления сжатого воздуха, действующие на ударник и корпус машины соответственно; δ – зазор

арматурной стали диаметром $d = 25$ мм и длиной $l_c = 9$ м.

Площадь сечения арматурного стержня $A_2 = 5 \text{ см}^2$; площадь сечения ударника $A_1 = 68 \text{ см}^2$; длина ударника $l = 0,33$ м; масса ударника $m = 18$ кг; предударная скорость ударника $v_0 = 5 \text{ м/с}$; плотность стали $\rho = 800 \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$; скорость распространения волны деформаций в стали $V = 5000 \text{ м/с}$; ρV – акустическая жесткость.

Площадь сечения ударника больше сечения стержня в $68/5 = 13,2$ раза. Следовательно, в первом приближении можно принять, что в волноводе формируется ступенчатый ударный импульс с амплитудами ступеней, уменьшающимися во времени [6, 7].

Амплитудные усилия в ударном импульсе определяются как

$$F_i = ((C_1 - C_2)/(C_1 + C_2))^{i-1} C_1 C_2 / (C_1 + C_2) v_0, \quad (1)$$

где C_1, C_2 – ударные жесткости стальных ударника и волновода соответственно, $\text{кг}\cdot\text{с}/\text{м}$.

$$C_1 = \rho V A_1 = 800 \cdot 5000 \cdot 68 \cdot 10^{-4} = 27200,$$

$$C_2 = \rho V A_2 = 800 \cdot 5000 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 2000.$$

Так как $(C_1/C_2) > 5$, то, по выводам ряда исследователей [7], с достаточной для практических целей точностью ступенчатая форма ударного импульса соответствует экспоненциальному закону. С увеличением числа ступеней в импульсе, а значит, уменьшением их длительности экспоненциальная форма опи-

сывается более точно. После расчета по формуле (1) для принятых пяти ступеней получены следующие усилия в i -х ступенях: $F_1 = 93$; $F_2 = 80$; $F_3 = 69$; $F_4 = 59$; $F_5 = 51$.

Продолжительность каждой ступени ударного импульса

$$T = 2l/V = 2 \cdot 0,33 / 5000 = 132 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 132 \text{ мкс}.$$

На рис. 5 показана зависимость усилий в ударном импульсе от его продолжительности. Энергия пяти ступеней ударного импульса в общем случае

$$E = (1/C_2) \int_0^\tau F_i^2(t) dt, \quad (2)$$

где $C_2 = \rho V A_2$ – ударная жесткость волновода; τ – продолжительность импульса.

Для прямоугольного импульса продолжительностью T

$$E = F_i^2 \frac{T}{C_2}. \quad (3)$$

Энергия ступенчатого импульса с одинаковой продолжительностью T определится как сумма энергий элементарных прямоугольных импульсов:

$$E_\Sigma = \frac{T}{C_2} \sum_{i=1}^5 F_i^2 = (132 \cdot 10^{-6} / 2000) (9,3^2 + 8^2 + 6,9^2 + 5,9^2 + 5,1^2) \cdot 10^6,$$

$$E_\Sigma = 17,42 \text{ кгм} = 171 \text{ Дж.}$$

Теоретически энергия ступенчатого импульса, формируемого в волноводе ударником большего сечения, равна кинетической энергии

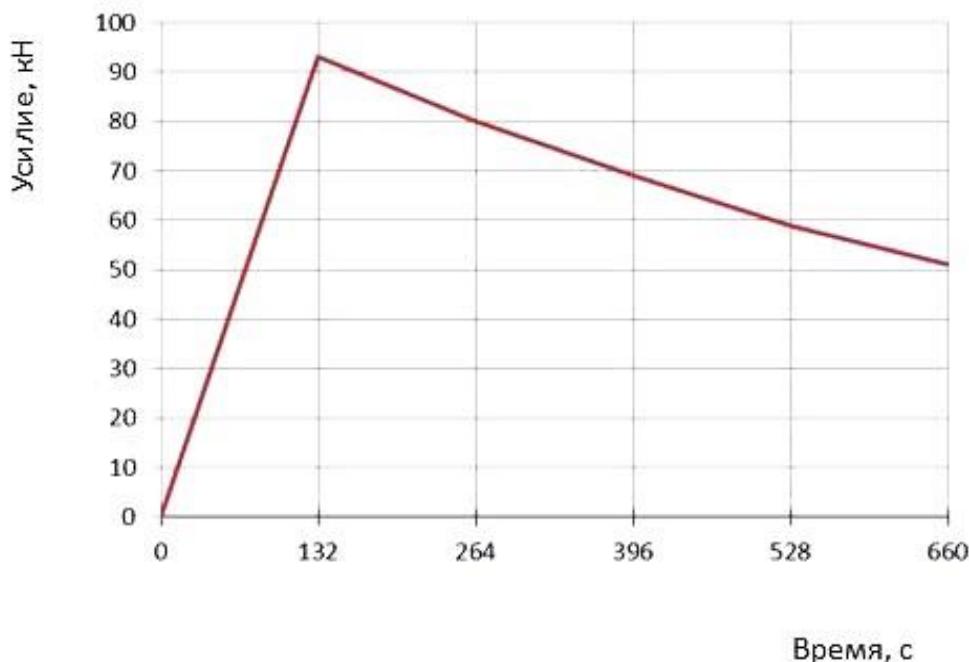


Рис. 5. Зависимость усилий в импульсе от времени

ударника перед ударом, а ударный импульс имеет бесконечную продолжительность.

Кинетическая энергия ударника перед ударом

$$E_y = m v_0^2 / 2 = 1,8 \cdot 5^2 / 2 = 22,5 \text{ кгм} = 220 \text{ Дж.}$$

Таким образом, в пяти первых ступенях содержится $E_{\Sigma}/E_y = (171/220) \cdot 100 \% = 77,8 \%$ энергии всего импульса.

Продолжительность первых пяти ступеней

$$T = 132 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 660 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 660 \text{ мкс.}$$

При распространении по волноводу они охватывают участок длиной

$$l_b = V T = 5000 \cdot 660 \cdot 10^{-6} = 3,3 \text{ м.}$$

Ударяемое тело (зажим-стержень) перед ударом неподвижно, т. е. $V_2 = 0$. При воздействии ударника они начинают совместное движение, поэтому коэффициент восстановления скорости принят равным нулю (неупругий удар).

По теореме об изменении количества движения совместная скорость ударной системы «ударник – зажим – стержень»:

$$V_c = m_1 v_0 / (m_1 + m_2) = 18 \cdot 5 / (18 + 35) = 1,7 \text{ м/с.}$$

Если принять зазор между стержнем и зажимом $\delta = 10 \text{ мм}$, что близко к реальности, то время прохождения ударной системой этого зазора составит

$$t = \delta / V_c = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ с,}$$

это время много больше продолжительности прохождения пяти ступеней импульса $T = 660 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, т. е. основная энергия ударного импульса (77,8 %) не реализуется на погружение стержня в грунт, а отразится волной рас-

тяжения в волновод. При этом погружение стержня в грунт возможно только за счет гораздо меньшей энергии отраженных волн.

Таким образом, при наличии осевой подвижности стержневого технологического элемента (зазора) в системе «ударник – зажим – стержень – грунтовый массив» производительность забивки в грунты резко падает или даже становится нулевой.

Рекомендации

Для повышения эффективности работы ударной системы в целом был разработан податчик, создающий внешнее дополнительное силовое воздействие на корпус ударной машины. В качестве привода для податчика рационально использовать пневмоцилиндр, осевое воздействие от которого на корпус пневмоударной машины позволяет:

- выбрать все зазоры в ударной системе;
- создать предварительные напряжения сжатия в зонах контакта клиновых кулачков со стержнем и контакта стержня с грунтом;
- использовать вместо штатного клинового зажима с принудительным пневмоподжимом быстроразборный зажимной механизм (рис. 6).

Быстрая разборка особенно важна в производственных условиях, так как в процессе работы острые рабочие кромки клиновых кулачков затупляются (для арматурных стержней – в течение 2...3 ч непрерывной работы) и их необходимо заменить или отправить на наплавку твердосплавными электродами с последующей

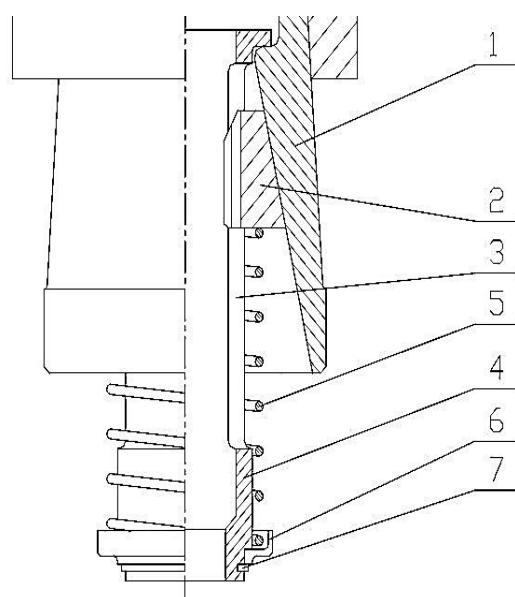


Рис. 6. Быстроразборный зажимной механизм:

1 – наковальня; 2 – кулачки; 3 – пазы; 4 – гильза; 5 – пружина; 6 – тарелка; 7 – кольцо стопорное



Рис. 7. Податчик с ударной машиной типа ПУМ на объекте

заточкой рабочих кромок. Для разборки предлагаемого зажимного механизма необходимо снять только стопорное кольцо 7 и кулачки 2 беспрепятственно извлекаются из пазов 3 и наковальни 1.

Разработанный податчик (рис. 7) состоит из рамы, на которой смонтирована подвижная каретка. Ударная машина установлена на каретке и связана через кронштейн с пневмоцилиндром. Податчик в комплекте с машиной типа ПУМ перед началом работы якорится перед грунтовым забоем. Последовательное переключение пневмоцилиндра на выдвижение-втягивание штока приводит соответственно к синхронному процессу забивки стержневого элемента от ударного воздействия машины или перехвату ее по стержню под действием реактивной силы в следующую позицию по направлению от забоя.

Процесс ударного погружения стержня происходит периодическими захватками длиной, равной ходу штока пневмоцилиндра. Такая технология позволяет воздействовать ударом на длинный нежесткий стержень в любом его сечении и исключить его «игру» в попечном направлении, а также повысить время работы кулачков до замены или наплавки.

Пневмоударные машины со сквозным осевым каналом являются перспективным техническим средством для реализации современных технологических процессов, в том числе при выполнении специальных строительных работ по устройству нагельного крепления откосов земляных сооружений, усилению и стабилизации грунтовых оснований, устраниении дефектов земляного полотна автомобильных и железных дорог инъектированием стабилизирующих растворов [8–10].

Таким образом, введение в ударную систему внешнего силового воздействия от податчика позволяет устранить относительную подвижность элементов ударной системы; повысить эффективность использования энергии ударного импульса, а значит, машины в целом; увеличить производительность работ по забивке стержневых технологических элементов и снизить затраты ручного труда. Применение предлагаемого быстроразборного зажимного механизма обеспечивает возможность производить замену клиновых кулачков с затупившимися рабочими кромками за меньшее время, что также способствует увеличению производительности работ за счет снижения суммарного времени цикла.

Список источников

1. Комплекс мобильных машин и механизмов для упрочнения и армирования грунтов / М. Я. Крицкий, Ю. Н. Сырямин, Б. Н. Смоляницкий, Н. Ф. Скоркин // Опыт строительства и реконструкции зданий и сооружений на слабых грунтах : сборник научных трудов. Архангельск, 2003. С. 73–78.
2. Создание комплекса мобильных машин для усиления грунтовых оснований / Е. П. Русин, Б. Н. Смоляницкий, С. Б. Стажевский, П. Ю. Сырямин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2007. № 6. С. 49–58.
3. Богинский В. П., Смоляницкий Б. Н. Пневмоударные машины для погружения легких стержневых элементов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1981. № 2. С. 67–72.
4. Пневмопробойники / К. С. Гурков, В. В. Климаншко, А. Д. Костылев [и др.]. Новосибирск, 1990. 218 с.
5. Кириллов А. А., Смоляницкий Б. Н., Сухарева Л. И. Моделирование процесса передачи энергии удара через боковую поверхность стержневого элемента // Горные и строительные вибрационные машины и процессы : сборник научных трудов ИГД СО РАН. Новосибирск, 1988. С. 18–24.

6. Андреев В. Д. Формирование импульсов напряжений в ударных узлах буровых машин // Взрывное дело. 58/15. Москва : Недра, 1966. С. 147–156.
7. Расчет ударных систем с неторцевым соударением элементов / О. Д. Алисов, В. К. Манжосов, В. Э. Еремянц, Л. М. Мартыненко. Фрунзе : Илим, 1978. 109 с.
8. Каганов Г. М., Евдокимова И. М. Армированный грунт в гидротехническом строительстве // Обзорная информация. Серия «Строительные конструкции и материалы». Москва, 1996. Вып. 3. 61 с.
9. Джоунс К. Д. Сооружения из армированного грунта. Москва : Стройиздат, 1989. 281 с.
10. Лечение болезней земляного полотна с использованием современных технологий / М. Я. Крицкий, В. И. Пусков, В. Ф. Скоркин, А. Л. Ланис // Труды международной научно-практической конференции по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. Пермь : Изд-во ПГТУ, 2004. Т. II. С. 47–53.
11. Повышение эффективности работы пневмоударной машины для погружения в грунт стержневых технологических элементов / Б. Н. Смоляницкий, Ю. Н. Сырямин, Д. С. Воронцов, П. Ю. Сырямин // Механизация строительства. 2016. Т. 77, № 2. С. 47–51.

References

1. Kritskiy M. Ya., Syryamin Yu. N., Smolyanitskiy B. N., Skorkin N. F. Complex of mobile machines and mechanisms for strengthening and reinforcing soils. *Proceedings of the Conference. Experience in the Construction and Reconstruction of Buildings and Structures on Weak Soils*. Arkhangelsk; 2003. P. 73–78. (In Russ.).
2. Rusin E. P., Smolyanitskiy B. N., Stazhevskiy S. B., Syryamin P. Yu. Creation of a complex of mobile machines for strengthening soil foundations. *Physical and Technical Problems of Mineral Development*. 2007;(6):49–58. (In Russ.).
3. Boginskiy V. P., Smolyanitskiy B. N. Pneumatic impact machines for driving light rod elements. *Physical and Technical Problems of Mineral Development*. 1981;(2):67–72. (In Russ.).
4. Kostylev A. D., Gurkov K. S., Smolyanitskiy B. N. [et al.]. Pneumatic punches and machines for driving light construction elements into the ground. Novosibirsk: Science. Siberian Branch; 1980. 134 p. (In Russ.).
5. Kirillov A. A., Smolyanitskiy B. N., Sukhareva L. I. Modeling of the impact energy transfer through the lateral surface of the rod element. *Proceedings of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Mining and Construction Vibration Machines and Processes*. Novosibirsk; 1988. P. 18–24. (In Russ.).
6. Andreev V. D. Formation of stress pulses in impact units of drilling machines. In the book: Explosive engineering. Moscow: Nedra; 1966. (In Russ.).
7. Alimov O. D., Manzhosov V. K., Eremyants V. E., Martynenko L. M. Calculation of impact systems with non-end impact of elements. Frunze: Ilim; 1978. 109 p. (In Russ.).
8. Kaganov G. M., Evdokimova I. M. Reinforced soil in hydraulic engineering. Review information, series Building structures and materials. Issue 3. Moscow; 1996. 61 p. (In Russ.).
9. Jones K. D. Reinforced soil structures. Moscow: Stroyizdat; 1989. 279 p.
10. Kritskiy M. Ya., Puskov V. I., Skorkin V. F., Lanis A. L. The Treatment of earth bed diseases using modern technologies. *Proceedings of International Scientific-Practical Conference on Problems of Soil Mechanics, Foundation Engineering and Transport Construction*. Perm: Publishing House of the Perm National Research Polytechnic University; 2004. Volume II. P. 47–53 (In Russ.).
11. Smolyanitskiy B. N., Syryamin Yu. N., Vorontsov D. S., Syryamin P. Yu. Improving the efficiency of a pneumatic impact machine for driving rod technological elements into the ground. *Mechanization of Construction*. 2016;77(2):47–51. (In Russ.).

Информация об авторах

В. Н. Анферов – доктор технических наук, профессор кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения.

П. Ю. Сырямин – старший преподаватель кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Ю. Н. Сырямин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. N. Anferov – Doctor of Engineering, Professor of the Lifting and Transport, Track, Construction, and Road Machines Department, Siberian Transport University.

P. Yu. Syryamin – Senior Lecturer of the Lifting and Transport, Track, Construction, and Road Machines Department, Siberian Transport University.

Yu. N. Syryamin – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Lifting and Transport, Track, Construction, and Road Machines Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 15.10.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 13.01.2025.

The article was submitted 15.10.2024; approved after reviewing 17.10.2024; accepted for publication 13.01.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.21

doi 10.52170/1815-9265_2025_73_57

Прочность анкерной зоны предварительно напряженного пролетного строения на местные напряжения раскалывания

Максим Анатольевич Антонов^{1✉}, Максим Сергеевич Марченко²,
Владислав Сергеевич Горячkin³

^{1,2,3} «СТС», Москва, Россия

¹ antonov@sts-hydro.ru[✉]

² marchenko@sts-hydro.ru

³ goryachkin@sts-hydro.ru

Аннотация. Бетон анкерной зоны предварительно напряженного железобетонного элемента находится в сложном напряженно-деформированном состоянии. Область бетона, расположенная за анкерным устройством, испытывает значительные местные растягивающие напряжения – напряжения раскалывания, направленные поперек продольного усилия от предварительного обжатия.

В большинстве случаев анкерные зоны в главных балках пролетных строений мостовых конструкций расположены у опорных сечений. Таким образом, в рассматриваемой области может находиться густое армирование для восприятия поперечной силы, а также крутящего момента. Однако, помимо армирования, предусмотренного в рамках общей работы главной балки в составе пролетного строения, необходимо дополнительное поперечное армирование для восприятия местных напряжений раскалывания.

Действующие отечественные нормативные документы при подборе армирования данных зон требуют от проектировщика учитывать напряженно-деформированное состояние, однако не приводят методику расчета.

В данной статье представлен метод подбора поперечного армирования на восприятие напряжений раскалывания для предварительно напряженной железобетонной главной балки путепровода с большим количеством анкеров стаканного типа АКС-19 (ООО «СТС», Москва) на торце. Рассмотрено два расчетных случая: при расположении анкерной зоны над опорной частью (учитывается влияние опирания главной балки на напряженно-деформированное состояние бетона анкерной зоны) и на границе секций бетонирования пролетного строения (напряженно-деформированное состояние бетона анкерной зоны определяется непосредственно предварительным напряжением пучков высокопрочного армирования). Выполнено описание применяемых расчетных схем с указанием предпосылок и допущений в расчете. Приведены результаты расчетов усилий и подбора дополнительного поперечного армирования.

Ключевые слова: предварительное напряжение, анкерная зона, местные напряжения, раскалывание

Для цитирования: Антонов М. А., Марченко М. С., Горячkin В. С. Прочность анкерной зоны предварительно напряженного пролетного строения на местные напряжения раскалывания // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 57–67. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_57.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

The strength of the anchor zone of the prestressed span structure against local bursting stresses

Maxim A. Antonov^{1✉}, Maxim S. Marchenko², Vladislav S. Goryachkin³

^{1,2,3} STS, Moscow, Russia

¹ antonov@sts-hydro.ru[✉]

² marchenko@sts-hydro.ru

³ goryachkin@sts-hydro.ru

Abstract. The concrete of the anchorage zone of a post-tensioned reinforced concrete element is in a complex stress-strain state. The concrete area behind the anchor experiences significant local tensile stresses – bursting stresses transverse to the longitudinal prestressing force.

In most cases, the anchorage zones in the main girders of superstructures are located near the support sections. In this way, dense reinforcement for shear force and torsion can be found in the analysis area. However, in addition to the standard transverse reinforcement, extra transverse reinforcement must be considered to provide strength for local bursting stresses.

Actual national standards require the designer to take into account the stress-strain state during the analysis of the reinforcement of anchorage zones, but do not provide a design method.

This paper presents a method of design the transverse reinforcement to provide strength for bursting stresses for a post-tensioned main girder of an overpass with a large set of anchors AKS-19 (STS, Moscow). Two design cases are considered: the first one with anchorage zone located above the bearing pad (the bearing influence on the stress-strain state of the anchorage zone concrete is taken into account); the second one with anchorage zone located on the border of the casting sections (the stress-strain state is determined directly by post-tensioning). A description of the applied analysis models is made, specifying the preconditions and assumptions in the analysis. The results of bursting force calculations and design of additional transverse reinforcement are given.

Keywords: post-tensioned, anchorage zone, local stresses, bursting

For citation: Antonov M. A., Marchenko M. S., Goryachkin V. S. The strength of the anchor zone of the prestressed span structure against local bursting stresses. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):57–67. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_57.

Введение

Активное развитие городских транспортных сетей, а также строительство новых дорог федерального значения требуют большого объема проектных и строительных работ в области мостовых сооружений. Мосты, виадуки, эстакады в составе многоуровневых транспортных развязок предполагают подход к проектированию, позволяющий подобрать наиболее эффективные конструкции с точки зрения экономической целесообразности и технологии производства работ. В поставленных задачах широкое распространение имеют конструкции из предварительно напряженного железобетона с натяжением на бетон.

В рамках проектных работ специалистами ООО «СТС» выполняются пространственные расчеты монолитных предварительно напряженных железобетонных пролетных строений, в том числе расчеты анкерных зон.

Анкерная зона предварительно напряженного элемента включает в себя две основные зоны напряженно-деформированного состояния (рис. 1):

– локальную (находится непосредственно у анкерного устройства, в ней действуют существенные сжимающие напряжения; является зоной ответственности производителя системы предварительного напряжения);

– общую (находится вокруг локальной зоны, в ней действуют растягивающие напряжения отслаивания и раскалывания; является зоной ответственности разработчика проектной документации).

В соответствии с [1] и [2] армирование зоны передачи на бетон сосредоточенных усилий следует выполнять с учетом напряженно-деформированного состояния этой зоны, определяемого методами теории упругости

или другими обоснованными способами расчета на местные напряжения.

Методы расчета местных напряжений раскалывания изложены как в отечественных источниках [3, 4], так и в зарубежных нормативных документах [5, 6], руководствах [7] и диссертациях, монографиях, статьях [8–10]. Однако, ввиду сложности напряженно-деформированного состояния, в перечисленных документах [3, 4, 6, 7] не приводится общий метод расчета для большой группы анкеров, расположенной на торце предварительно напряженного элемента. В [5] расчет раскалывающих усилий предлагается производить от суммарного усилия натяжения всех пучков высокопрочной арматуры, расположенных на торце элемента, что ведет к завышенному армированию анкерной зоны.

В общем виде формула расчета суммарного раскалывающего усилия от натяжения одного пучка, расположенного в центре тяжести сечения, выглядит следующим образом:

$$T = 0,25P \left(1 - \frac{a}{h}\right), \quad (1)$$

где P – контролируемое усилие натяжения пучка; a – ширина анкерного устройства; h – высота балки.

В соответствии с методом симметричной призмы Гийона, описанным в [6], формула расчета суммарного раскалывающего усилия от натяжения одного пучка, расположенного с эксцентрикитетом, выглядит следующим образом:

$$T = 0,25P \left(1 - \frac{a}{2e}\right), \quad (2)$$

где e – расстояние от оси пучка до ближайшей грани элемента.

Схемы к расчетам по формулам (1) и (2) представлены на рис. 2.

Целью авторов статьи является разработка методики расчета раскалывающих усилий для группы пучков с учетом положения каждого пучка относительно поперечного сечения

балки, размеров анкерного устройства, а также взаимного влияния от последовательного натяжения отдельных пучков высокопрочного армирования. Итогом расчета анкерной зоны на локальные напряжения раскалывания является подбор дополнительного поперечного армирования главной балки пролетного строения путепровода.

Материалы и методы исследования

В рамках данной статьи рассмотрен расчет прочности анкерной зоны (подбор дополнительного поперечного армирования) на местные напряжения раскалывания. К расчету принята анкерная зона главной балки путепровода с 12 анкерами АКС-19 (пряди К7-15,7-1860 по ГОСТ Р 53772-2010) на торце (рис. 3). Усилие натяжения одного девятнадцатипрядевого пучка составляет 3 919 кН, что соответствует $1,1R_p = 1 375$ МПа.

Для определения усилий раскалывания в зоне за анкерами применяется метод конечных элементов.

Описание расчетных схем

Выполнены расчетные схемы анкерных зон в плоской линейной постановке в программном комплексе SOFiSTiK:

– схема 1 (рис. 4) моделирует анкерную зону на опоре (учет влияния опорной части на НДС анкерной зоны);

– схема 2 (рис. 5) моделирует анкерную зону на границе секций бетонирования, расположенную на расстоянии 6 м от оси промежуточной опоры.

Каждая расчетная схема представляет собой оболочечный элемент толщиной 450 мм (соответствует шагу анкеров поперек оси главной балки), на торец которого передается нагрузка от пучков напрягаемого армирования. Границ-

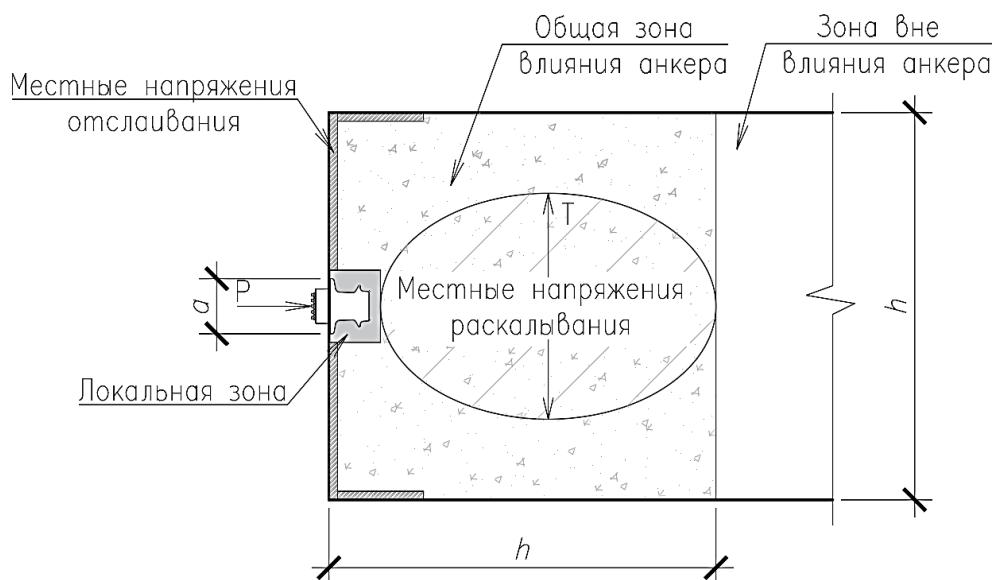


Рис. 1. Анкерная зона предварительно напряженного элемента

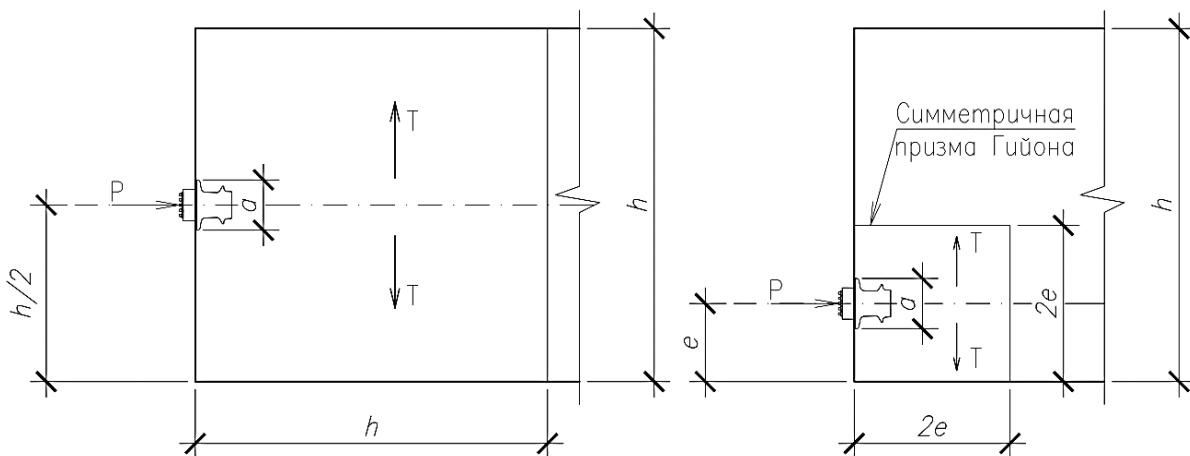


Рис. 2. Схема к расчету суммарного усилия раскалывания:
слева – по формуле (1); справа – по формуле (2)

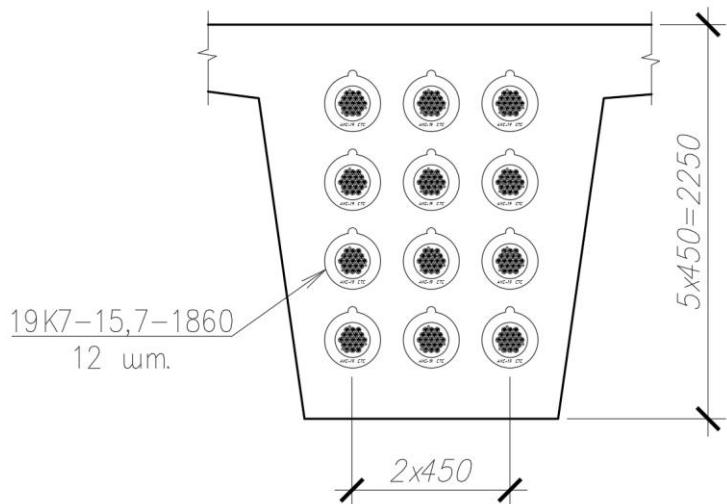


Рис. 3. Расположение анкеров на торце балки

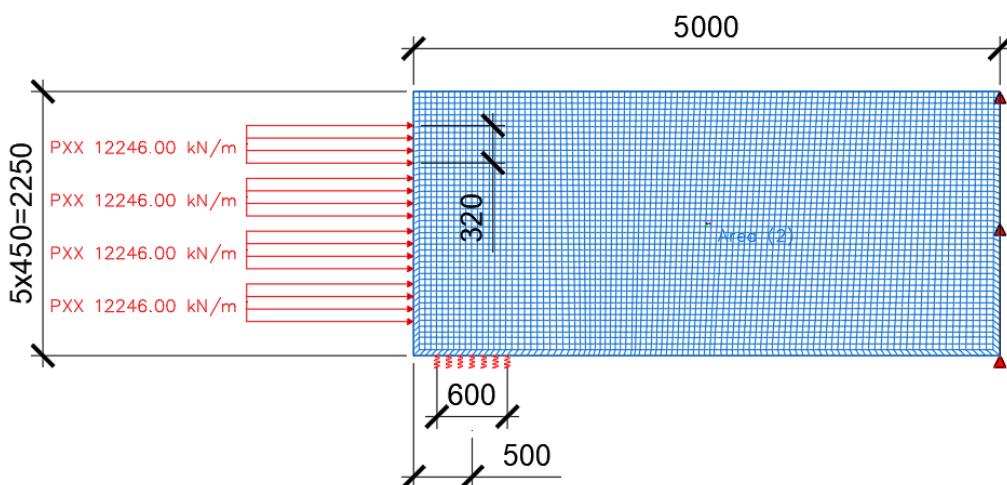


Рис. 4. Расчетная схема 1 (на опоре)

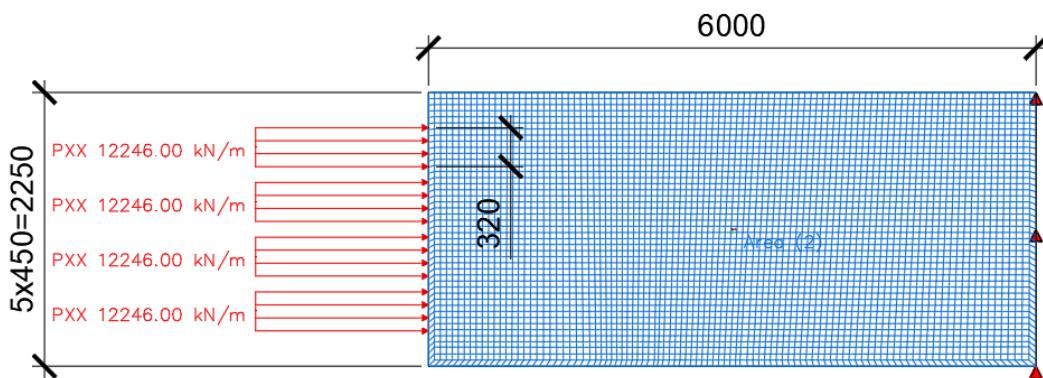


Рис. 5. Расчетная схема 2 (на границе секций бетонирования)

ные условия приняты в соответствии с типом опирания для каждой расчетной схемы.

Анализ результатов расчета усилий раскалывания

В расчете рассмотрены результаты натяжения каждого пучка отдельно, а также суммарного натяжения всех пучков (сложение отдельных натяжений по принципу суперпози-

ции). Для анализа результатов по плитным элементам вдоль осей расположения анкеров заданы сечения, по которым построены эпюры усилий.

В первую очередь рассмотрены результаты по расчетной схеме 1 (на опоре). Эпюры нормальных сил в вертикальном направлении представлены на рис. 6–10.

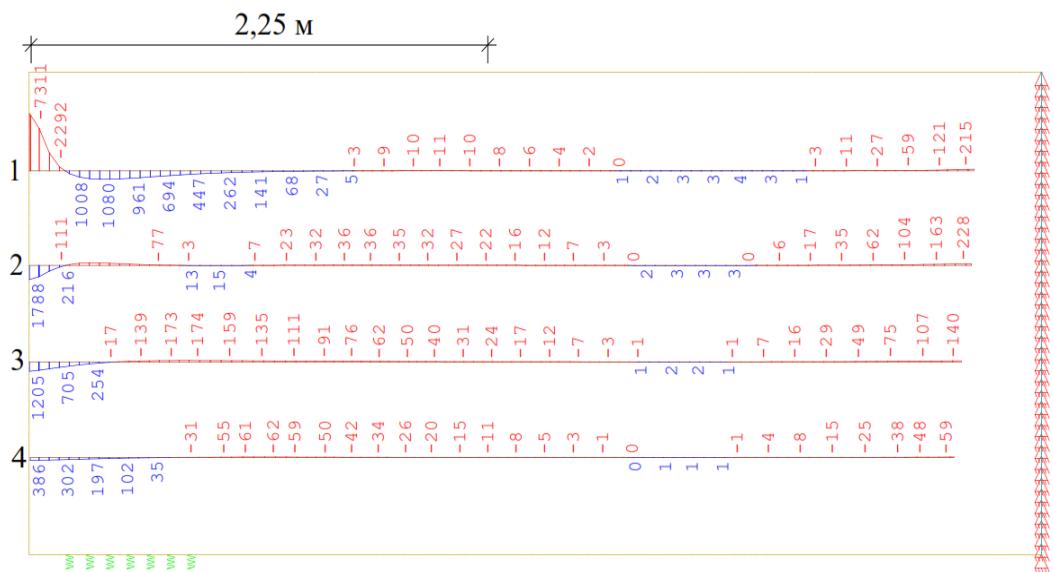


Рис. 6. Расчетная схема 1. Эпюры нормальных сил в вертикальном направлении от натяжения пучка 1, кН/м

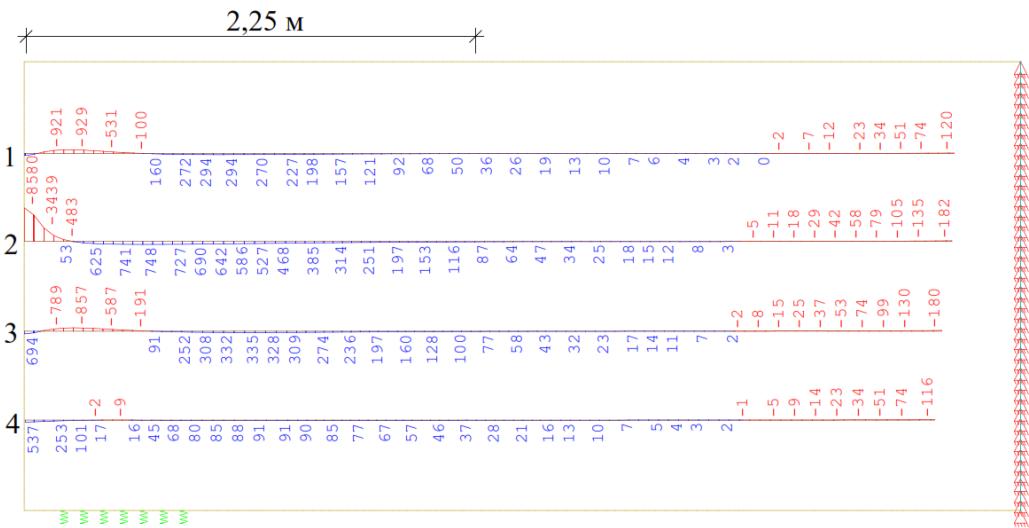


Рис. 7. Расчетная схема 1. Эпюры нормальных сил в вертикальном направлении от натяжения пучка 2, кН/м

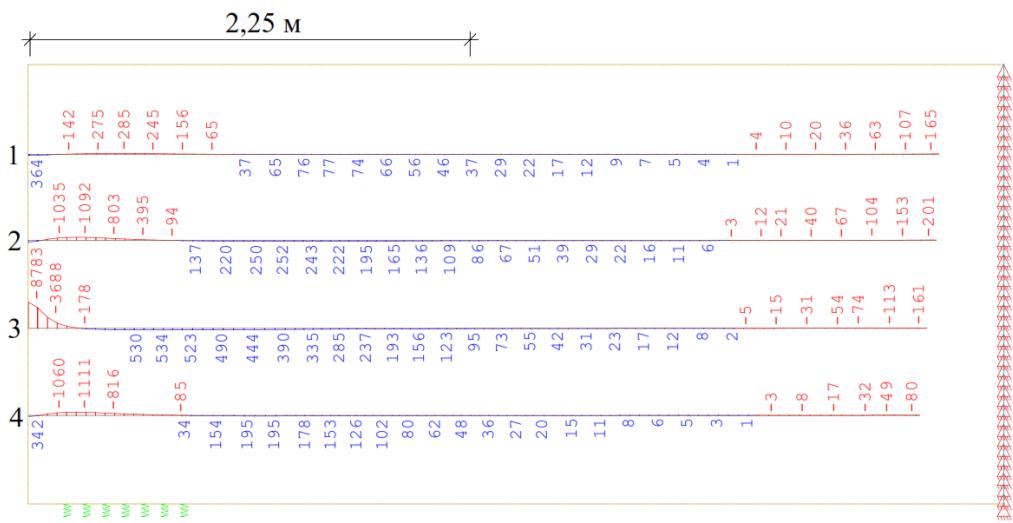


Рис. 8. Расчетная схема 1. Эпюры нормальных сил в вертикальном направлении от натяжения пучка 3, кН/м

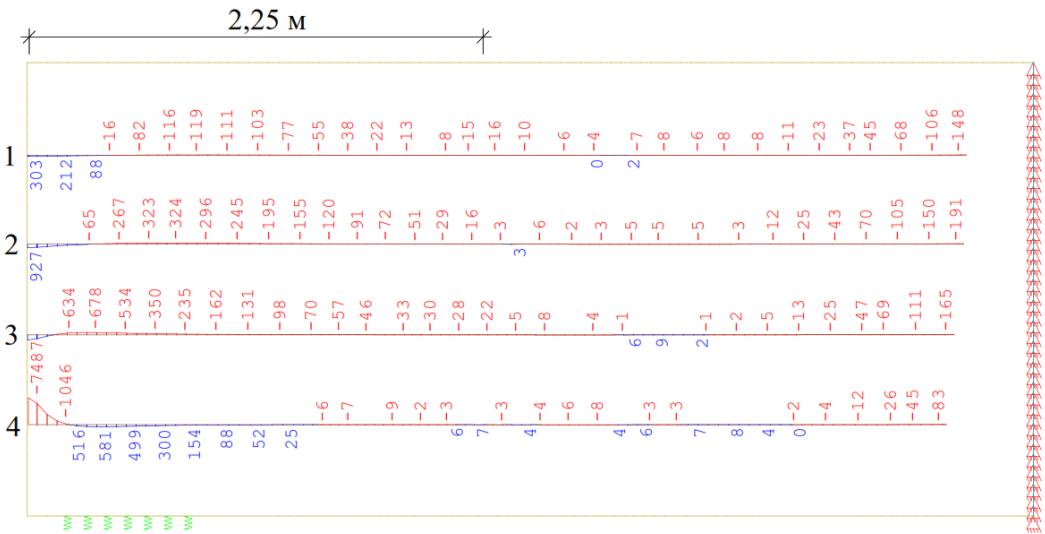


Рис. 9. Расчетная схема 1. Эпюры нормальных сил в вертикальном направлении от натяжения пучка 4, кН/м

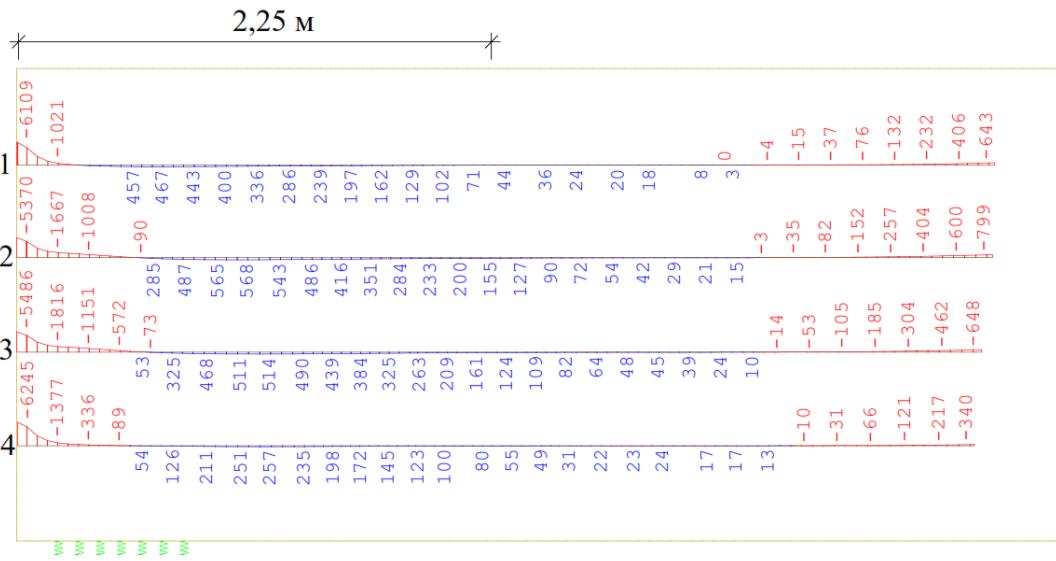


Рис. 10. Расчетная схема 1. Эпюры нормальных сил от сочетания натяжений всех пучков, кН/м

По эпюрам, приведенным на рис. 6–10, для расчетной схемы 1 сделаны следующие выводы:

- наибольшие раскалывающие усилия для рассматриваемых анкеров возникают при отдельных их натяжениях;
- зоны раскалывания (часть эпюры с положительным знаком) различны по длине в зависимости от положения анкера по высоте главной балки. Для анкеров 1 и 4 они равны 1,25 м, для 2 и 3 – 2,0 м. В расчете длина зоны раскалывания ограничивается размером высоты балки, так как за пределами данной области поперечные растягивающие усилия незначительны;
- значения эпюр для пар симметрично расположенных анкеров 1 и 4, 2 и 3 различны из-за влияния опорной части;

– при сложении нагрузок от натяжения происходит уменьшение значений растягивающих усилий для каждой эпюры, а также перераспределение растянутой части эпюр вдоль оси балки.

Далее рассмотрены результаты по расчетной схеме 2 (на границе секций бетонирования). Эпюры нормальных сил в вертикальном направлении представлены на рис. 11–15.

По эпюрам, приведенным на рис. 11–15, для расчетной схемы 2 сделаны следующие выводы в дополнение к выводам по расчетной схеме 1:

- эпюры для анкеров 1 и 4, а также 2 и 3 зеркальны соответственно. Это логично из-за отсутствия влияния опорной части на анкеры 3 и 4;
- значения соответствующих эпюр для анкеров 1 и 2 в расчетных схемах аналогичны.

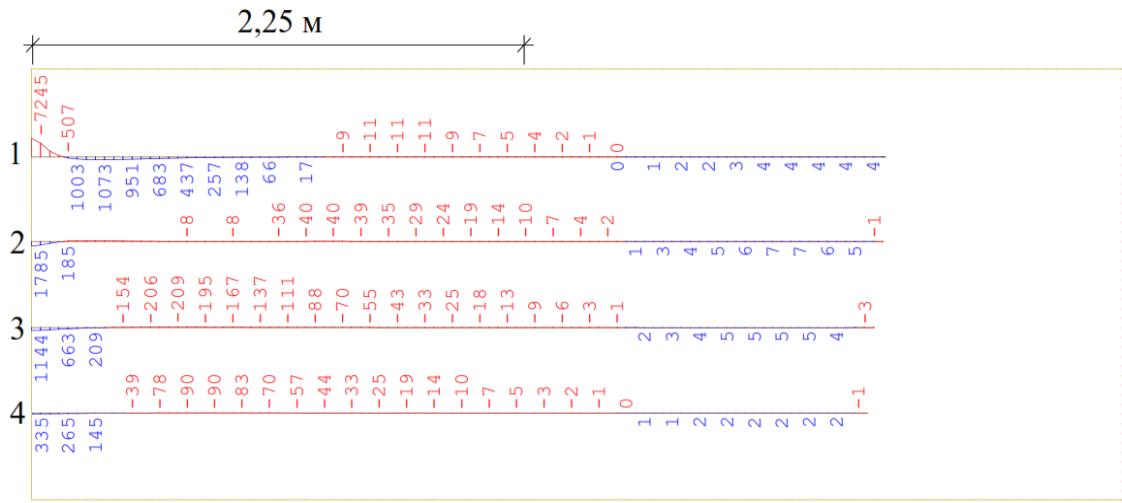


Рис. 11. Расчетная схема 2. Эпюры нормальных сил в вертикальном направлении от натяжения пучка 1, кН/м

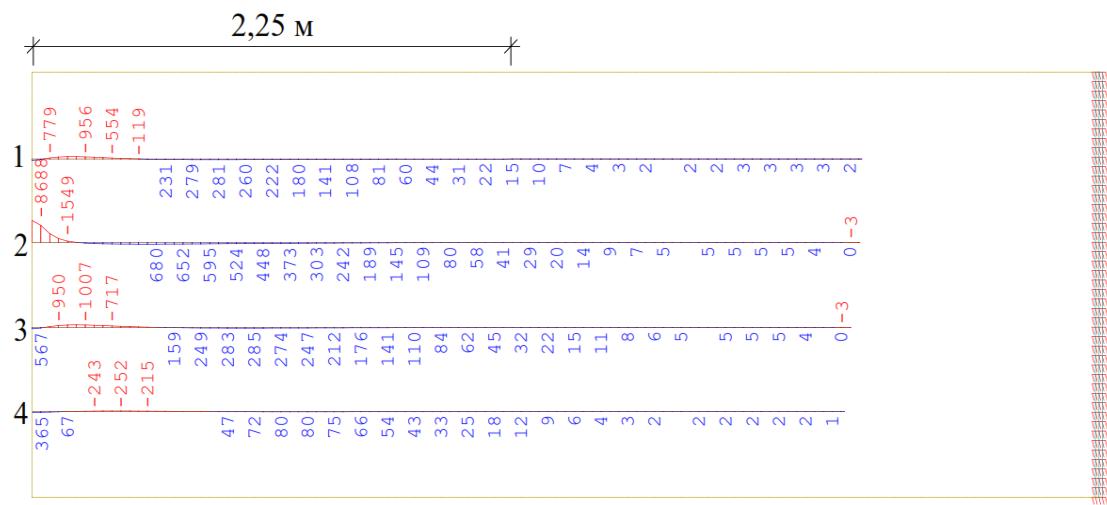


Рис. 12. Расчетная схема 2. Эпюры нормальных сил в вертикальном направлении от натяжения пучка 2, кН/м

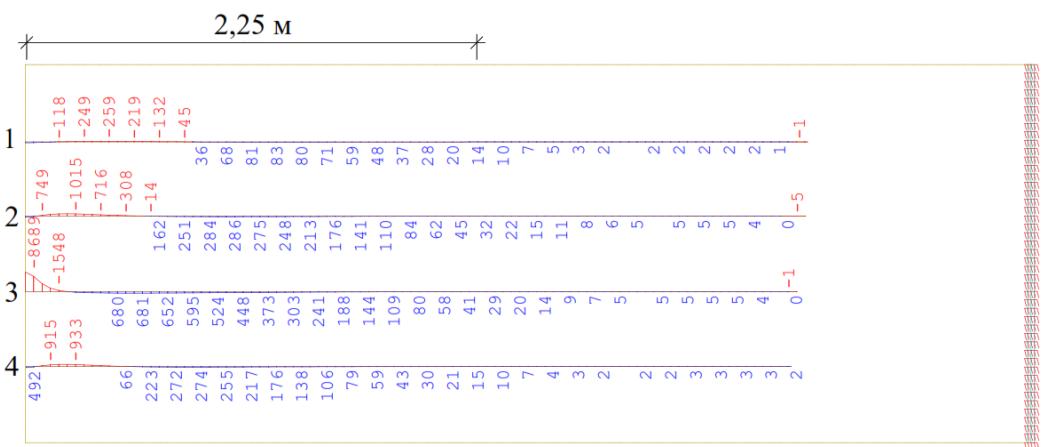


Рис. 13. Расчетная схема 2. Эпюры нормальных сил в вертикальном направлении от натяжения пучка 3, кН/м

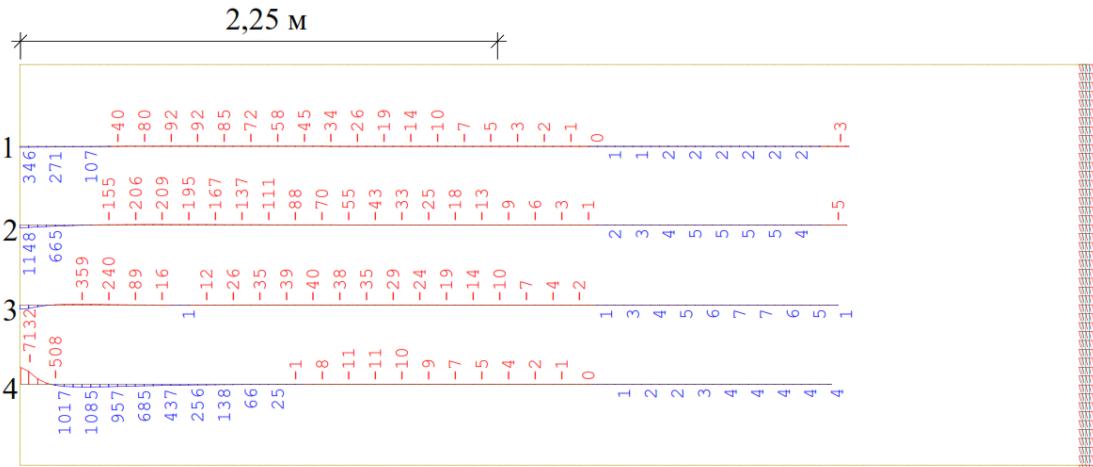


Рис. 14. Расчетная схема 2. Эпюры нормальных сил в вертикальном направлении от натяжения пучка 4, кН/м

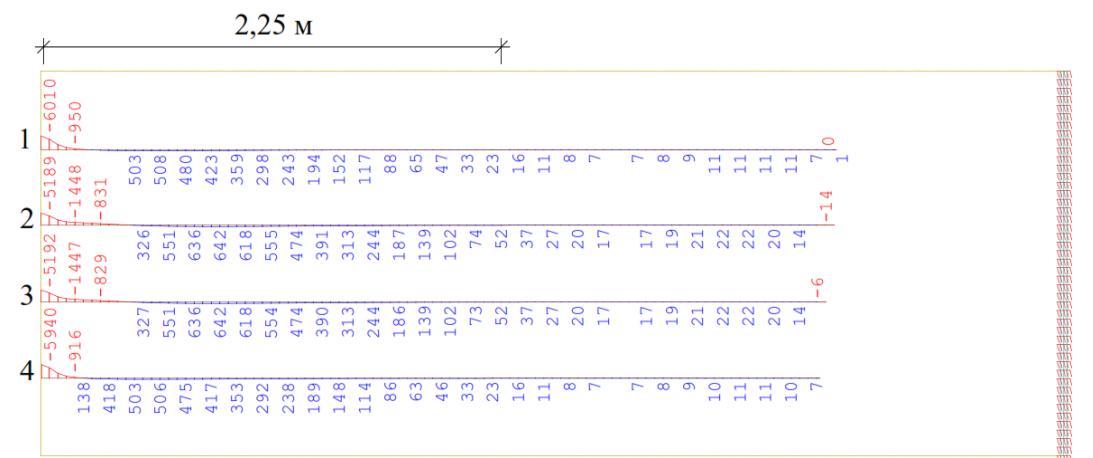


Рис. 15. Расчетная схема 2. Эпюры нормальных сил от сочетания натяжений всех пучков, кН/м

Сравнение результатов расчетов

Таблица 1

Номер анкера	Суммарное усилие раскалывания от натяжения одного пучка, кН			Суммарное усилие раскалывания от натяжения всех пучков, кН
	МКЭ	Аналитический метод	Разница, %	
1 (расчетная схема 1)	611	631	-3,17	528
2 (расчетная схема 1)	878	806	+8,93	647
1 (расчетная схема 2)	621	631	-1,58	557
2 (расчетная схема 2)	808	806	+0,25	693
3 (расчетная схема 2)	810	806	+0,50	699
4 (расчетная схема 2)	613	631	-2,85	551

В табл. 1 представлено сравнение результатов расчетов методом конечных элементов и аналитическим методом по формулам (1) и (2).

При сравнении результатов расчетов двумя методами сделаны следующие выводы:

- аналитический метод применим для одного пучка на торце;
- усилия раскалывания после натяжения всех пучков меньше, чем при натяжении каждого отдельно.

Результаты подбора поперечного армирования

На основании сделанных ранее выводов подбор дополнительного поперечного армирования на местные напряжения раскалывания производится для анкеров 1 и 2.

Для расчета армирования на раскалывание выделена растянутая зона эпюры для анкеров 1 и 2. Для анкера 2 зона ограничена размерами высоты балки от ее торца. Выделенные зоны

эпюры представлены на рис. 16 и 17. По данным эпюрам в табличном виде представлено суммарное раскалывающее усилие (как сумма произведений погонных значений нормальной силы в элементе на его длину).

По полученным суммарным раскалывающим усилиям выполнен подбор дополнительного поперечного армирования главной балки, сведенный в табл. 2. В качестве допущений принято, что суммарное растягивающее усилие воспринимается поперечным армированием равномерно по всей длине зоны раскалывания, а работа бетона на растяжение не учитывается.

На основании расчета, представленного в табл. 2, выявлено, что при конструировании армирования зоны раскалывания определяющим является анкер 2, которому необходимо установить два стержня Ø12 A400 с шагом 150 мм на длине, ограниченной высотой балки от ее торца.

В данном расчете не рассмотрено влияние рядов анкеров, расположенных поперек оси балки. Однако на его основании можно сделать вывод о том, что в процессе натяжения других рядов анкеров в рассматриваемой зоне раскалывания усилия будут изменяться как в большую, так и в меньшую сторону. И после окончания работ по натяжению всех пучков суммарное усилие раскалывания для каждого анкера будет меньше, чем в процессе работ по натяжению. Расчет раскалывающих усилий в горизонтальном направлении аналогичен расчету по схеме 2 (без опорной части).

Таким образом, в соответствии с выполненным расчетом предлагается следующая схема армирования на раскалывание, устанавливаемого на расстоянии высоты балки от ее торца (рис. 18). В качестве допущения принято, что стержень между анкерами работает на оба ан-

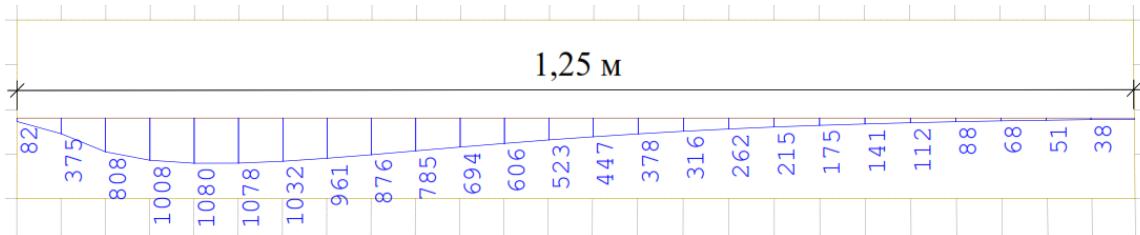


Рис. 16. Растворенная зона эпюры нормальной силы (зона раскалывания) для анкера 1, кН/м

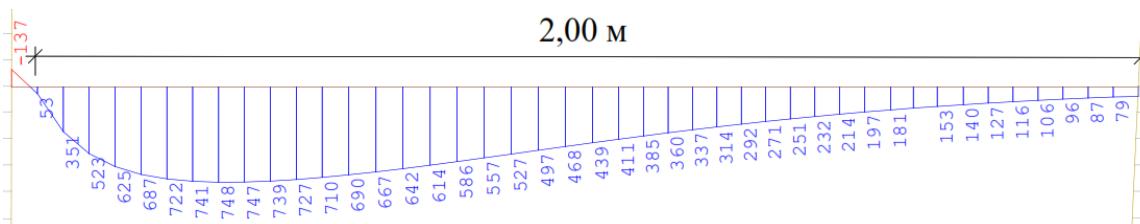
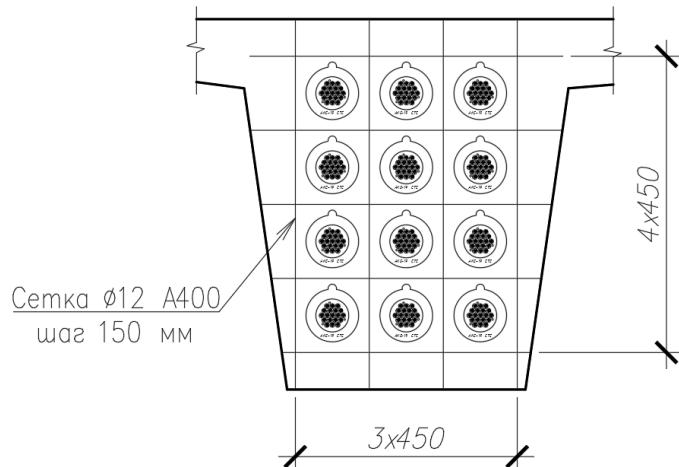


Рис. 17. Растворенная зона эпюры нормальной силы (зона раскалывания) для анкера 2 (ограничена размером высоты балки от ее торца), кН/м

Таблица 2

Подбор поперечного армирования для анкеров 1 и 2 по расчетной схеме 1

Параметр	Значения параметра для анкера	
	1	2
Суммарное усилие раскалывания, кН	621	878
Расчетное сопротивление арматуры A400 R_s , МПа	350	350
Требуемая суммарная площадь армирования $A_{\text{треб}}$, см ²	17,7	25,1
Длина зоны раскалывания (определенна по эпюре, но не более высоты балки), м	1,25	2,00
Требуемая площадь армирования на погонный метр длины главной балки $A_{\text{треб,пог}}$, см ² /м	14,2	12,5
Принятый шаг стержней поперечного армирования вдоль оси балки, мм	150	150
Принятое число стержней в одной плоскости, шт.	2	2
Требуемая площадь одного стержня для принятых шага и количества, см ²	1,06	0,94
Требуемый диаметр одного стержня для принятых шага и количества, мм	11,6	10,9
Принятый диаметр одного стержня для принятых шага и количества, мм	12	12



Rис. 18. Схема армирования главной балки на раскалывание

кера и этого достаточно при включении в работу стержней, установленных в отдалении от рассматриваемой зоны раскалывания, а также при определенной последовательности натяжения анкеров на торце, допускающей поочередное увеличение/уменьшение усилий раскалывания в рассматриваемой зоне.

Выводы

На основании проведенного исследования можно заключить следующее:

1. Аналитический метод применим для одного пучка на торце.
2. Для группы пучков аналитический метод нецелесообразен, суммирование усилий натяжения приводит к завышенному армированию.

3. Усилия раскалывания после натяжения всех пучков меньше, чем при натяжении каждого отдельно.

4. Для группы пучков в расчете необходимо учитывать их положение относительно поперечного сечения балки, размеры анкерного устройства, а также последовательность их натяжения.

5. При подборе дополнительного поперечного армирования допускается учитывать основное поперечное армирование, полученное при расчете наклонных и пространственных сечений в стадии эксплуатации (в стадии натяжения усилия от внешних нагрузок меньше, чем при эксплуатации; а в стадии эксплуатации сила предварительного напряжения меньше, чем при натяжении).

Список источников

1. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84* : [с Изменениями № 1, 2, 3]. Москва : Стандартинформ, 2019. 340 с.
2. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : [с Изменениями № 1, 2]. Москва : РСТ, 2022. 140 с.
3. Власов Г. М., Устинов В. П. Расчет железобетонных мостов. Москва : Транспорт, 1992. 256 с.
4. Гибшман Е. Е., Гибшман М. Е. Теория и расчет предварительно напряженных железобетонных мостов. Москва : Автотрансиздат, 1963. 393 с.
5. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, 2019. 623 p.
6. AASHTO Load and Resistance Factor Design. Bridge Design Specifications. Fifth edition. Washington, DC : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010. 1623 p.
7. Post-Tensioning Manual. Sixth edition. Chapter VIII Anchorage zone design. Phoenix, AZ : Post-Tensioning Institute, 2000. 46 p.
8. Sanders David. Design and behavior of anchorage zones in post-tensioned concrete members : Ph. D. Dissertation. The University of Texas at Austin, 1990. 575 p.
9. Axson Daniel. Ultimate bearing strength of post-tensioned local anchorage zones in lightweight concrete. Blacksburg, VA : Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008. 92 p.
10. Jain Monika, Khapre Rajendra. Post-tensioned anchorage zone: A review // Structures. 2022. No. 46. P. 31–48.

References

1. SP 35.13330.2011 Bridges and culverts Actualised edition of SNiP 2.05.03-84* [with Amendments No. 1, 2, 3]. Moscow: Standartinform; 2019. 340 p. (In Russ.).
2. SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions [with Amendments No. 1, 2]. Moscow: Standartinform; 2022. 140 p. (In Russ.).
3. Vlasov G. M., Ustinov V. P. Calculation of reinforced concrete bridges. Moscow: Transport; 1992. 256 p. (In Russ.).
4. Gibshman E. E., Gibshman M. E. Theory and calculation of prestressed reinforced concrete bridges. Moscow: Avtotransizdat; 1963. 393 p. (In Russ.).
5. ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; 2019. 623 p.
6. AASHTO Load and Resistance Factor Design. Bridge Design Specifications, fifth edition. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2010. 1623 p.
7. Post-Tensioning Manual. Sixth edition. Chapter VIII Anchorage zone design. Phoenix, AZ: Post-Tensioning Institute; 2000. 46 p.
8. Sanders David. Design and behavior of anchorage zones in post-tensioned concrete members, Ph. D. Dissertation: The University of Texas at Austin; 1990. 575 p.
9. Axson Daniel. Ultimate bearing strength of post-tensioned local anchorage zones in lightweight concrete. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University; 2008. 92 p.
10. Jain Monika, Khapre Rajendra. Post-tensioned anchorage zone: A review. *Structures*. 2022;(46):31–48.

Информация об авторах

М. А. Антонов – специалист по расчетам строительных конструкций ООО «СТС».
М. С. Марченко – технический директор ООО «СТС».
В. С. Горячkin – руководитель группы расчетов ООО «СТС».

Information about the authors

M. A. Antonov – Structural Analysis Engineer of STS.
M. S. Marchenko – Chief Technical Officer of STS.
V. S. Goryachkin – Team Leader of Structural Analysis Group of STS.

Статья поступила в редакцию 01.11.2024; одобрена после рецензирования 08.11.2024; принята к публикации 13.01.2025.
The article was submitted 01.11.2024; approved after reviewing 08.11.2024; accepted for publication 13.01.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 625.731.1

doi 10.52170/1815-9265_2025_73_68

Обоснование системы инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемых насыпей линейных транспортных сооружений в условиях Ямало-Ненецкого автономного округа

Алексей Леонидович Ланис¹, Денис Алексеевич Разуваев^{2✉}, Дмитрий Андреевич Усов³,
Роман Сергеевич Печенкин⁴

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

¹ alangeo@bk.ru

² razdenis@mail.ru✉

³ usovda96@yandex.ru

⁴ roma.pechenkin@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследований по разработке и установке системы инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемых насыпей линейных транспортных сооружений в условиях изменения климата на примере участка земляного полотна на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Определены этапы обоснования системы инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемых насыпей линейных транспортных сооружений в рассматриваемых условиях.

По результатам визуально-инструментального и геотехнического обследования сформирована схема особенностей деформирования характерного для рассматриваемых условий участка эксплуатируемой насыпи, а также построен поперечный геокриологический профиль. Для обработки полученных результатов обследований разработана и применена универсальная система зонирования эксплуатируемого земляного полотна, послы отвода и прилегающей территории, учитывая влияние криогенных процессов и факторов.

На основании выполненных исследований сформулированы особенности геокриологического состояния характерного для условий ЯНАО участка эксплуатируемой насыпи, необходимые для обоснования системы инженерно-геокриологического мониторинга. Обоснована схема установки системы инженерно-геокриологического мониторинга, разработан и изготовлен комплекс измерительных средств для объективного контроля теплового и деформированного состояния геотехнической системы «насыпь – основание» на характерном для условий ЯНАО участке эксплуатируемой насыпи. Выполнена установка системы инженерно-геокриологического мониторинга, а также нулевой и первый циклы наблюдений, которые подтвердили работоспособность системы и отсутствие необходимости корректировки ее параметров.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20036 (<https://rscf.ru/project/24-19-20036/>) и финансовой поддержки правительства Ямало-Ненецкого автономного округа.

Ключевые слова: инженерно-геокриологический мониторинг, линейные транспортные сооружения, земляное полотно, насыпь, криогенные процессы, криогенные деформации, многолетнемерзлые грунты

Для цитирования: Обоснование системы инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемых насыпей линейных транспортных сооружений в условиях Ямало-Ненецкого автономного округа / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, Д. А. Усов, Р. С. Печенкин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 68–76. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_68.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Substantiation of the engineering-geocryological monitoring system for operational embankments of linear transport structures in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug

Alexey L. Lanis¹, Denis A. Razuvaev^{2✉}, Dmitriy A. Usov³, Roman S. Pechenkin⁴

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

¹ alangeo@bk.ru

² razdenis@mail.ru✉

³ usovda96@yandex.ru

⁴ roma.pechenkin@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of the research on the development and implementation of the system of engineering and geocryological monitoring of the operating embankments of linear transport structures in the conditions of climate change on the example of a section of the earth bed in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (YNAO). The stages of substantiation of the system of engineering-geocryological monitoring of the used embankments of linear transport structures in the considered conditions are proposed.

On the basis of the results of visual-instrumental and geotechnical investigations, a scheme of deformation characteristics of the section of the operated embankment typical for the considered conditions was formed, and a transverse geocryological profile was constructed. A universal system of zoning of the exploited embankment, the right of way and the adjacent territory, taking into account the influence of cryogenic processes and factors, was developed and applied to process the obtained survey results.

On the basis of the conducted researches the peculiarities of the geocryological condition of the exploited embankment site typical for the YNAO conditions were formulated, which are necessary for the justification of the engineering-geocryological monitoring system. The scheme of installation of the engineering-geocryological monitoring system was substantiated, a complex of measuring devices for objective control of thermal and deformed state of the geotechnical system embankment-base on the site of the operated embankment typical for YNAO conditions was developed and manufactured. The installation of the engineering geotechnical monitoring system was carried out, as well as the zero and first observation cycles, which confirmed the efficiency of the system and the absence of the need to adjust its parameters.

Financial Support: the study was carried out under the grant of the Russian Science Foundation 24-19-20036 (<https://rscf.ru/project/24-19-20036/>) and with the financial support of the government of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug.

Keywords: linear transport structures, highway, soil, foundation soils, cryogenic processes, perennially frozen foundation soils, embankment deformations

For citation: Lanis A. L., Razuvayev D. A., Usov D. A., Pechenkin R. S. Substantiation of the engineering-geocryological monitoring system for operational embankments of linear transport structures in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):68–76. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_68.

Введение

Практически вся территория Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) характеризуется сплошным или островным распространением многолетнемерзлых грунтов (ММГ). В связи с глобальным изменением климата и отчасти техногенным воздействием человека сложился негативный тренд на прогрессирование деформаций сооружений на ММГ, ввиду их деградации [1–3]. Аналогичный тренд наблюдается и в ряде других стран [4, 5] со схожими природно-климатическими условиями и распространением ММГ в основании сооружений. Исследования, направленные на совершенствование методов управления такими деформациями, не только позволяют решить проблему адаптации линейных транспортных сооружений к изменениям климата и характеристик ММГ в Арктической зоне Российской Федерации [6], но и будут способствовать формированию методологической основы, новых научных знаний для решения других научных проблем.

Дальнейшая безопасная эксплуатация линейных транспортных сооружений в условиях деградации многолетней мерзлоты в основании возможна только после обоснования, разработки и успешной апробации соответствующих конструктивных решений по стабилизации. Эффективность разрабатываемых конструктивных решений зависит от корректно-

сти и точности исходных данных, а также адекватности используемых для расчетов и прогнозов математических моделей, отражающих реальное воздействие криогенных процессов на эксплуатацию сооружения.

Развитие программных комплексов в настоящее время позволяет математически смоделировать напряженно-деформированное состояние геотехнической системы «насыпь – основание», а также процессы, происходящие в ней под воздействием криогенных факторов. Модели создаются на основании исходных данных о природных, конструктивных и эксплуатационных особенностях земляного полотна, получаемых по результатам обследования, и уточняются на основе геокриологических исследований, включающих проведение инженерно-геокриологического мониторинга [7]. При этом от состава и объема каждого элемента инженерно-геокриологического мониторинга напрямую зависит не только точность, но и возможность проведения последующих этапов исследования.

Для обоснования необходимой и достаточной системы инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемых насыпей линейных транспортных сооружений в условиях ЯНАО в настоящей работе выявлены особенности геокриологического состояния эксплуатируемого земляного полотна, в том числе протекающих в системе «насыпь – основание» криогенных процессов и сопутствующих им деформаций. Иссле-

дования выполнены на примере характерного участка автомобильной дороги Надым – Салехард (км 987 + 099 – км 1331 + 868), в полной мере отражающего особенности земляного полотна в рассматриваемых условиях [8, 9].

Материалы и методы исследования

На первом этапе исследования выполнено обоснование характерного для рассматриваемых условий участка эксплуатируемой насыпи. Для этого проанализирована выборка из 59 участков автомобильной дороги Надым – Салехард (км 987 + 099 – км 1331 + 868) по материалам обследований различных лет, а также выполнено визуально-инструментальное (с замером геометрических параметров и величин деформаций) обследование шести участков из рассматриваемой выборки. Выполненный анализ и систематизация данных позволяют сделать вывод о том, что деформирование участков рассматриваемой дороги по причине развития криогенных деформаций, несмотря на все прилагаемые усилия дорожно-эксплуатирующих служб, продолжаются. Принятые при проектировании и строительстве сооружения проектные решения, предусматривающие поднятие уровня ММГ на уровень не ниже подошвы

насыпи, в реальных условиях не обеспечиваются. На большей части исследуемых участков автомобильной дороги грунты деятельного слоя переходят в мерзлое состояние и образуют мерзлотное ядро в основании и теле насыпи, при этом в основании откосных частей отмечается значительное понижение границы ММГ. С учетом всего перечисленного в качестве характерного участка эксплуатируемой насыпи принят участок автомобильной дороги от км 1277 + 990 до км 1278 + 030. Он имеет характерные деформации, указывающие на деградацию ММГ в основании насыпи с последующим формированием термокарстовых понижений в полосе отвода у подошвы насыпи и изменением геометрии откосных частей.

Анализ результатов визуально-инструментального обследования, выполненного в два этапа (05.06.2024 и 06.09.2024), в совокупности с исходными материалами позволил сформировать схему особенностей деформирования характерного участка земляного полотна (рис. 1). На схеме отмечены последствия негативных криогенных процессов (деградации ММГ) в виде продольной осевой трещины покрытия, просадки обочины, продольных трещин по кромке проезжей части и на откосах с раскры-



Рис. 1. Схема особенностей деформирования характерного участка земляного полотна

тием до 10 см, а также термокарстовых просадок в полосе отвода у подошвы земляного полотна. На момент визуально-инструментального обследования 05.06.2024 отмечены значительные объемы накопленных за холодный период года снежных отложений на откосах и в полосе отвода у подошвы земляного полотна.

В целом проведенное обследование характерного для рассматриваемых условий участка показало, что при деградации ММГ в основании земляного полотна возможны как вертикальные (просадки), так и горизонтальные (сдвиговые) деформации, главным образом в откосных частях и полосе отвода. Основным фактором деградации ММГ на участке является нарушение естественных условий теплообмена системы «насыпь – основание» с окружающей средой за счет аккумуляции в холодный период года значительных объемов снежных отложений (естественный тепловой амортизатор) на откосах и в полосе отвода у подошвы земляного полотна.

На следующем этапе (сентябрь 2024 г.) для характерного участка выполнено геотехническое обследование, состоящее из комплекса полевых геологических и геофизических, а также лабораторных исследований талых и мерзлых грунтов системы «насыпь – основание» и прилегающей территории.

Результаты исследования

По результатам геотехнического обследования построен поперечный геокриологический профиль характерного участка земляного полотна (рис. 2). Анализ полученных данных позволяет констатировать факт изменения положения границы ММГ относительно первоначальных условий (до возведения земляного полотна). Фактическая граница ММГ определена с достаточной точностью по результатам проходки горных выработок

(скважин и шурfov) в сочетании с геофизическими исследованиями.

На поперечном геокриологическом профиле для эксплуатируемой в рассматриваемых условиях насыпи выделены характерные зоны (см. рис. 2) по изменению границы ММГ относительно первоначальных условий. Зона I характеризуется поднятием кровли ММГ относительно исходного положения с промерзанием тела земляного полотна под проезжей частью. В данную зону входят следующие конструктивные элементы: проезжая часть, обочины и верхняя часть откосов. Такие криогенные деформации, как термические просадки и пучение земляного полотна, сложенного мелкими маловлажными песками, в данной зоне не отмечаются. Деформирование конструктивных элементов автомобильной дороги в зоне I происходит за счет сдвиговых смещений грунтов деятельного слоя (сезонного промерзания-оттаивания) в сторону зоны II, которые увеличиваются с приближением к границе зоны.

В зонах II отмечается деградация ММГ с существенным понижением их кровли относительно исходного положения. В данные зоны входят средняя и нижняя часть откосов земляного полотна, а также части полосы отвода, примыкающие к подошве насыпи (до 25 м на рассматриваемом характерном участке). Ширина указанных зон зависит от высоты насыпи, объема метелевого переноса, отложения снега и других факторов. Внешней границей вторых зон служит зона III, характеризующаяся отсутствием изменения границы ММГ относительно первоначальных условий и характерных деформаций. При этом сама зона II, по данным выполненных обследований, подвержена максимальным криогенным

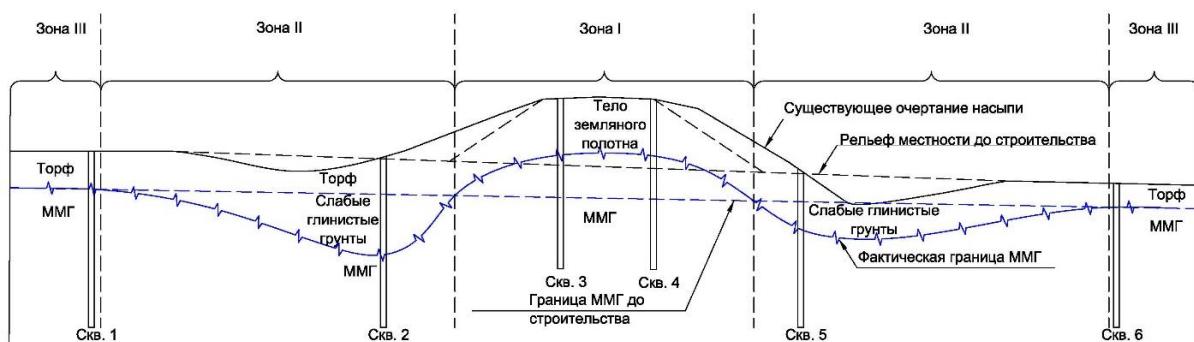


Рис. 2. Поперечный геокриологический профиль характерного участка земляного полотна

деформациям, которые вызваны деградацией ММГ в основании откосов насыпи и в прилегающей полосе отвода. У подошвы откосов насыпи наблюдаются термические просадки, совпадающие по расположению с ложами протаивания ММГ, в откосных частях фиксируются активные сдвиговые смещения грунтов деятельного слоя. В ложах протаивания формируются слабые грунты, представленные сильноразложившимися водонасыщенными торфами, глинистыми грунтами текучей консистенции. Очевидно, что основные негативные криогенные процессы и деформации на участке происходят именно в этой зоне, что требует особого учета при проведении инженерно-геокриологического мониторинга.

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие особенности геокриологического состояния характерного для условий ЯНАО участка эксплуатируемой насыпи, необходимые для обоснования системы инженерно-геокриологического мониторинга:

- грунты основания и тела земляного полотна под проезжей частью перешли в многолетнемерзлое состояние, при этом земляное полотно сложено относительно стабильными маловлажными песками;

- максимальная величина деградации ММГ наблюдается под откосными частями земляного полотна и в полосе отвода на достаточно большую ширину, что связано с нарушением естественных условий теплообмена за счет аккумуляции снега в холодный период года;

- после деградации ММГ формируются слабые водонасыщенные грунты, зоны термических просадок заполняются поверхностными водами;

- деформирование конструктивных элементов автомобильной дороги, в зависимости от зоны, происходит как за счет термических просадок (основание откосов и полоса отвода), так и за счет активных сдвиговых смещений грунтов деятельного слоя в откосных частях земляного полотна.

С учетом выявленных особенностей характерного для условий ЯНАО участка эксплуатируемой насыпи основными параметрами, требующими инженерно-геокриологического мониторинга, приняты температура и деформации (вертикальные и горизонтальные) грунтовых массивов, мощность и плотность суглиновых от-

ложений на откосах и в полосе отвода, а также плотность тепловых потоков, проходящих через различные элементы поперечного профиля. При этом мониторинг влажности в установленных грунтово-гидрологических условиях теряет практический смысл.

Установка системы инженерно-геокриологического мониторинга на характерном участке выполнена в октябре 2024 г. по схеме, представленной на рис. 3. Система устанавливается симметрично справа и слева относительно оси автомобильной дороги.

Схема (см. рис. 3) разработана на основании проведенных обследований и в соответствии с предложенной и описанной выше системой зонирования. Основные деформации конструктивных элементов автомобильной дороги связаны с повышением температуры грунтовых массивов и понижением границы ММГ. Результаты обследования указывают на незатухающий тренд этого процесса, что говорит о необходимости мониторинга температуры грунтов в зоне II в месте максимальной деградации ММГ, а также в зоне III с дальнейшим сравнительным анализом получаемых результатов. Необходимость устройства термометрической скважины по оси земляного полотна (зона I), рекомендованной [7], отсутствует, что обосновано выявленными выше особенностями геокриологического состояния участка.

Для мониторинга сдвиговых смещений грунтов деятельного слоя в откосных частях земляного полотна (зона I) установлены гибкие трубы в вертикальных скважинах для инклинометрических замеров. Трубы для таких замеров оборудованы дополнительными термометрическими косами. Установка горизонтальных инклинометрических систем под проезжей частью в текущих условиях не имеет смысла. Для мониторинга термических просадок (в месте их максимального проявления) в зоне II предусмотрены поверхностные геодезические марки, позволяющие в дальнейшем выполнять высокоточную наземную съемку.

Поскольку на характерном участке отмечено влияние значительных объемов снежных отложений на откосах и в полосе отвода у подошвы насыпи на изменение границы ММГ в зоне II, для соответствующего мониторинга установлены снегомерные рейки у подошвы насыпи (место максимального снегонакопления). Контрольные рейки установлены в зонах III

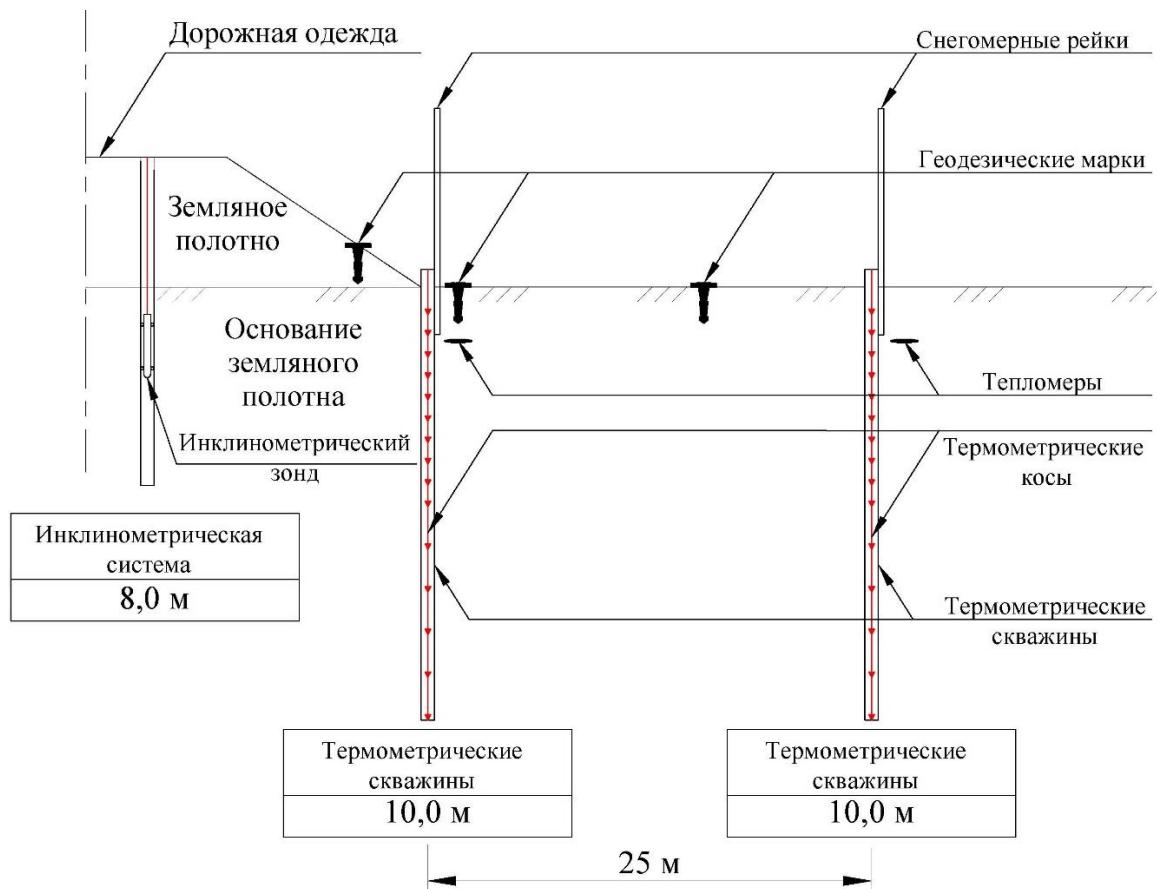


Рис. 3. Схема установки системы инженерно-геокриологического мониторинга

в условиях естественного ландшафта. В этих же местах для мониторинга параметров теплообмена грунтовых массивов с атмосферой под почвенно-растительным слоем установлены датчики плотности теплового потока.

Все наблюдения, запланированные в зонах III, позволят не только оценить геокриологические особенности местности, но и путем сопоставления с наблюдениями в зонах II выделить техногенную составляющую происходящих криогенных процессов.

Для возможности реализации инженерно-геокриологического мониторинга разработано и изготовлено специализированное оборудование, в том числе скважинный инклинометрический зонд, оснащенный трехосевыми компасом, гироскопом и акселерометром; термометрическая измерительная система с измерительным блоком и программным обеспечением; система для измерения плотности тепловых потоков, состоящая из датчиков и измерительного микропроцессорного многоканального блока.

На рис. 4 представлены некоторые этапы и результаты установки измерительных средств

для мониторинга теплового и деформированного состояния системы «насыпь – основание» на характерном для условий ЯНАО участке эксплуатируемой насыпи.

Нулевой цикл измерений выполнен после монтажа всех термометрических и инклинометрических систем (октябрь 2024 г.), после недельной выстойки скважин. Первый цикл наблюдений выполнен в ноябре 2024 г. Проведенные циклы подтвердили работоспособность установленных систем. Анализ полученных данных по изменению температурного поля позволяет сделать вывод о невыдержанности кровли мерзлых грунтов, что свойственно для участков с деградацией ММГ. Инклинометрические измерения на нулевом цикле выполнены для фиксации текущего пространственного положения (траектории) инклинометрических скважин. По результатам первого цикла наблюдений выявлены сдвиговые деформации, подтверждающие включение в работу инклинометрических скважин после буровых работ. На основании анализа нулевого и первого циклов измерений можно заключить, что корректировка измерительного оборудования, входящего



Рис. 4. Установка измерительных средств для контроля теплового и деформированного состояния системы «насыпь – основание»:

а – бурение инклинометрической скважины на откосе земляного полотна; б – установленные термометрические скважины; в – гибкая обсадная труба для инклинометрических измерений на откосе; г – общий вид термометрической скважины

в систему инженерно-геокриологического мониторинга, или регламента проведения измерений не требуется.

Заключение

Анализ и систематизация полученных результатов обследований в совокупности с исходными материалами позволил сформировать схему особенностей деформирования характерного для условий ЯНАО участка эксплуатируемой насыпи автомобильной дороги, а также построить поперечный геокриологический профиль. Для обработки полученных результатов обследований разработана и применена универсальная система зонирования эксплуатируемого земляного полотна, полосы отвода и прилегающей территории, учитывающая влияние криогенных процессов и факторов.

Полученная схема особенностей деформирования и предложенная система зонирования

геокриологического профиля эксплуатируемой насыпи позволили сформулировать особенности ее геокриологического состояния, необходимые для обоснования системы инженерно-геокриологического мониторинга.

На основании выполненных исследований обоснована схема установки системы инженерно-геокриологического мониторинга, разработан и изготовлен комплекс измерительных средств для объективного контроля теплового и деформированного состояния геотехнической системы «насыпь – основание» на характерном для условий ЯНАО участке эксплуатируемой насыпи. Выполнена установка системы инженерно-геокриологического мониторинга, а также нулевой и первый циклы наблюдений, которые подтвердили работоспособность системы и отсутствие необходимости корректировки ее параметров.

Список источников

1. Fondjo S. A. A., Theron E. Assessment of the Mineral Composition of Heaving Soils Using Geotechnical Properties // Civil Engineering and Architecture. 2020. No. 8. P. 619–631. <https://doi.org/10.13189/cea.2020.080425>.
2. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов / В. П. Мельников, В. И. Осипов, А. В. Брушков [и др.] // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV, № 6. С. 3–15.
3. Lanis A. L., Razuvayev D. A. Systematization of features and requirements for geological survey of railroad subgrades functioning in cold regions // Sciences in Cold and Arid Regions. 2017. Vol. 9, Iss. 3. P. 205–212. DOI 10.3724/SP.J.1226.2017.00205. EDN XOEQKD.
4. Harris S. A. The Tibetan Railroad: Innovative Construction on Warm Permafrost in a Low-Latitude, High-Altitude Region // Engineering Earth: The impacts of megaengineering projects. 2011. Chap. 43. P. 747–765. DOI 10.1007/978-90-481-9920-4_43.
5. Monitoring Roadbed Stability in Permafrost Area of Qinghai–Tibet Railway by MT-InSAR Technology / H. Liu, S. Huang, C. Xie [et al.] // Land. 2023. Vol. 12. P. 474. <https://doi.org/10.3390/land12020474>.
6. Об утверждении приоритетных направлений научно-технического развития и перечня важнейших научноемких технологий : Указ Президента РФ № 529 от 18.06.2024 // Президент России : [официальный сайт]. URL: <http://kremlin.ru/acts/news/74328> (дата обращения: 24.09.2024).
7. ОДМ 218.11.007–2023. Методические рекомендации по организации инженерно-геокриологического мониторинга и оборудованию инженерно-геокриологических мониторинговых стационарных постов в полосе отвода автомобильных дорог в криолитозоне. Москва : ИМЭ СО РАН, 2023. 140 с.
8. Кретов В. А., Лейтланд И. В. Исследование причин возникновения деформаций на автомобильных дорогах Ямало-Ненецкого автономного округа // TRANSOILCOLD 2023 : материалы 6-го Международного симпозиума по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах, Москва, 02–05 октября 2023 года. Москва : Дашков и К, 2023. С. 121–124. EDN ZRTLHT.
9. Бедрин Е. А., Завьялов А. М., Завьялов М. А. Обеспечение термической устойчивости основания земляного полотна автомобильных дорог : монография. Омск : СибАДИ, 2012. 178 с.

References

1. Fondjo S. A. A., Theron E. Assessment of the Mineral Composition of Heaving Soils Using Geotechnical Properties. *Civil Engineering and Architecture*. 2020;(8):619–631. URL:<https://doi.org/10.13189/cea.2020.080425>.
2. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brushkov A. V. [et al.]. Adaptation of Arctic and Subarctic infrastructure to changes in the temperature of frozen soils. *Earth's Cryosphere*. 2021;XXV(6):3–15. (In Russ.).
3. Lanis A. L., Razuvayev D. A. Systematisation of features and requirements for geological survey of railroad subgrades functioning in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2017;9(3):205–212. DOI 10.3724/SP.J.1226.2017.00205.
4. Harris S. A. The Tibetan Railroad: Innovative Construction on Warm Permafrost in a Low-Latitude, High-Altitude Region. *Engineering Earth: The impacts of megaengineering projects*. 2011. Chapter 43. P. 747–765. DOI 10.1007/978-90-481-9920-4_43.
5. Liu H., Huang S., Xie C. [et al.]. Monitoring Roadbed Stability in Permafrost Area of Qinghai-Tibet Railway by MT-InSAR Technology. *Land*. 2023;12:474. URL: <https://doi.org/10.3390/land12020474>.
6. Decree of the President of the Russian Federation No. 529 of 18.06.2024 ‘On approval of priority directions of scientific and technical development and the list of the most important science-intensive technologies’. President of Russia: [official site]. (In Russ.). URL: <http://kremlin.ru/acts/news/74328>.
7. ODM 218.11.007–2023. Methodological recommendations for the organization of engineering-geocryological monitoring and equipment of engineering-geocryological monitoring stationary posts in the right-of-way of highways in the cryolithozone. Moscow: IMECH SB RAS; 2023. 140 p. (In Russ.).
8. Kretov V. A., Leitland I. V. Edited by T. V. Shepitko. Investigation of the causes of deformations on motor roads of Yamalo-Nenets Autonomous District. *TRANSOILCOLD 2023: Proceedings of the 6th International Symposium on Construction Engineering of Ground Structures for Transport in Cold Regions, Moscow, 02–05 October 2023*. Moscow: Dashkov and Co; 2023. P. 121–124. (In Russ.).
9. Bedrin E. A., Zavyalov A. M., Zavyalov M. A. Ensuring thermal stability of the subgrade of highways: monograph. Omsk: The Siberian State Automobile and Highway University; 2012. 178 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

Д. А. Разуваев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

Р. С. Печенкин – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

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

D. A. Razuvayev – Candidate of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Surveying, Design and Construction of Railways and Highways Department, Siberian Transport University.

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

R. S. Pechenkin – Postgraduate of the Track and Track Maintenance Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 22.01.2025; одобрена после рецензирования 23.01.2025; принятая к публикации 24.01.2025.

The article was submitted 22.01.2025; approved after reviewing 23.01.2025; accepted for publication 24.01.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.121.532;624.131;624.195

doi 10.52170/1815-9265_2025_73_77

Задача о предельном равновесии свода обрушения над подземными сооружениями криволинейного очертания и ее практическое применение

Константин Валерьевич Королев^{1✉}, Валерия Сергеевна Макарова²,
Анатолий Олегович Кузнецов³, Александр Михайлович Каулов⁴

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

¹ korolev_kv@mail.ru[✉]

² lera.makarova.2011@mail.ru

³ kuzemon91@mail.ru

⁴ karaulov_am@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрена задача о предельном равновесии свода обрушения, формирующемся над подземными конструкциями криволинейного очертания. Приведен развернутый критический анализ нормативной методики. Показано, что данная методика имеет ряд недостатков, связанных с невозможностью определить коэффициент крепости иначе как по описательной шкале М. М. Протодьяконова или по формулам, отсылающим к этой же шкале. Далее приведен обзор некоторых решений задачи о своде обрушения в скальных грунтах, а именно: задачи о своде предельного равновесия (обрушения) над горной выработкой, рассмотренной В. Риттером (1879); задачи Я. О. Стакнёва (2023), в которой решение В. Риттера получило развитие, прежде всего в плане учета не только нормальных, но и касательных напряжений, действующих по контуру свода обрушения; также проанализировано полученное ранее авторами решение задачи о предельном равновесии свода обрушения в скальных грунтах, полученное по схеме Риттера – Стакнёва, но с применением методов вариационного исчисления. Это решение было получено в замкнутом виде. Отличительной чертой полученных результатов является отказ от понятия коэффициента крепости в пользу стандартных характеристик прочности скальных грунтов. Далее в теоретической части статьи дается решение задачи о своде обрушения над криволинейными подземными конструкциями (над калоттой) как задачи вариационного исчисления. В работе показано, что наличие калотты не влияет на очертание свода обрушения, но снижает нагрузку от горного давления на подземные конструкции. В качестве результатов исследования приведено описание практического метода расчета давления грунта на криволинейные подземные конструкции.

Ключевые слова: свод обрушения, вариационное исчисление, нагрузка от горного давления, калотта, подземные сооружения

Для цитирования: Задача о предельном равновесии свода обрушения над подземными сооружениями криволинейного очертания и ее практическое применение / К. В. Королев, В. С. Макарова, А. О. Кузнецов, А. М. Каулов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 77–86. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_77.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Limit equilibrium problem of a collapse vault over curvilinear underground structures and its practical application

Konstantin V. Korolev^{1✉}, Valeria S. Makarova², Anatoly O. Kuznetsov³, Alexander M. Karaulov⁴

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

¹ korolev_kv@mail.ru[✉]

² lera.makarova.2011@mail.ru

³ kuzemon91@mail.ru

⁴ karaulov_am@mail.ru

Abstract. The paper deals with the problem of ultimate equilibrium of a collapse vault formed over underground structures of curvilinear outline. A detailed critical analysis of the normative methodology is given. It is shown that

the normative methodology has a number of drawbacks related to the impossibility to determine the strength coefficient other than by the descriptive scale of M. M. Protodyakonov or by formula referring to the same scale. The following is a review of some solutions to the problem of the collapse vaulting in rocky soils, namely: the problem of the vaulting of the limit equilibrium (collapse) over a mine excavation, considered by W. Ritter (1879). Ritter (1879); the problem of J. O. Stakhnev (2023), in which Ritter's solution was developed, first of all, in terms of taking into account not only normal, but also tangential stresses acting along the contour of the collapse vault; the solution of the problem of the limit equilibrium of the collapse vault in rocky soils, obtained according to the Ritter – Stakhnev scheme, but with the use of methods of calculus of variations, obtained earlier by the authors, is also analysed. This solution was obtained in closed form. A distinctive feature of the obtained results is the rejection of the notion of strength coefficient in favor of standard strength characteristics of rocky soils. Further in the theoretical part of the paper the solution of the problem of collapse vaulting over curvilinear underground structures (over calotte) as a problem of variation calculus is given. The paper shows that the presence of the calotte does not affect the outline of the collapse vault, but reduces the load from the rock pressure on the underground structures. The results section of the study describes a practical method for calculating the ground pressure on curvilinear underground structures.

Keywords: collapse vault, calculus of variations, mountain pressure load, calotte, underground structures

For citation: Korolev K. V., Makarova V. S., Kuznetsov A. O., Karaulov A. M. Limit equilibrium problem of a collapse vault over curvilinear underground structures and its practical application. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2025;(73):77–86. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_77.

Введение

При сооружении тоннелей широко используется метод поэтапного раскрытия выработки, когда проходка осуществляется не на все сечение, а сначала ведут разработку калотты (как правило, с криволинейной верхней границей), а затем – штроссы. Очевидно, что геометрические параметры калотты, и прежде всего подъем арки, напрямую влияют на напряженно-деформированное состояние вмещающего грунтового массива и, как следствие, на величину давления грунта, воспринимаемого временной крепью. В принципе похожая ситуация возникает и при сборе уже постоянных нагрузок на односводчатые станции метрополитенов на линиях глубокого заложения, а также при сборе нагрузок на иные подземные сооружения с криволинейным очертанием верха конструкций и тех, ширина которых значительно превышает высоту.

К сожалению, до сих пор не существует общепринятых методик расчета для таких случаев, а общая схема сбора нагрузок от горного давления на подземные конструкции не позволяет учесть некоторые, довольно существенные особенности распределения давления грунта на подземные конструкции криволинейного очертания. С практической точки зрения было бы полезно иметь такой метод расчета давления грунта на криволинейные подземные конструкции, который бы учитывал геометрическую специфику таких сооружений, но «не уходил далеко» от общепринятых апробированных методов, закрепленных в нормативных документах.

Результаты исследований различных авторов и их обсуждение. Критический анализ методов расчета нагрузки от горного давления

Нормативная методика сбора нагрузок на подземные сооружения. Для определения нагрузок от горного давления на подземные сооружения разработано достаточно большое количество расчетных схем. В транспортном и гидротехническом строительстве основной расчетной схемой является схема свода обрушения [1–3], которая была разработана проф. М. М. Протодьяконовым (в рамках его теории сводообразования [4]) более ста лет назад и до сих пор не утратила своей актуальности. Опишем базовые положения нормативной методики определения нагрузок от горного давления на подземные конструкции, основанной на этой теории.

Расчетная схема показана на рис. 1. В грунтовом массиве, вмещающем подземное сооружение 1, формируется область обрушения, которая состоит из боковых призм 2 и свода 3. В рамках данной расчетной схемы свод обрушения создает вертикальное давление на конструкции тоннеля, равное

$$p = \gamma h, \quad (1)$$

а боковые призмы обрушения – горизонтальное:

$$q = \gamma(h + 0,5h_t) \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Phi_k}{2} \right). \quad (2)$$

Здесь γ – удельный вес грунта; h – высота свода обрушения; h_t – высота подземного сооружения (トンнеля); Φ_k – кажущийся угол внутреннего трения скального грунта.

Примечание. В настоящей статье используются обозначения, отличающиеся от принятых в сводах правил [1–3]: высота свода обрушения здесь обозначена h вместо h_1 в нормах, вертикальное давление – p вместо q , горизонтальное давление – q вместо p . Это сделано для удобства дальнейших выкладок.

Высота свода обрушения определяется следующим образом:

$$h = \frac{l}{0,2\alpha R_c}, \quad (3)$$

$$l = b + 2h_t \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Phi_k}{2} \right), \quad (4)$$

где α – коэффициент, учитывающий влияние трещиноватости массива и принимаемый по таблицам [1, 2]; R_c – прочность грунта на одноосное сжатие, МПа; l – пролет свода обрушения, зависящий от габаритных размеров b и h_t тоннеля и кажущегося угла внутреннего трения Φ_k .

Угол Φ_k вычисляется по формуле

$$\Phi_k = \operatorname{arctg} f, \quad (5)$$

где f – коэффициент крепости грунта.

Формула (3) является компиляцией двух положений теории сводообразования: базового определения коэффициента крепости:

$$f = \frac{l/2}{h}, \quad (6)$$

и одного из способов вычисления коэффициента крепости через прочность грунта:

$$f = \frac{R_c}{10}. \quad (7)$$

Коэффициент α в формуле (3) является сугубо эмпирическим параметром и касается только учета трещиноватости.

Зафиксируем несколько моментов, имеющих принципиальное значение для анализа данной методики:

1. Выражение (6) имеет принципиальный характер, формализуя основную идею теории сводообразования, которая состоит в том, что размер свода обрушения определяется интегральным прочностным параметром – коэффициентом крепости. К слову, в отечественном тоннеле- и метростроении этот коэффициент стал важнейшим параметром грунта в подземном строительстве, определяя не только размеры свода обрушения, но и многие технологические процессы.

2. Для назначения величины коэффициента крепости М. М. Протодьяконовым была разработана специальная шкала, в которой коэффициент крепости принимается по описанию грунта [4]. Эта шкала была составлена по результатам выполненного анализа и обобщения обширного эмпирического материала.

3. Поскольку назначение параметра, используемого в инженерных расчетах по описанию грунта, по понятным причинам является нежелательным, М. М. Протодьяконовым, помимо упомянутой шкалы, было предложено семь способов вычисления коэффициента крепости, в том числе и формула (7), ныне вошедшая в нормативные документы.

4. Существуют и другие зависимости, связывающие коэффициент крепости с прочностью грунта на одноосное сжатие, наиболее известны среди них формулы М. М. Протодьяконова-мл. и Л. И. Барона [5, 6]. Однако все попытки разработать способ вычисления коэффициента крепости неизменно адресуют к шкале М. М. Протодьяконова.

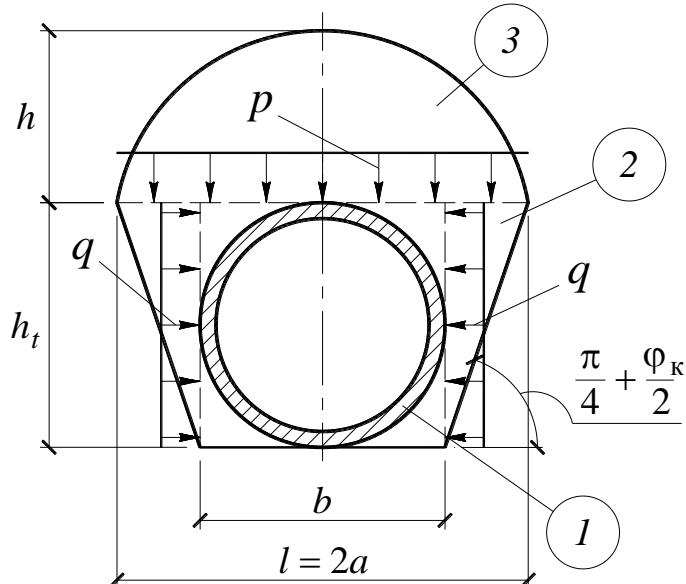


Рис. 1. Расчетная схема к определению горного давления по [1–3]:
1 – подземное сооружение (トンネル); 2 – боковые призмы обрушения; 3 – свод обрушения

5. До выхода в свет норм 2012 г. высота свода обрушения h выражалась прямо из формулы (6), а коэффициент крепости принимался по шкале М. М. Протодьяконова, которая была непосредственно включена в нормы (см., например, [7]). Таким образом, шкала М. М. Протодьяконова получила огромную апробацию на практике и со временем стала восприниматься как наиболее надежный ориентир (хотя и описательный) при оценке устойчивости грунтов вокруг подземных сооружений.

6. Включение в нормативные документы формулы (3) привело к двум противоречиям. Во-первых, например, полускальному грунту с прочностью $R_c = 3$ МПа, даже без учета трещиноватости, соответствует значение коэффициента крепости $f = 0,3$, что по шкале М. М. Протодьяконова соответствует плынунам, а по таблице 5.9 СП 120 [1] это значение в два раза меньше, чем для суглинков полутвердой консистенции ($f = 0,6$). Во-вторых, для очень прочных грунтов с $R_c = 400$ МПа по формулам (3), (6) и (7) коэффициент крепости $f = 40$, в то время как по шкале М. М. Протодьяконова максимальное значение $f = 20$.

7. Методика лабораторного определения коэффициента крепости регламентирована ГОСТ 21153.1–75* [8], однако в силу довольно неочевидной (и даже спорной) самой схемы испытаний она не получила распространения.

Подытоживая, можно сказать, что схема свода обрушения прочно вошла в отечественную практику проектирования транспортных и гидротехнических тоннелей, однако нормативная методика имеет ряд недостатков, связанных с невозможностью определить коэффициент крепости иначе как по описательной шкале М. М. Протодьяконова или по формулам, отсылающим к этой же шкале с той или иной степенью приближения. Емко это было сформулировано в 2015 г. И. В. Баклашовым в работе [9]: «Задача свodoобразования остается нерешенной до настоящего времени».

Решение В. Риттера. Как ни странно, но публикаций, в которых бы ставилась цель дать теоретический анализ схемы свода обрушения, совсем немного, притом что впервые задача о своде предельного равновесия (обрушения) над горной выработкой была рассмотрена еще в 1879 г. В. Риттером [10], т. е. до появления работ М. М. Протодьяконова.

Расчетная схема В. Риттера показана на рис. 2. Свод, ограниченный сверху заранее неизвестной линией $y(x)$, а снизу отрезком OL , стремится обрушиться в выработку под действием собственного веса G . Этому препятствуют силы сопротивления грунта отрыву, действующие по контуру свода. Сопротивление грунта В. Риттер определил как нормальные к контуру напряжения σ_n , равные в каждой точке прочности скального грунта на одноосное растяжение R_t . Если суммарных сил ΣR сопротивления отрыву недостаточно, чтобы удержать свод от обрушения, то снизу необходимо приложить дополнительную удерживающую силу P , которая, очевидно, и будет равнодействующей вертикального давления свода обрушения на подземную конструкцию, верхняя плоскость которой, подразумевается, совпадает с линией OL .

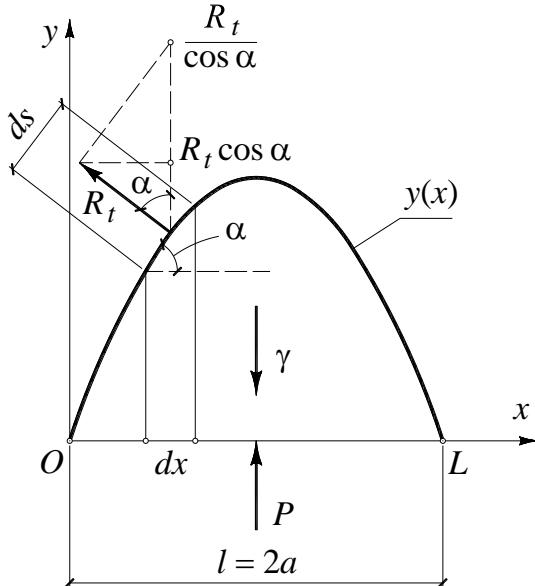


Рис. 2. Расчетная схема свода обрушения по В. Риттеру

Уравнение проекции на вертикальную ось, составленное В. Риттером, имеет вид:

$$P = G - \Sigma Y, \quad (8)$$

или

$$P = \gamma \int_0^l y dx - \int_0^s \frac{R_t}{\cos \alpha} ds, \quad (9)$$

где ΣY – условное обозначение суммы проекций на ось Oy всех сил сопротивления грунта обрушению свода; α – угол наклона контура свода к оси Ox ; s – длина контура свода; ds – элемент контура.

В уравнении (9) обращает на себя внимание то, как спроектирован вектор R_t на ось Oy – по правилам векторной алгебры должно быть $R_t \cos \alpha$.

Этот чересчур экстравагантный для задач механики прием, использованный В. Риттером, обсуждается, например, в работах [11] и [12]. Авторы этих исследований отмечают, что данный поворот в решении, конечно же, не может быть принят, но его можно рассматривать как скрытую гипотезу о существовании дополнительных сил, действующих по границе свода и препятствующих его обрушению в выработку.

Вернемся к описанию решения В. Риттера. Уравнение (9) им было приведено к виду

$$P = \int_0^l [\gamma y - R_t(1 + y'^2)] dx. \quad (10)$$

Здесь учтено, что $ds = dx/\cos \alpha$ и $\operatorname{tg} \alpha = y'$.

Представленная в таком виде задача поиска максимума P – это классическая задача вариационного исчисления, которая решается с помощью уравнения Эйлера:

$$F'_y - \frac{d}{dx} F'_{y'} = 0, \quad (11)$$

где $F'_y \equiv \partial F/\partial y$ и $F'_{y'} \equiv \partial F/\partial y'$ – частные производные, а F – подынтегральное выражение

$$F(x, y, y') = \gamma y - R_t(1 + y'^2). \quad (12)$$

Решив это уравнение с граничными условиями $y = 0$ при $x = 0$ и $y = 0$ при $x = l$, В. Риттер получил искомое уравнение $y(x)$ свода обрушения и выражение для максимума силы P вертикального давления:

$$y(x) = \frac{\gamma x}{4R_t}(l - x), \quad P = \frac{l}{48R_t}(l^2\gamma^2 - 48R_t^2). \quad (13)$$

Вывод об очертании свода обрушения по квадратной параболе не противоречил общим представлениям о формах потери устойчивости грунта над выработкой и в целом был принят инженерным сообществом горняков и тоннельщиков. В то же время указанные выше

особенности решения В. Риттера, видимо, послужили причиной, по которой от дальнейшего развития этого направления практически отказались на долгое время. Возвращение к задаче В. Риттера произошло уже в последние годы благодаря работам [11] и [12].

Решение Я. О. Стакнёва. В работе [11] задача В. Риттера получила развитие прежде всего в плане учета не только нормальных (σ_n), но и касательных (τ_n) напряжений, действующих по контуру свода обрушения (рис. 3, *a*). Напряжения σ_n и τ_n было предложено связать, используя паспорт прочности скального грунта (см. рис. 3, *б*), построение которого регламентируется ГОСТ 21153.8–88 [13]. Тем самым в решении Я. О. Стакнёва, как и в решении В. Риттера, применяются стандартные параметры прочности, которые могут быть определены в лабораторных условиях по более-менее очевидным схемам испытаний. Это следует считать преимуществом по сравнению с теми методиками, где параметры грунта назначаются по их словесному описанию.

Уравнение равновесия (8), записанное для схемы Риттера – Стакнёва (см. рис. 3, *a*), имеет вид

$$\frac{1}{2}P = \int_0^a \gamma y dx - \int_0^{s/2} (\sigma_n \cos \alpha + \tau_n \sin \alpha) ds. \quad (14)$$

Для огибающей предельных кругов Мора Я. О. Стакнёв принял функцию

$$\tau_n = C_0 \left(1 - \frac{\sigma_n}{R_t}\right)^m, \quad (15)$$

где C_0 – сопротивление скального грунта сдвигу (резу) при $\sigma_n = 0$; m – параметр кри-

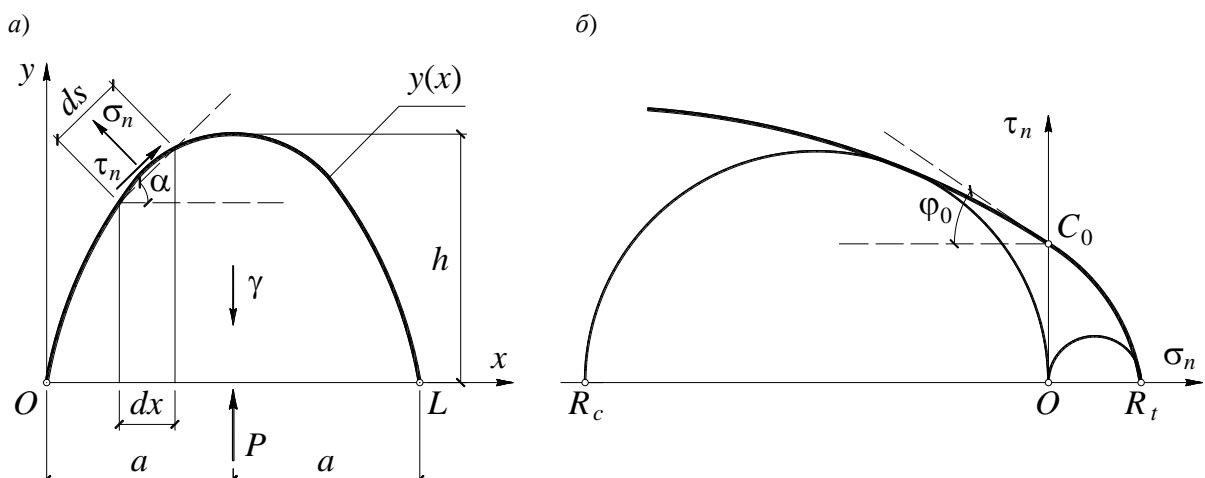


Рис. 3. Расчетная схема Риттера – Стакнёва (*а*) и паспорт прочности скального грунта (*б*)

вой, который можно получить при статистической обработке результатов испытаний скального грунта на одноосное сжатие, одноосное растяжение и объемное сжатие [13].

Подставим (15) в (14) и, учитывая, что $ds = dx/\cos \alpha$ и $\operatorname{tg} \alpha = y'$, получим

$$\frac{1}{2}P = \int_0^a \gamma y - \sigma_n - y' C_0 \left(1 - \frac{\sigma_n}{R_t}\right)^m dx. \quad (16)$$

Как и в решении В. Риттера, далее ставится задача максимизации функции P , которая зависит от двух неизвестных функций $y(x)$ и $\sigma_n(x)$.

С точки зрения техники построения решения по сравнению с В. Риттером Я. О. Стахнёв пошел на упрощение, отказавшись от рассмотрения этой задачи как задачи вариационного исчисления. Вместо этого он рассмотрел данную задачу как задачу поиска максимума функции одного аргумента, введя для этого две дополнительные гипотезы относительно функций $y(x)$ и $\sigma_n(x)$. Первая из них касалась очертания свода, которое было принято Я. О. Стахнёвым по квадратной параболе (со ссылкой на В. Риттера), но с заранее неизвестной высотой h :

$$y = \frac{hx}{a^2}(2a - x). \quad (17)$$

Высота h определялась в результате поиска максимума силы P .

Вторая гипотеза давала распределение нормальных напряжений по контуру свода:

$$\sigma_n = R_t \cos \alpha. \quad (18)$$

После подстановки этих двух гипотез в (16) Я. О. Стахнёв пришел к задаче поиска максимума функции P , которая теперь зависела от единственной переменной h :

$$\frac{1}{2}P(h) = \max_h \left\{ \int_0^a \gamma y - \frac{R_t}{\sqrt{1+y'^2}} - y' C_0 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+y'^2}}\right)^m dx \right\}. \quad (19)$$

Этот подход позволил получить целый ряд интересных результатов, описание которых можно найти в [11].

Задача Риттера – Стахнёва как задача вариационного исчисления. Следующий шаг в развитии решений В. Риттера и Я. О. Стахнёва вполне логично вытекает из сказанного выше. Этот шаг был сделан авторами настоящей статьи и опубликован в [12]. Суть его со-

стояла в том, что поиск максимума силы P осуществлялся как поиск функционала (16) от двух неизвестных функций $y(x)$ и $\sigma_n(x)$ методами вариационного исчисления. В этом случае решается система уравнений Эйлера [14]:

$$F'_y - \frac{d}{dx} F'_{y'} = 0, \quad F'_{\sigma_n} - \frac{d}{dx} F'_{\sigma'_n} = 0, \quad (20)$$

где F представляет собой подынтегральное выражение из правой части (16):

$$F(x, y, y', \sigma_n, \sigma'_n) = \gamma y - \sigma_n - y' C_0 \left(1 - \frac{\sigma_n}{R_t}\right)^m, \quad (21)$$

а содержание частных производных аналогично формуле (11).

Взяв соответствующие производные и подставив их в систему уравнений (20), имеем:

$$\begin{aligned} \gamma - \frac{C_0 m}{R_t} \sigma'_n \left(1 - \frac{\sigma_n}{R_t}\right)^{m-1} &= 0, \\ -1 + \frac{C_0 m}{R_t} y' \left(1 - \frac{\sigma_n}{R_t}\right)^{m-1} &= 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Интегралы этих уравнений с граничными условиями $\sigma_n(x) = R_t$ при $x = a$ и $y = 0$ при $x = 0$ дают выражение для нормальных напряжений по контуру свода обрушения и уравнение самого контура свода обрушения:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= R_t \left\{ 1 - \left[\frac{\gamma}{C_0} (a - x) \right]^{\frac{1}{m}} \right\}, \\ y &= \frac{R_t}{\gamma} \left(\frac{\gamma}{C_0} \right)^{\frac{1}{m}} \left[a^{\frac{1}{m}} - (a - x)^{\frac{1}{m}} \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

После подстановки полученных функций $y(x)$ и $\sigma_n(x)$ в уравнение (16) и интегрирования было получено весьма компактное выражение:

$$\frac{1}{2}P = R_t a \left[\left(\frac{\gamma a}{C_0} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{m}{1+m} - 1 \right]. \quad (24)$$

Таким образом, в [12] было представлено строгое (в рамках гипотезы сводообразования) решение задачи о предельном равновесии свода обрушения, полученное методами вариационного исчисления.

Теоретическая часть

Опираясь на рассмотренные выше решения, рассмотрим задачу о предельном равновесии свода обрушения, формирующемся над калоттой или над подземными сооружениями криволинейного очертания, ширина которых

существенно превышает высоту. Расчетная схема показана на рис. 4.

Для этого случая уравнение равновесия (16) примет вид

$$\frac{1}{2}P = \int_0^a \gamma(y - y_c) - \sigma_n - y' C_0 \left(1 - \frac{\sigma_n}{R_t}\right)^m dx, \quad (25)$$

где y_c – уравнение верха калотты или криволинейной подземной конструкции.

Поиск максимума P достигается решением системы уравнений (20), где подынтегральное выражение F дается равенством

$$F(x, y, y', \sigma_n, \sigma'_n) = \gamma y - \gamma y_c - \sigma_n - y' C_0 \left(1 - \frac{\sigma_n}{R_t}\right)^m. \quad (26)$$

Поскольку уравнение $y_c(x)$ калотты является заранее заданным, то слагаемое γy_c пропадает при дифференцировании F по y , y' , σ и σ' . Следовательно, уравнения (23) для напряжений по контуру свода и для очертания свода остаются без изменений.

Несколько изменится выражение для силы P . Для определенности примем уравнение калотты в виде

$$y_c = \frac{h_c x}{a^2} (2a - x), \quad (27)$$

где h_c – высота калотты (подъем арки подземной конструкции).

Выполнив необходимые преобразования, запишем выражение для P :

$$P = 2R_t a \left[\left(\frac{\gamma a}{C_0} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{m}{1+m} - 1 \right] - \frac{4}{3} \gamma h_c a. \quad (28)$$

Таким образом, второе слагаемое в правой части представляет собой вес грунта в области, заключенной между линиями $y_c(x)$ и $y=0$.

Отсюда можно сделать важный вывод: калотта не влияет на очертание свода обрушения, но влияет на величину нагрузки от горного давления.

Результаты исследования и практические рекомендации

Полученные теоретические решения, в том числе теоретическое обоснование того факта, что очертание $y(x)$ свода обрушения не зависит от очертания $y_c(x)$ калотты (или криволинейного очертания подземного сооружения), побудили авторов изложить некоторые соображения относительно практического применения изложенных выше результатов.

Изначально в работе ставилась задача не только разработать метод расчета давления грунта на криволинейные конструкции, но и постараться приблизить его к нормативной методике, попутно по возможности исправляя те противоречия, которые в этой методике содержатся и которые были описаны в начале статьи. По этой причине предлагаемые далее практические рекомендации несколько скорректированы относительно описанных выше теоретических решений.

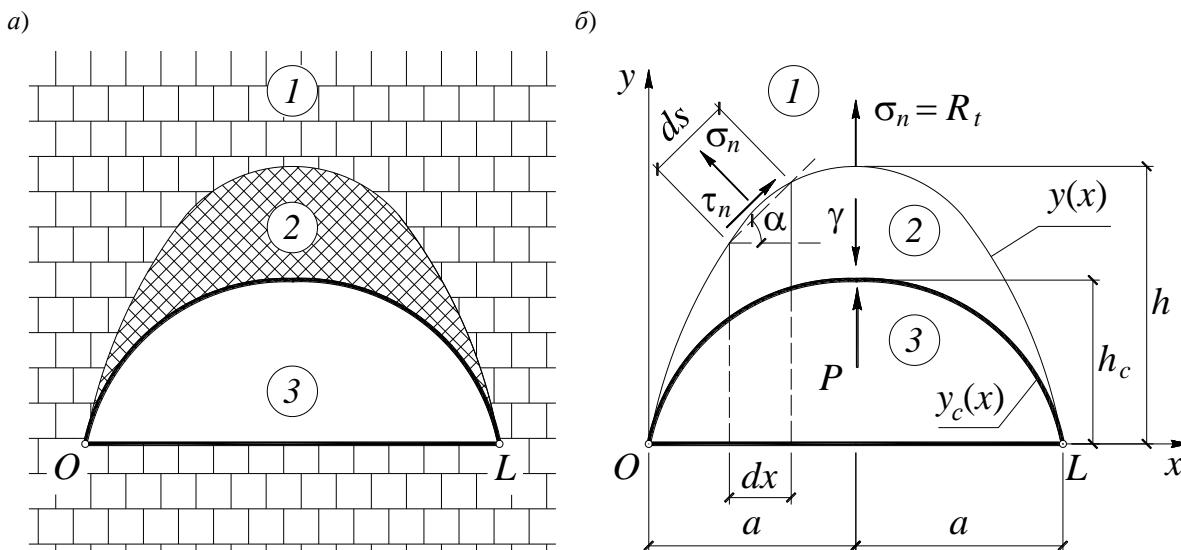


Рис. 4. К постановке задачи о свodoобразовании над криволинейными конструкциями:
а – общий вид подземного сооружения (калотты); б – расчетная схема;
1 – вмещающий массив; 2 – свод обрушения; 3 – подземное сооружение или калотта

Ранее в работе [15] авторами настоящей статьи был сделан обстоятельный анализ соотношения величин высоты свода обрушения, рассчитанных по действующим нормам, по шкале М. М. Протодьяконова и по полученным в [12] решениям, которые были рассмотрены и в этой работе [см. уравнения (23)]. Положив во втором из уравнений (23) $x = a$, получим формулу для расчета высоты свода обрушения

$$h = \frac{R_t}{\gamma} \left(\frac{\gamma a}{C_0} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (29)$$

которая остается неизменной и при наличии калотты.

Основываясь на выводах, сделанных в работе [15], для практических целей можно рекомендовать следующую формулу:

$$h = \frac{\gamma_k}{\alpha} \frac{R_t}{\gamma} \left(\frac{\gamma a}{C_0} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (30)$$

где γ_k – коэффициент надежности; α – коэффициент, учитывающий трещиноватость [см. пояснение к формуле (3)].

Для коэффициента γ_k были предложены следующие зависимости [15]:

- $\gamma_k = 0,005R_c + 2$ при длине пролета свода обрушения l до 15 м;
- $\gamma_k = 0,0025R_c + 1,5$ при длине пролета свода обрушения l выше 15 м.

Рекомендуемые в [15] значения коэффициента α даны в таблице.

Сделав эти предварительные замечания, перейдем непосредственно к практическим рекомендациям по расчету давления грунта на криволинейные конструкции и крепь калотты.

В принципе, для сбора вертикальных нагрузок от горного давления можно было бы воспользоваться полученной выше формулой для P . Однако и с точки зрения безопасности,

и с точки зрения устоявшихся приемов, принятых в практических расчетах и проектировании, правильнее рекомендовать определять нагрузку на крепь калотты как нагрузку от полного веса свода обрушения (поз. 2 на рис. 4), заключенного между линиями $y(x) \cdot \gamma_k / \alpha$ и $y_c(x)$, т. е. без учета сил сопротивления по границе свода обрушения. Вертикальное давление на временную крепь калотты или криволинейную конструкцию подземного сооружения будет вычисляться по формуле (1) с заменой h на разность высоты свода обрушения h с учетом коэффициентов γ_k и α и высоты калотты h_c (см. обозначения на рис. 4, б):

$$p = \gamma(h - h_c). \quad (31)$$

В случае если $h_c > h$, следует переходить к стандартной схеме сбора нагрузок (см. рис. 1). При этом размеры b и h_t становятся габаритными размерами калотты, параметры свода обрушения можно рекомендовать определять по полученным здесь решениям (с учетом коэффициентов γ_k и α), а вместо кажущегося угла внутреннего трения ϕ_k использовать угол ϕ_0 (см. рис. 3, б).

Выводы

Получено решение задачи о своде обрушения над калоттой в скальных грунтах в рамках схемы Риттера – Стакнёва методами вариационного исчисления. В качестве прочностных характеристик грунта использованы параметры паспорта прочности вместо коэффициента крепости.

Показано, что наличие калотты не влияет на очертание свода обрушения, но снижает нагрузку на подземные конструкции.

Разработана практическая методика расчета вертикального давления грунта на крепь калотты и на подземные конструкции криволинейного очертания.

Коэффициенты α , учитывающие влияние трещиноватости [15]

Категория массива скальных грунтов по степени трещиноватости	Предел прочности грунта «в куске» на сжатие, МПа				
	10	20	40	80	160
I – практически нетрещиноватые	1	1	1	1	1
II – малотрещиноватые	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8
III – среднетрещиноватые	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5
IV – сильнотрещиноватые	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3
V – раздробленные (разборная скала)	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1

Список источников

1. СП 120.13330.2022. Метрополитены : актуализированная редакция СНиП 32-02-2003. Москва : Минрегион России, 2022. 302 с.
2. СП 122.13330.2023. Тоннели железнодорожные и автодорожные : актуализированная редакция СНиП 32-04-97. Москва : Минрегион России, 2023. 101 с.
3. СП 102.13330.2012. Туннели гидротехнические : актуализированная редакция СНиП 2.06.09-84. Москва : Минрегион России, 2012. 52 с.
4. Протодьяконов М. М. Давление горных пород на рудничную крепь // Горный журнал. 1909. № 8. С. 80–91.
5. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов. Москва : Недра, 1980. 360 с.
6. Зерцалов М. Г. Механика грунтов (введение в механику скальных оснований) : учебник для вузов. Москва : АСВ, 2006. 364 с.
7. СНиП II-44-78. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Москва : Госстрой СССР, 1978. 23 с.
8. ГОСТ 21153.1-75. Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протодьяконову. Москва : Издательство стандартов, 1975. 3 с.
9. Баклашов И. В., Агеенко В. А. Разработка теории и моделирование процессов сводообразования в окрестности горизонтальной выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва, 2015. Вып. 12. С. 5–7.
10. Ritter W. Die Statik der Tunnelgewölde. Berlin, 1879. 66 p.
11. Стахнёв Я. О. Методика определения нагрузки от горного давления на подземные сооружения при сводообразовании в зависимости от прочности грунтов : специальность 2.1.2 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Стахнёв Ярослав Олегович. Санкт-Петербург, 2023. 152 с.
12. Макарова В. С., Королев К. В., Кузнецов А. О. Решение задачи о сводообразовании в скальных грунтах методом вариационного исчисления // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 2. С. 2–8. EDN CKGAHB.
13. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. Москва : Издательство стандартов, 1988. 17 с.
14. Эльстогольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. Москва : Наука, 1969. 424 с.
15. Статическое решение задачи о предельном равновесии свода обрушения в скальных грунтах / К. В. Королев, А. О. Кузнецов, Т. В. Иванова, В. С. Макарова // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники имени Б. Е. Веденеева. 2024. Т. 313. С. 90–105. EDN SHGDWE.

References

1. SP 120.13330.2022. Metropolitans. Updated edition of SNiP 32-02-2003. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2022. 302 p. (In Russ.).
2. SP 122.13330.2023. Railway and highway tunnels. Updated edition of SNiP 32-04-97. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2023. 101 p. (In Russ.).
3. SP 102.13330.2012. Hydrotechnical tunnels. Updated edition of SNiP 2.06.09-84. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2012. 52 p. (In Russ.).
4. Protodyakonov M. M. Rock pressure on the mine support. *Mining Journal*. 1909;(8):80–91. (In Russ.).
5. Borisov A. A. Mechanics of rocks and massifs. Moscow: Nedra; 1980. 360 p. (In Russ.).
6. Zertsalov M. G. Mechanics of soils (introduction to mechanics of rock foundations): textbook for universities. Moscow: ASV; 2006. 364 p. (In Russ.).
7. SNiP II-44-78. Railway and highway tunnels. Moscow: Gosstroy of the USSR; 1978. 23 p. (In Russ.).
8. GOST 21153.1-75. Rocks. Method of determination coefficient of strength according to Protodyakonov. Moscow: Standards Publishing House; 1975. 3 p. (In Russ.).
9. Baklashov I. V., Aageenko V. A. Theory development and modeling vaulting processes in the vicinity of a horizontal excavation. *Mining Information-Analytical Bulletin*. Moscow; 2015. Issue 12. P. 5–7. (In Russ.).
10. Ritter W. The statics of tunnel vaults. Berlin; 1879. 66 p.
11. Stakhnyov Ya. O. Methodology for determining the load from rock pressure on underground constructions at vaulting depending on the strength of soils. Specialty 2.1.2 Foundations and foundations, underground constructions: thesis for the degree of Candidate of Engineering. Saint Petersburg; 2023. 152 p. (In Russ.).
12. Makarova V. S., Korolev K. V., Kuznetsov A. O. Solution of the Problem of Vaulting in Rocky Soils by Method of Variational Calculus. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024;61(2):91–98. (In Russ.). DOI 10.1007/s11204-024-09948-w.

13. GOST 21153.8–88. Rocks of rock. Method for determining of strength in volumetric compression. Moscow: Standards Publishing House; 1988. 17 p. (In Russ.).
14. Elsholtz L. E. Differential equations and variational calculus. Moscow: Nauka; 1969. 424 p. (In Russ.).
15. Korolev K. V., Kuznetsov A. O., Ivanova T. V., Makarova V. S. Static Solution of the Problem of Limit Equilibrium of a Collapse Vault in Rocky Soils. *Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneyev*. 2024;313:90–105. (In Russ.).

Информация об авторах

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

В. С. Макарова – аспирант, преподаватель кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

А. О. Кузнецов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

А. М. Карапулов – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

K. V. Korolev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department.

V. S. Makarova – Postgraduate, Lecturer of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department.

A. O. Kuznetsov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department.

A. M. Karaulov – Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Geotechnics, Tunnels and Subways Department.

Статья поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена после рецензирования 16.01.2025; принята к публикации 31.01.2025.

The article was submitted 09.01.2025; approved after reviewing 16.01.2025; accepted for publication 31.01.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья
УДК 625.142.44:691.328
doi 10.52170/1815-9265_2025_73_87

Исследование несущей способности, трещиностойкости и выносливости железобетонных шпал ШЗ-Д 4×10 и ШЗ-ДПГ 4×10

Наталья Сергеевна Пичкурова

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, nataliapich@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты исследований несущей способности, трещиностойкости и выносливости железобетонных шпал со стержневым армированием, которые изготовлены по итальянской автоматизированной технологии OLMI. Рассчитаны два типа шпал: ШЗ-Д 4×10 и ШЗ-ДПГ 4×10. Шпалы ШЗ-ДПГ 4×10 отличаются от шпал ШЗ-Д 4×10 дополнительным косвенным армированием в торцевой части сечения в виде спиралей на концах арматуры и зачеканенными бетонным раствором торцевыми отверстиями. При этом класс бетона по прочности на сжатие у шпал ШЗ-Д 4×10 принят не менее В55, а у шпал ШЗ-ДПГ 4×10 – не менее В60.

Расчет несущей способности выполнен согласно методу расчета изгибающихся элементов любых форм сечений, направлений действия внешнего момента и любом армировании по общему случаю расчета нормальных сечений изгибающихся элементов. Специфика работы железобетонных шпал под нагрузкой требует обязательного расчета на трещиностойкость и выносливость, поскольку воздействие на шпалу многократно повторяющейся нагрузки вызывает значительный перепад напряжений в бетоне или в растянутой арматуре при большом числе циклов в течение эксплуатационного периода.

По результатам проведенных расчетов определено, что увеличение класса бетона по прочности на сжатие с В55 до В60 практически не влияет на трещиностойкость и несущую способность, а значит не приведет к уменьшению дефектности железобетонных шпал со стержневым армированием на грузонапряженных участках Среднесибирской магистрали.

Ключевые слова: железнодорожный путь, шпала со стержневой арматурой, дефекты, несущая способность, трещиностойкость, выносливость

Для цитирования: Пичкурова Н. С. Исследование несущей способности, трещиностойкости и выносливости железобетонных шпал ШЗ-Д 4×10 и ШЗ-ДПГ 4×10 // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 87–94. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_87.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Investigation of the bearing capacity, crack resistance and endurance of reinforced concrete sleepers SH3-D 4×10 and SH3-DPG 4×10

Natalia S. Pichkurova

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, nataliapich@mail.ru

Abstract. The article presents the results of research on the bearing capacity, crack resistance and endurance of reinforced concrete sleepers with rod reinforcement, which are manufactured using the Italian automated OLMI technology. Two types of sleepers are calculated SH3-D 4×10 and SH3-DPG 4×10. SH3-DPG 4×10 sleepers differ from SH3-D 4×10 sleepers by additional indirect reinforcement in the end section in the form of spirals at the ends of the reinforcement and end holes minted with concrete mortar. At the same time, the concrete compressive strength class for SH3-D 4×10 sleepers is assumed to be at least B55, and for SH3-DPG 4×10 sleepers it is assumed to be at least B60.

The load-bearing capacity calculation is performed according to the method of calculating bent elements of any shape of cross-sections, directions of action of the external moment and any reinforcement in the general case of calculating normal sections of bent elements. The specifics of the operation of iron-concrete sleepers under load require mandatory calculation of crack resistance and endurance, since the impact of multiple repetitive loads on the sleeper causes a significant stress drop in concrete or in stretched reinforcement with a large number of cycles during the operating period.

Based on the results of the calculations, it was found that an increase in the concrete class in compressive strength from B55 to B60 has practically no effect on crack resistance and bearing capacity, which means it will not

lead to a decrease in the defects of reinforced concrete sleepers with core reinforcement on load-stressed sections of the Central Siberian Railway.

Keywords: railway track, sleeper with rod reinforcement, defects, bearing capacity, crack resistance, endurance

For citation: Pichkurova N. S. Investigation of the bearing capacity, crack resistance and endurance of reinforced concrete sleepers SH3-D 4×10 and SH3-DPG 4×10. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2025;(73):87–94. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_87.

Введение

Переориентация потоков перевозимых железнодорожным транспортом грузов с запада на восток поставила задачу перехода к промышленной эксплуатации поездов, сформированных из вагонов с осевыми нагрузками 265 кН/ось (27 тс/ось), а в дальнейшем – 294 кН/ось (30 тс/ось). Это позволит разгрузить железнодорожную инфраструктуру и увеличить провозную способность на сети ОАО «РЖД». Однако введение в эксплуатацию грузовых поездов, сформированных из вагонов с повышенными осевыми нагрузками на ось колеса, приводит к увеличению динамических воздействий на верхнее строение пути, в частности на железобетонные шпалы, которые находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии (НДС) и должны обладать высокой прочностью, выносливостью и трещиностойкостью.

В соответствии со стратегией развития железнодорожного транспорта в России было принято решение о применении на железных дорогах, помимо струнобетонных шпал, эксплуатирующихся на железной дороге с 50-х гг. XX в., железобетонных шпал со стержневым армированием, изготовленных по итальянской технологии OLMI [1–4]. Для новой линии специалисты АО «ВНИИЖТ» разработали конструктив-

ное решение шпалы, которая армирована четырьмя стержнями высокопрочной арматуры класса A1400K диаметром 9,6 мм [5]. Однако опыт эксплуатации таких шпал на Среднесибирской магистрали с высокой грузонапряженностью пути показал их несоответствие перспективным эксплуатационным требованиям, в том числе межремонтному периоду в 2,5 млрд т, из-за большого уровня дефектов и отказов, требующих дополнительных затрат на текущее содержание и промежуточные ремонты пути [6, 7].

Общая картина дефектов железобетонных шпал со стержневой арматурой ШЗ-Д 4×10 показана на рис. 1, 2.

В целях снижения выхода дефектных железобетонных шпал ШЗ-Д 4×10 специалисты АО «БЭТ» предложили решение с дополнительным армированием торцевой части спиральюми на концах арматуры и зачеканенным бетонным раствором торцевыми отверстиями (тип ШЗ-ДПГ 4×10). При этом класс бетона по прочности на сжатие увеличен с В55 до В60 [1, 8].

Исследования несущей способности железобетонных шпал ШЗ-Д 4×10 для классов бетона по прочности на сжатие В40 и В55 приведены в работе [9]. В данном исследовании изложены результаты расчетов прочности, трещиностойкости и выносливости железобе-



Рис. 1. Разрушение бетона шпалы со стержневым армированием



Рис. 2. Разрушение шпалы в подрельсовом сечении

тонных шпал ШЗ-Д 4×10 и ШЗ-ДПГ 4×10 и сделаны соответствующие выводы о целесообразности увеличения класса бетона.

Материалы и методы исследования

Геометрические характеристики подрельсового и среднего сечений железобетонных шпал со стержневым армированием показаны на рис. 3.

Расчет прочности железобетонных шпал выполнен по общему случаю расчета нормальных сечений согласно условию

$$M \leq R_b S_b - \sum_{i=1}^n \sigma_{si} S_{si}, \quad (1)$$

где M – проекция момента внешних сил на плоскость, перпендикулярную прямой, ограничивающей сжатую зону сечения; R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию; S_b – статический момент площади сечения бетона относи-

тельно оси, параллельной прямой, ограничивающей сжатую зону и проходящей через центр тяжести сечения наиболее растянутого стержня; σ_{si} – напряжение в i -м стержне продольной арматуры; S_{si} – статический момент площади сечения i -го стержня продольной арматуры относительно указанной оси.

Напряжения в арматурных элементах, в зависимости от относительной высоты сжатой зоны, определены по следующим формулам:

– при $\xi_i \leq \xi_{R,i}$

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

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

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

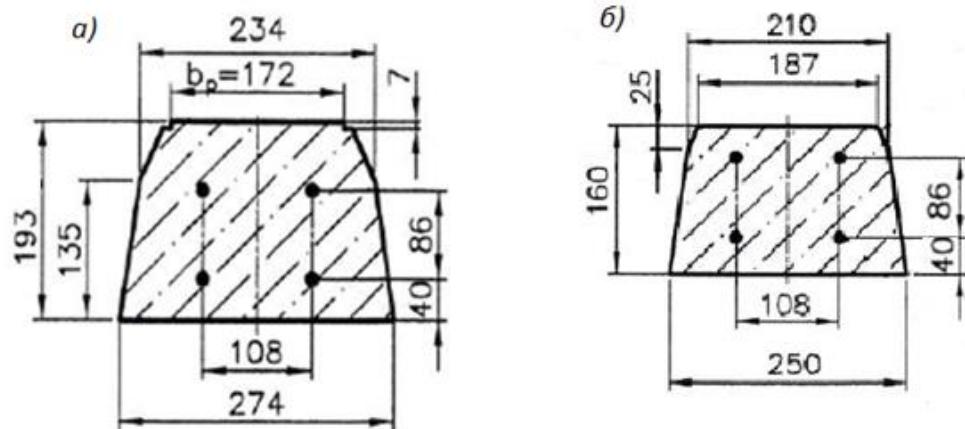


Рис. 3. Геометрические характеристики подрельсового (а) и среднего (б) сечений шпалы ШЗ-Д 4×10 и ШЗ-ДПГ 4×10

– при $\xi_i > \xi_{el,i}$

$$\sigma_{si} = \frac{\sigma_{sc,u}}{1 - 0,91\omega} \left(\frac{\omega}{\xi_i} - 1 \right) + \sigma_{spi}, \quad (4)$$

где $\eta = 1$ – коэффициент, учитывающий класс арматуры (п. 3.7 [10]); ξ_i – относительная высота сжатой зоны, равная x/h_0 ; $\xi_{R,i}$ – граничная относительная высота сжатой зоны при достижении в рассматриваемом арматурном элементе напряжений, равных R_s ; $\beta = 0,8$ – коэффициент, зависящий от способа натяжения арматуры (п. 3.18 [10]); $\xi_{el,i}$ – относительная высота сжатой зоны при достижении в рассматриваемом арматурном элементе напряжений, равных βR_s ; $\sigma_{sc,u} = 400$ МПа – предельное напряжение в арматуре сжатой зоны; $\omega = 0,85 - 0,08R_b$ – коэффициент полноты эпюры напряжений (формула (22) [10]); σ_{spi} – величина начального напряжения за вычетом всех потерь с учетом расположения арматурных элементов по сечению (пп. 1.18, 3.18 [10]).

Граничная относительная высота сжатой зоны определена согласно [10] по следующей формуле:

$$\xi_R = \omega \sqrt{\left[1 + \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{sc,u}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1} \right) \right]}, \quad (5)$$

где $\sigma_{sr} = R_s + 400 - \sigma_{sp}$ – это условное напряжение, которое при выполнении закона Гука соответствует граничной высоте сжатой зоны.

Расчет трещиностойкости выполнен по условию

$$M_{crc} = R_{bt,n} W_{red} + P_{(2)} (e_{op} + r), \quad (6)$$

где $R_{bt,n}$ – нормативное сопротивление бетона растяжению (табл. 6.7 СП 63.13330.2018); W_{red} – момент сопротивления приведенного сечения по нижней грани; $P_{(2)}$ – усилие обжатия с учетом полных потерь; e_{op} – эксцентриситет усилия P относительно центра тяжести приведенного сечения $e_{op} = y_{red} - y_{sp}$; r – расстояние от центра тяжести приведенного сечения до ядерной точки.

Усилие обжатия с учетом полных потерь составляет

$$P_{(2)} = (\sigma_{sp} - \Delta\sigma_{sp(2)}) A_{sp}, \quad (7)$$

где A_{sp} – площадь напрягаемой арматуры, мм^2 .

Величина r определяется как

$$r = \frac{W_{red}}{A_{red}}. \quad (8)$$

Потери предварительного напряжения в арматуре определены согласно СП 63.13330.2018 при натяжении на упоры механическим способом при величине начального напряжения $\sigma_{sp} = 1185,28$ МПа [8].

При воздействии на шпалу многократно повторяющейся нагрузки необходимо провести расчет на выносливость.

Для сжатого бетона расчет на выносливость выполняют по формуле

$$\sigma_{b \max} \leq R_b, \quad (9)$$

где $\sigma_{b \ max}$ – максимальное нормальное напряжение в сжатом бетоне; R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию, принимаемое по табл. 6.9 СП 63.13330.2018 с учетом коэффициента условия работы γ_{b1} в зависимости от коэффициента асимметрии цикла ρ_b .

Для растянутой арматуры расчет выполняют по следующей формуле:

$$\sigma_{s \ max} \leq R_s, \quad (10)$$

где $\sigma_{s \ max}$ – максимальное напряжение в растянутой арматуре; R_s – расчетное сопротивление растянутой арматуры с учетом коэффициента условия работы γ_{s3} по табл. 36 [10] в зависимости от коэффициента асимметрии цикла ρ_s .

Если в формулах (9) и (10) принять, что $\sigma_{b \ max} = \gamma_{b1} R_b$ и $\sigma_{s \ max} = \gamma_{s3} R_s$, то можно определить значения изгибающих моментов по выносливости шпалы в сжатом бетоне M_b и растянутой арматуре M_s .

Для сжатого бетона предельный момент по выносливости равен:

$$M_b = \frac{J_{red}}{y_{red}} (\gamma_{b1} R_b - \sigma_{bp}). \quad (11)$$

Коэффициент асимметрии цикла составляет:

$$\rho_b = \frac{\sigma_{bp}}{\gamma_{b1} R_b}. \quad (12)$$

Для растянутой арматуры предельный момент по выносливости определяется как

$$M_s = \frac{1}{\alpha'} \frac{J_{red}}{y_{sp}} (\gamma_{s3} R_s - \sigma_{sp2}), \quad (13)$$

где y_{sp} – расстояние от центра тяжести приведенного сечения шпалы до центра тяжести наиболее удаленного ряда (стержня) арматуры; $\alpha' = 10$ – коэффициент приведения при расчете на выносливости (табл. 34 [10]); $\sigma_{sp2} = \sigma_{sp} - \Delta\sigma_{sp(2)} - \alpha' \sigma_{bp}$ – установленвшееся напряжение в арматуре.

Коэффициент асимметрии цикла равен:

$$\rho_s = \frac{\sigma_{sp2}}{\gamma_{s3} R_s}. \quad (14)$$

Величины γ_{b1} и γ_{s3} определяют подбором и интерполяцией по табл. 35 и 36 [10] до тех пор, пока значения ρ_b и ρ_s , соответствующие по этим таблицам γ_{b1} и γ_{s3} , не совпадут со значениями, определенными по формулам (12) и (14).

Результаты исследования

В табл. 1 приведены геометрические характеристики подрельсового и среднего сечения (см. рис. 3).

В первом приближении значение высоты сжатой зоны x принято при среднем напряжении в арматуре $0,9R_s$, т. е. $\sum_{i=1}^n \sigma_{si} = 1102,50$ МПа.

Результаты расчета сведены в табл. 2.

Для определения несущей способности шпалы статический момент сжатой зоны бетона

в виде трапеции относительно нижнего ряда арматуры определен по следующей формуле:

$$S_b = 0,5 \left[b_1 x \left(h_{01} - \frac{1}{3}x \right) + b_2 \left(h_{01} - \frac{2}{3}x \right) \right], \quad (15)$$

где $b_1 = 204,80$ мм, $b_2 = 204,8 + 2 \cdot 0,5 \frac{274 - 204,8}{193} x$ – размеры оснований трапеции для подрельсовой части; $b_1 = 250$ мм, $b_2 = 250 - 2 \cdot 0,5 \frac{250 - 200,16}{160} x$ – размеры оснований трапеции для средней части.

Несущая способность шпалы определена по формуле (1), момент трещиностойкости – по формуле (6). Результаты расчета несущей способности и трещиностойкости шпал сведены в табл. 3.

Геометрические характеристики приведенного сечения, определенные при коэффициенте приведения $\alpha' = 10$, для расчета на выносли-

Таблица 1

Геометрические характеристики приведенного сечения

Класс бетона	Приведенная площадь сечения A_{red} , см^2	Статический момент приведенного сечения относительно нижней грани S_{red} , см^3	Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до растянутой грани y_{red} , см	Момент инерции относительно центра тяжести сечения J_{red} , см^4	Момент сопротивления приведенного сечения W_{red} , см^3
<i>Подрельсовое сечение</i>					
B55	478,34	4 325,85	9,04	13 393,92	1 481,07
B60	478,12	4 323,97		13 390,78	1 480,67
<i>Среднее сечение</i>					
B55	376,43	2 345,39	6,24	6 341,83	1 017,85
B60	376,20	2 343,65		6 336,94	1 017,20

Таблица 2

Результаты расчета усилий в арматурных стержнях шпалы

Класс бетона	Рабочая высота i -го слоя h_0 , мм	Относительная высота сжатой зоны $\xi_i = \frac{x}{h_0}$	Напряжение в арматурном ряду σ_{si} , МПа	Усилие в арматурном ряду $\sigma_{si} A_{si}$, Н	Статический момент инерции площади сечения стержней в ряду $\sigma_{si} A_{si} (h_{01} - h_{0i})$, Н·мм
<i>Подрельсовое сечение</i>					
B55	153	0,286	1 225,00	177 246,72	0,00
	67	0,653	695,33	100 608,68	8 652 346,34
<i>Суммарные значения</i>					
B60	153	0,265	1 225,00	177 246,72	0,00
	67	0,605	728,45	105 400,83	9 064 471,23
<i>Суммарные значения</i>					
<i>Среднее сечение</i>					
B55	126	0,306	1 225,00	177 246,72	0,00
	40	0,964	423,95	61 341,70	5 275 385,86
<i>Суммарные значения</i>					
B60	126	0,285	1 225,00	177 246,72	0,00
	40	0,897	458,68	66 367,18	5 707 577,75
<i>Суммарные значения</i>					

Примечание. Площадь сечения 1-го и 2-го ряда стержней A_{si} равна $144,69 \text{ мм}^2$.

Таблица 3

Результаты расчета несущей способности и трещиностойкости шпал

Класс бетона	Площадь сжатого бетона A_b , мм^2	Статический момент сжатой зоны бетона S_b , мм^3	Несущая способность сечения M_{ult} , $\text{kH}\cdot\text{м}$	Момент трещинообразования M_{crc} , $\text{kH}\cdot\text{м}$
<i>Подрельсовое сечение</i>				
B55	9 261,85	$1,22 \cdot 10^6$	27,85	12,20
B60	8 565,08	$1,14 \cdot 10^6$	28,53	12,38
<i>Среднее сечение</i>				
B55	7 952,95	$1,01 \cdot 10^6$	24,90	12,10
B60	7 382,24	$0,95 \cdot 10^6$	25,60	12,24

Таблица 4

Геометрические характеристики приведенного сечения при расчете на выносливость

Сечение	Приведенная площадь сечения A_{red} , см^2	Статический момент приведенного сечения относительно нижней грани S_{red} , см^3	Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до растянутой грани y_{red} , см	Момент инерции относительно центра тяжести сечения J_{red} , см^4
Подрельсовое	490,98	4 430,72	9,02	13 570,45
Среднее	389,06	2 442,68	6,28	6 613,67

Таблица 5

Результаты расчета на выносливость

Класс бетона	Напряжение в бетоне при обжатии σ_{bp} , МПа	Коэффициент асимметрии цикла для бетона ρ_b	Коэффициент условия работы бетона γ_{b1}	Выносливость сжатого бетона M_b , $\text{kH}\cdot\text{м}$	Напряжение в арматуре с учетом полных потерь σ_{sp2} , МПа	Коэффициент асимметрии цикла для арматуры ρ_s	Коэффициент условия работы арматуры γ_{s3}	Выносливость растянутой арматуры M_s , $\text{kH}\cdot\text{м}$
<i>Подрельсовое сечение</i>								
B55	3,57	0,15	0,775	29,59	781,66	0,776	0,822	60,85
B60	3,58	0,14	0,770	32,83	783,26	0,777	0,823	60,75
<i>Среднее сечение</i>								
B55	1,00	0,1	0,750	22,65	755,05	0,800	0,770	32,95
B60	1,01			25,01	756,64			32,67

вость обоих сечений сведены в табл. 4. Результаты расчета на выносливость [формулы (11) – (14)] сведены в табл. 5.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 3 и 5, представлены для наглядности на рис. 4 в виде гистограмм.

Выводы

По результатам выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Несущая способность железобетонной шпалы при изменении класса бетона по прочности на сжатие с B55 до B60 увеличивается незначительно: на 2,3 % в подрельсовом сечении и на 2,7 % в среднем сечении.

2. Момент трещиностойкости при изменении класса бетона по прочности на сжатие с B55 до B60 практически не изменяется (разница менее 1,5 % для обоих сечений). Таким образом, хрупкое разрушение бетона в процессе действия эксплуатационных нагрузок циклического характера сохраняется.

3. Выносливость сжатого бетона при изменении класса бетона по прочности на сжатие с B55 до B60 увеличивается на 9,9 % в подрельсовом сечении и на 9,4 % в среднем сечении.

4. Выносливость растянутой арматуры при изменении класса бетона по прочности на сжатие с B55 до B60 практически не меняется.

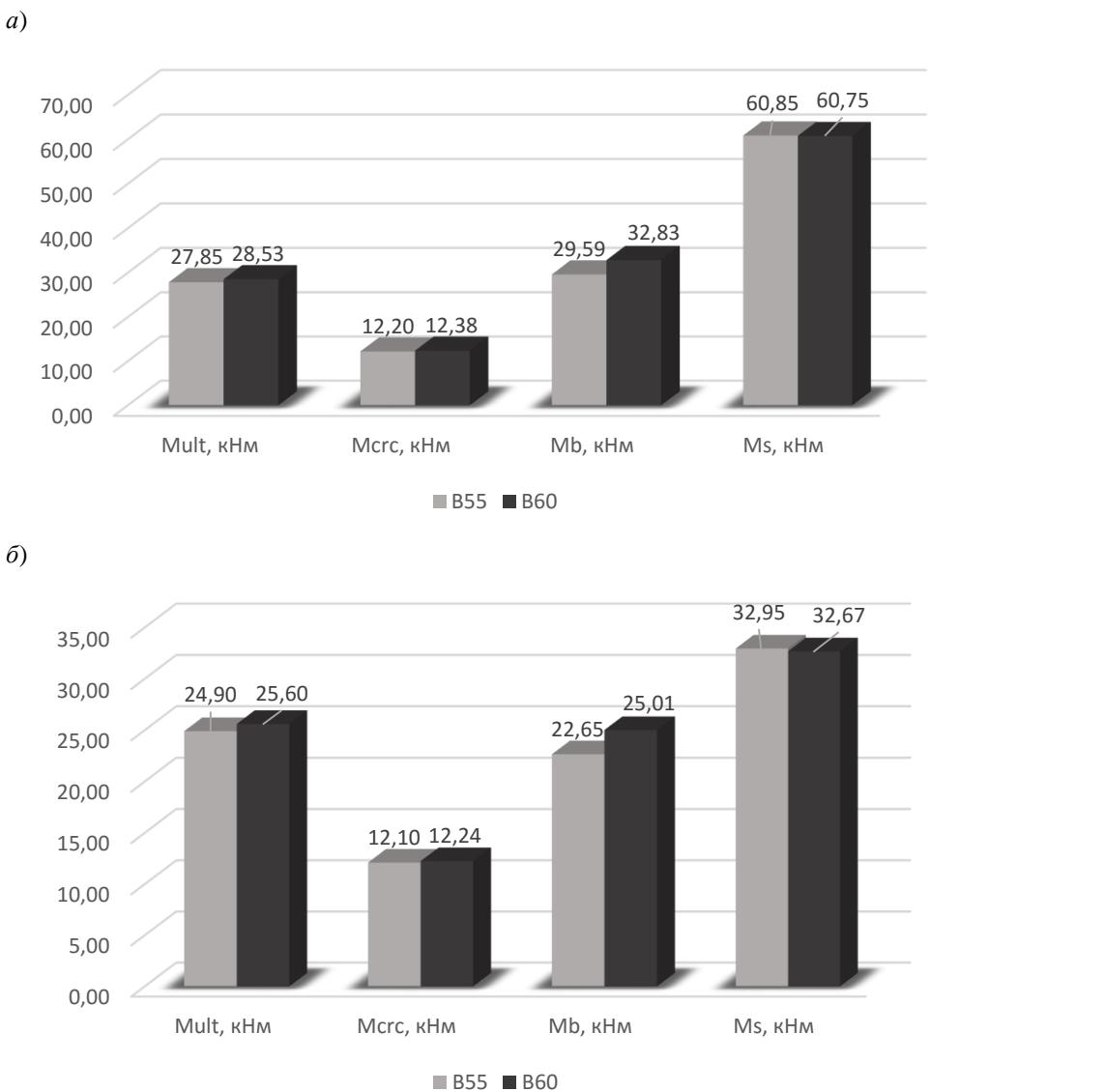


Рис. 4. Гистограмма результатов расчета несущей способности, трещиностойкости и выносливости:
а – в подрельсовом сечении; б – в среднем сечении

Таким образом, для уменьшения количества отказов и дефектности железобетонных шпал со стержневым армированием на грузонапряженных участках железнодорожного пути необходимо

димо принципиальное изменение их конструктивного решения, в частности изменение числа арматурных стержней и их равномерное расположение по всему сечению шпалы.

Список источников

- Гнездилов С. А., Лебедев А. В., Простаков К. А. Исследование работы железобетонных шпал ШЗ-ДПГ 4×10 // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 4. С. 20–25.
- Голубчик Э. М., Корчунов А. Г., Коломиец Б. А. Освоение технологии производства высокопрочной арматуры для железобетонных шпал нового поколения // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5 (38). С. 127–133.
- Лебедев В. Н. Опыт освоения производства высокопрочной стабилизированной арматуры для железобетонных шпал нового поколения // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2010. № 2. С. 74–76.
- Пичкурова Н. С., Левина О. В., Омельченко А. К. Конструктивные решения железобетонных шпал в России // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2024. № 3 (14). С. 87–94.
- ТУ 5864-244-01124323-2007. Шпалы железобетонные типа III для нераздельного рельсового скрепления с резьбовым прикреплением рельса к шпале (подтип ШЗ-Д 4×10). Технические условия. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

6. Анализ отказов железобетонных шпал в эксплуатационных условиях Транссибирской магистрали / Н. Н. Лукинова, А. Э. Малинина, А. А. Севостьянов, Д. В. Величко // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России (ТрансПромЭк-2019) : труды международной научно-практической конференции : 90-летию Ростовского государственного университета путей сообщения посвящается, Ростов-на-Дону, 24–26 октября 2019 года. Том 1. Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. С. 238–241. EDN KQFOLJ.

7. Величко Д. В., Севостьянов А. А., Карюкин М. А. Анализ отказов железобетонных шпал в условиях Транссибирской и Среднесибирской магистралей : отчет о научно-исследовательской работе. Тема № 2021-004. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2022. 95 с.

8. Инструкция по ведению шпального хозяйства с железобетонными шпалами : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 22.08.2022 № 2183/р. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

9. 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.

10. Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов (к СНиП 2.03.01-84). Часть I / ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1988. 192 с.

References

1. Gnezdilov S. A., Lebedev A. V., Prostakov K. A. Investigation of the work of reinforced concrete sleepers Sh3-DPG 4×10. *Track and Track Facilities*. 2023;(4):20–25. (In Russ.).
2. Golubchik E. M., Korchunov A. G., Kolomiets B. A. Mastering the technology of manufacturing high-precision reinforcement for new-generation reinforced concrete sleepers. *Proceedings of the Southwestern State University*. 2011;(38):127–133. (In Russ.).
3. Lebedev V. N. Experience of mastering the production of high-strength stabilized reinforcement for reinforced concrete sleepers of a new generation. *Bulletin of the Moscow State Technical University named after G. I. Nosov*. 2010;(2):74–76. (In Russ.).
4. Pichkurova N. S., Levina O. V., Omelchenko A. K. Structural and technological solutions of reinforced concrete sleepers in Russia. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2024;(14):87–94. (In Russ.).
5. TS 5864-244-01124323–2007. Reinforced concrete sleepers of type III for continuous rail fastening with threaded rail attachment to the sleeper (subtype SH3-D 4×10). Technical specifications. (In Russ.). URL: www.consultant.ru.
6. Lukinova N. N., Malinina A. E., Sevostyanov A. A., Velichko D. V. Analysis of failures of reinforced concrete sleepers in operating conditions of the Trans-Siberian Railway. *Actual problems and prospects of development of transport, industry and economy of Russia (TransPromEk-2019). Proceedings of the international scientific and practical conference: 90th anniversary of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, 24–26 October 2019. Volume 1*. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University; 2019. P. 238–241. (In Russ.).
7. Velichko D. V., Sevostyanov A. A., Karyukin M. A. Failure analysis of reinforced concrete sleepers in the conditions of Trans-Siberian and Central Siberian Railways. Research report. Subject No. 2021-004. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Transport University; 2022. 95 p. (In Russ.).
8. Instructions for maintaining a sleeper farm with reinforced concrete sleepers. Approved by the order of Russian Railways dated 22.08.2022 No. 2183/R. (In Russ.). URL: www.consultant.ru.
9. Pichkurova N. S., Vorobyev V. S. Assessment of the bearing capacity of reinforced concrete sleepers during the construction and reconstruction of railway track. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(70):71–78. (In Russ.).
10. Manual on Design of Prestressed Reinforced Concrete Structures of Heavy and Light Concrete (to SNiP 2.03.01-84). Part I. TsNIIpromzdaniye Gosstroy USSR, NIIZhB Gosstroy USSR. Moscow: CITP of the USSR Gosstroy; 1988. 192 p. (In Russ.).

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Статья поступила в редакцию 30.01.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2025; принятая к публикации 14.02.2025.

The article was submitted 30.01.2025; approved after reviewing 10.02.2025; accepted for publication 14.02.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.159.2

doi 10.52170/1815-9265_2025_73_95

Обоснование конструктивных особенностей земляного полотна из дренирующих грунтов в криолитозоне с помощью теплотехнических расчетов

Александр Леонидович Исаков¹, Ирина Сергеевна Моисеева²,
Ирина Николаевна Гудкова^{3✉}

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

¹ mylab.alex@yandex.ru

² goodkova76@yandex.ru

³ is_moiseeva@mail.ru✉

Аннотация. При строительстве транспортных объектов в криолитозоне кардинально нарушается температурный режим многолетнемерзлых грунтов. В процессе эксплуатации Байкало-Амурской магистрали в основании земляного полотна на отдельных участках в районах распространения высокотемпературных мерзлых грунтов образовались так называемые чаши пропаивания. Они представляют собой зоны оттаивания многолетнемерзлых грунтов, расположенные непосредственно под железнодорожными насыпями, даже при соблюдении первого принципа строительства. Главным образом это касается насыпей, сложенных дренирующими грунтами. В этом случае формированию таких чащ в первую очередь способствует инфильтрация атмосферных осадков в тело земляного полотна. Расчетным путем оценить эффект от влияния атмосферных осадков на отепляющий эффект основания земляного полотна весьма проблематично в связи с хаотическим характером фильтрационных процессов, происходящих в теле земляного полотна.

В данной работе сделана попытка использования нетрадиционного подхода к решению этой проблемы, а именно предложено ввести поправку к летним значениям коэффициента теплопроводности, учитывающую теплообмен фильтрующихся теплых атмосферных вод с твердыми частицами дренирующего грунта. Для определения данной оправки был использован эмпирический подход. Он заключается в коррекции коэффициента теплопроводности в процессе численных расчетов с ориентацией на реальную глубину верхней границы многолетней мерзлоты под насыпью, полученную при инженерно-геологических изысканиях. Подобранный таким образом коэффициент теплопроводности можно использовать для дальнейших расчетов в схожих условиях.

С помощью предложенного подхода обоснована эффективная конструкция насыпи из дренирующих грунтов. Также показано, что использование такого приема для предотвращения деградации грунтов основания насыпи является эффективным при строительстве земляного полотна под вторые пути в криолитозоне.

Ключевые слова: земляное полотно, оттаивание многолетнемерзлых грунтов, коэффициент теплопроводности, конструкция вторых путей, инфильтрация атмосферных осадков

Для цитирования: Исаков А. Л., Моисеева И. С., Гудкова И. Н. Обоснование конструктивных особенностей земляного полотна из дренирующих грунтов в криолитозоне с помощью теплотехнических расчетов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 95–103. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_95.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Justification of the subgrade design features from draining soils in the cryolithic zone using heat engineering calculations

Alexander L. Isakov¹, Irina S. Moiseeva², Irina N. Gudkova^{3✉}

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

¹ mylab.alex@yandex.ru

² goodkova76@yandex.ru

³ is_moiseeva@mail.ru✉

Abstract. During the construction of transportation facilities in the cryolithozone, the temperature regime of permafrost soils is radically disturbed. During the operation of the Baikal-Amur Mainline for several decades, the so-called thawing bowls were formed at the base of the subgraid in some sections in the areas of high-temperature

frozen soils. These are zones of thawed perennially frozen ground located directly under railway embankments, even when the first principle of construction is used. This applies mainly to embankments with drainage soils. In this case, the formation of such bowls is primarily promoted by infiltration of atmospheric precipitation into the body of the subgrade. It is very problematic to estimate the effect of precipitation on the warming effect of the subgrade because of the chaotic nature of filtration processes occurring in the body of the subgrade.

In this paper an attempt is made to use a non-traditional approach to solving this problem, namely, it is proposed to introduce a correction to the summer values of the coefficient of thermal conductivity, taking into account the heat exchange of filtered warm atmospheric water with solid particles of the draining soil. To determine the correction to the thermal conductivity coefficient, an empirical approach was used. It consists in correcting the heat conductivity coefficient in the process of numerical calculations, focusing on the real depth of the upper boundary of permafrost under the embankment, obtained during geotechnical surveys. The heat conductivity coefficient thus selected can be used for further calculations under similar conditions.

Using the proposed approach, an effective embankment design from draining soils was justified. It is also shown that the use of such a technique to prevent degradation of the embankment base soils is effective in the construction of the earth bed for the second tracks in the cryolithozone.

Keywords: subgrade, thawing of permafrost soils, construction of additional railways, conductivity coefficient, precipitation infiltration

For citation: Isakov A. L., Moiseeva I. S., Gudkova I. N. Justification of the subgrade design features from draining soils in the cryolithic zone using heat engineering calculations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):95–103. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_95.

Введение

Строительство транспортной инфраструктуры в криолитозоне негативно влияет на температурный режим многолетнемерзлых грунтов и их физико-механические свойства, что впоследствии становится одной из причин наблюдаемых деформаций земляного полотна железных дорог. Факторы, влияющие на деградацию многолетнемерзлых грунтов в основании земляного полотна, можно разделить на две группы [1]:

1) природные:

– климатическое повышение температуры воздуха;

– солнечная радиация;

– отепляющее влияние летних осадков;

– фильтрация воды в основание насыпи;

– повышенная толщина снежного покрова;

2) техногенные:

– нарушение растительно-мохового покрова;

– ориентация трассы относительно частей света;

– состояние откосов и конструкция земляного полотна;

– применяемые для отсыпки насыпи грунты;

– отсутствие водоотводящих мероприятий.

Влияние нарушения растительно-мохового покрова на процесс оттаивания многолетнемерзлых грунтов в основании земляного полотна обусловлено тем, что в зимний период увлажненный мох промерзает и способствует охлаждению подстилающих грунтов, а в летний – плохо проводит тепло за счет обра-

зовавшихся при высыхании пор, т. е. выполняет функцию природного теплового диода.

Дополнительно на процесс оттаивания влияет неудовлетворительное состояние водоотводных сооружений либо их полное отсутствие, из-за чего наблюдается скопление воды в пониженных местах рельефа в непосредственной близости от земляного полотна, которая постепенно проникает в подстилающие грунты и оказывает отепляющий эффект. Неисправные водоотводные сооружения способствуют повышению влажности подстилающих грунтов основания и развитию термокарста.

Если же говорить о глубинных причинах деградации, то их всего две:

– нарушение баланса теплового потока на поверхности земляного полотна;

– отепляющее действие фильтрующейся воды в земляном полотне и его основании.

Для решения проблемы нарушения баланса теплового потока после строительства линейных объектов транспортной инфраструктуры в настоящее время применяются теплотехнические расчеты, результаты которых позволяют прогнозировать температурный режим мерзлых грунтов основания после строительства линейного объекта. Однако такие расчеты не способны решить вопрос, связанный с отепляющим действием фильтрационных потоков.

Материалы и методы исследования

По данным Дальневосточной железной дороги, на 24 % от общей протяженности железнодорожных путей Байкало-Амурской магистрали, расположенных на многолетнемерз-

лых грунтах, наблюдаются осадки земляного полотна из-за оттаивания мерзлых грунтов в основании, а также искажение плана и продольного профиля (рис. 1), расплывание откосов насыпей [2–4].

Результаты инженерно-геологических изысканий (рис. 2), выполненные СГУПС на участке Байкало-Амурской магистрали, расположенным в зоне распространения высокотемпературных

мерзлых грунтов, показали, что за период около 40 лет под основанием земляного полотна образуются чаши протаивания глубиной более 2 м (с момента строительства участка железной дороги БАМа), несмотря на применение первого принципа при сооружении земляного полотна.

Образованию таких чаш в первую очередь способствует инфильтрация атмосферных



Рис. 1. Искажение продольного профиля участка железной дороги и осадка земляного полотна из-за протаивания льдистых грунтов основания

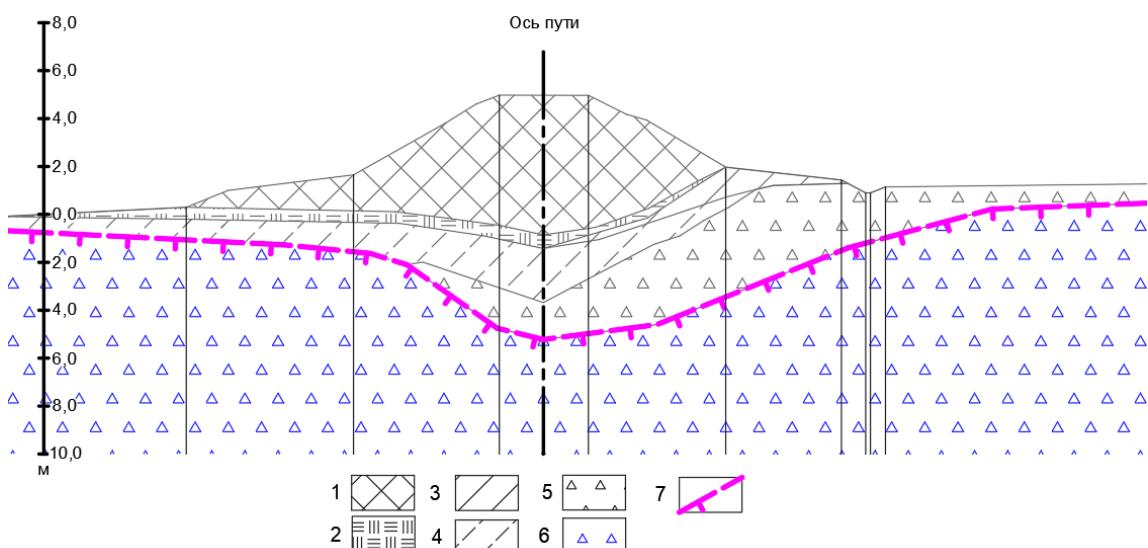


Рис. 2. Поперечный профиль земляного полотна с инженерно-геологическим разрезом по результатам изысканий:

1 – техногенные насыпные дренирующие грунты; 2 – мохорастительный торфяной слой;
3 – суглинок твердый слабозаторфованный; 4 – супесь щебенистая пластичная; 5 – дресвяный грунт с супесчаным заполнителем; 6 – дресвяный грунт с супесчаным заполнителем мерзлый, слабольдистый, при оттаивании текучей консистенции; 7 – верхняя граница многолетнемерзлых грунтов

осадков через тело земляного полотна, сложенного дренирующими грунтами, а также нарушение растительного покрова, неудовлетворительное состояние водоотводных сооружений или их полное отсутствие.

На рис. 3 схематично показано отепляющее воздействие атмосферных осадков на многолетнемерзлые грунты основания земляного полотна. При этом важно отметить, что инфильтрация атмосферных вод через тело земляного полотна имеет место только в случае сложения его дренирующими грунтами. Именно такая картина опускания границы вечной мерзлоты наблюдается на Восточном полигоне БАМа, где земляное полотно преимущественно сложено дренирующими грунтами – галечником, щебнем, дресвой. В этом случае наиболее простым конструктивным решением для предотвращения инфильтрации воды в основание насыпи является устройство гидроизоляции.

Наиболее распространенный способ гидроизоляции при проектировании и строительстве новых однопутных железных дорог с отсыпкой земляного полотна из дренирующего грунта –

это укладка противофильтрационного полотна по низу выравнивающего или защитного слоя с уклоном 40 % в полевую сторону от оси пути.

Под противофильтрационным полотном понимается геомембрана с двусторонним термоскрепленным геотекстилем. Однако эффективность применения данного материала непосредственно зависит от наличия водоотводных сооружений и их состояния. Как было уже указано ранее, скопление и застой воды в непосредственной близости от земляного полотна ускоряют процесс оттаивания мерзлых грунтов. Также необходимо отметить, что при средней длине однопутного перегона около 15 км стоимость устройства такой гидроизоляции составит около 17 435,29 тыс. р. (в базовом уровне цен).

Одним из наиболее простых и надежных решений может быть двухслойная конструкция земляного полотна, нижняя часть которого сложена недренирующим грунтом (рис. 4).

Даже небольшой по толщине слой недренирующего грунта приведет к поднятию границы многолетнемерзлого грунта под земляным полотном и поможет избавиться от ее

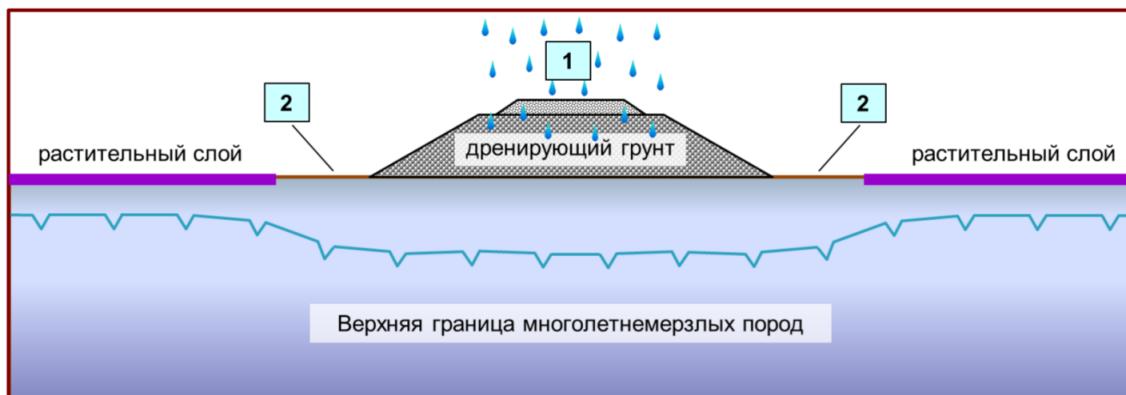


Рис. 3. Схема отепляющего действия атмосферных и поверхностных вод:
1 – летние осадки; 2 – зона с нарушенным растительно-моховым покровом

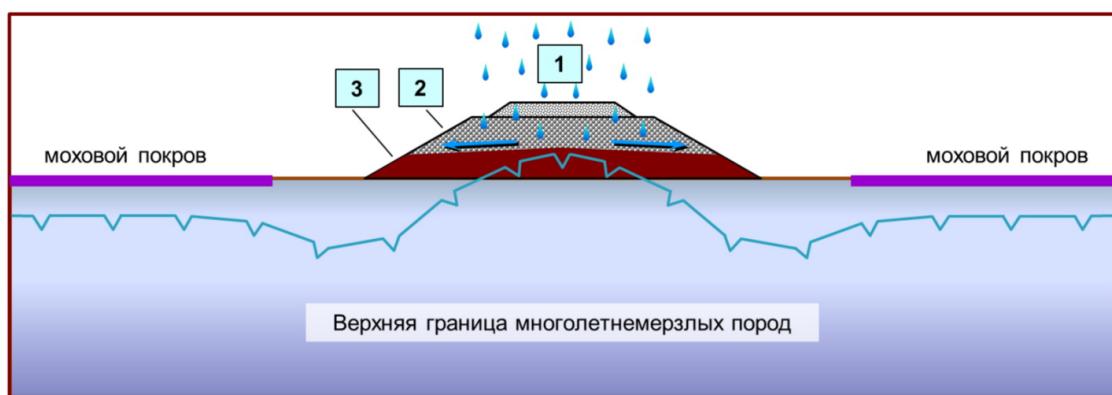


Рис. 4. Схема двухслойной конструкции земляного полотна:
1 – летние осадки; 2 – дренирующий грунт; 3 – недренирующий грунт

опускания так, как это показано на рис. 3. Однако такое решение возможно только при новом строительстве транспортных сооружений.

При строительстве вторых путей предотвратить инфильтрацию атмосферных осадков через земляное полотно в основание сооружаемой под вторые пути насыпи можно, используя конструкцию земляного полотна, изображенную на рис. 5.

Результаты исследования

Расчетным путем оценить влияние атмосферных осадков на состояние основания земляного полотна, сложенного дренирующими грунтами, весьма проблематично. Известны подходы к решению этого вопроса с помощью введения температурной поправки в граничное условие теплофизической задачи [5]. Тем не менее добиться картины деградации грунтов основания земляного полотна, схожей с реальной (см. рис. 2), полученной в результате геологических изысканий, не удается.

В данной работе сделана попытка решить эту проблему с помощью корректировки коэффициента теплопроводности. Как известно, классическая теплопроводность среды складывается из двух основных составляющих – кондуктивной проводимости и конвективного переноса тепла [6–8]. В рассматриваемом случае, как следует из рис. 3, добавляется еще один вид переноса тепла – инфильтрация летних осадков в теле земляного полотна. Поэтому логично ввести к общепринятому коэффициенту теплопроводности поправку на отепляющий эффект атмосферных осадков. Очевидно, что сделать реалистичную априорную оценку этой поправки не представляется возможным, тем более что она может значительно превосходить коэффициент

теплопроводности, определяемый кондуктивной и конвективной составляющими. В этом случае можно использовать эмпирический метод определения суммарного коэффициента теплопроводности – подбор такого его значения, при котором будет получена фактическая конфигурация верхнего уровня многолетнемерзлых грунтов в основании земляного полотна, полученная в результате инженерно-геологических изысканий (см. рис. 1).

Для инженерных расчетов температурных полей в строительстве существует ПО для ЭВМ, например [9, 10]. В данной работе теплотехнические расчеты были выполнены с использованием специализированной программы «Freeze-Cold», разработанной в СГУПС [11] и предназначеннной для решения теплофизических задач с целью обоснования эффективности использования противодеградационных мероприятий при сооружении земляного полотна в криолитозоне.

Приведенные ниже результаты теплофизических расчетов выполнялись с параметрами, типичными для железнодорожной насыпи высотой 3 м, сложенной из дренирующего грунта – галечника, характерного для восточной части БАМа. В качестве грунта основания принят суглинок. Температура на глубине нулевых годовых амплитуд (15 м) принималась равной -1°C .

Климатические характеристики сведены в табл. 1, 2. Физико-механические характеристики грунтов и мха приведены в табл. 3, 4.

На рис. 6 показан результат расчета температурного поля 3-метровой насыпи, сложенной дренирующим грунтом, и ее основания, где коэффициент теплопроводности дренирующего

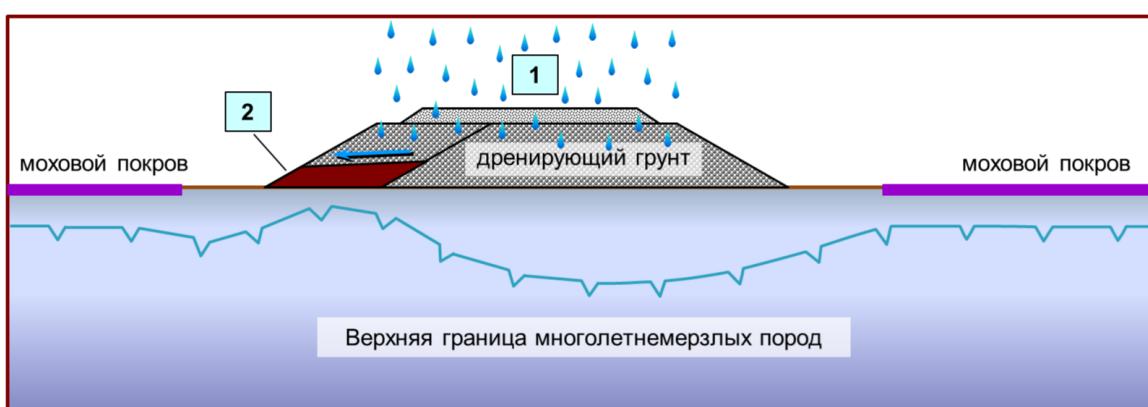


Рис. 5. Схема двухслойной конструкции земляного полотна второго пути:
1 – летние осадки; 2 – недренирующий грунт

Таблица 1

Среднемесячная температура воздуха

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, °C	-27,5	-23,1	-13,1	-5,0	8,6	15,3	18,0	14,9	7,4	-3,5	-18,6	-27,0

Таблица 2

Теплофизические характеристики снега

Параметр	Месяц						
	X	XI	XII	I	II	III	IV
Плотность, кг/см ³	180	220	230	250	270	320	400
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,12	0,15	0,16	0,18	0,20	0,27	0,40

Таблица 3

Физико-механические характеристики грунтов

Тип грунта	Плотность частиц грунта ρ_s , кг/м ³	Коэффициент пористости e	Влажность W	Коэффициент теплопроводности талого грунта λ_{th} , Вт/(м·°C)	Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта λ_f , Вт/(м·°C)	Удельная теплоемкость частиц грунта C_s , Дж/(кг·°C)
Галечник (насыпь)	2 700	0,5	0,05	4,0	2,0	930
Суглинок (основание насыпи)	2700	0,6	0,2	1,33	1,5	900

Таблица 4

Расчетные характеристики растительно-мохового покрова

Тип грунта	Плотность ρ , кг/м ³	Влажность W	Коэффициент теплопроводности талого грунта λ_{th} , Вт/(м·°C)	Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта λ_f , Вт/(м·°C)	Удельная теплопроводность талого грунта C_{th} , Дж/(кг·°C)	Удельная теплопроводность мерзлого грунта C_f , Дж/(кг·°C)
Mox	150	2,0	0,15	0,63	3 600	2 200

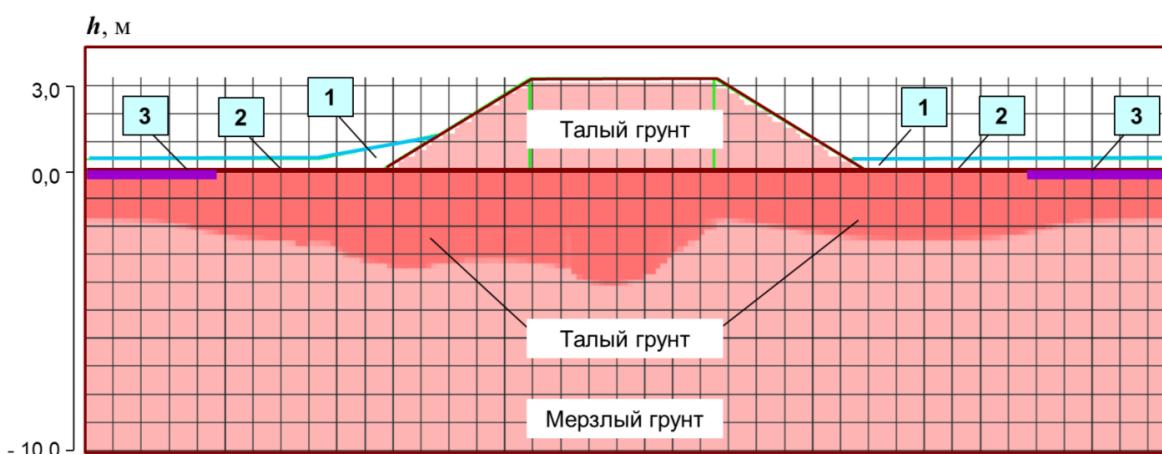


Рис. 6. Поле объемной влажности грунта насыпи из дренирующего грунта на 20-й год (конец сентября) с учетом отепляющего действия атмосферных осадков:

1 – снежные отложения; 2 – зона с нарушенным растительно-моховым покровом; 3 – моховой покров

грунта взят с учетом отепляющего воздействия фильтрующихся в теле насыпи атмосферных осадков. В данном расчете стабилизация температурного поля, а соответственно, и верхней границы мерзлых грунтов произошла на 30-й год. Глубина опускания мерзлоты под насыпью

стабилизировалась на 4 м. Этот эффект в расчетной схеме был достигнут путем задания летнего коэффициента теплопроводности дренирующего грунта, равного 4 Вт/(м·°C), который характеризует эффект фильтрации атмосферной воды в теле насыпи.

Следующий расчет (рис. 7) демонстрирует возможность избежать деградации многолетнемерзлых грунтов в основании насыпи из дренирующих грунтов путем отсыпки ее нижней части из недренирующего грунта толщиной 1 м, как показано на рис. 4. Здесь стабилизация температурного поля завершилась уже к пятому году. Данный расчет свидетельствует об эффективности двухслойной конструкции насыпи из дренирующего грунта, где нижний слой небольшой толщины отсыпается из недренирующего грунта.

Однако данный вариант, как было отмечено выше, возможен лишь при новом строительстве. Тем не менее такой подход с успехом может быть использован при сооружении вторых путей для насыпей из дренирующих грунтов. На рис. 8 приведены результаты теп-

лофизического расчета в соответствии со схемой, показанной на рис. 5, где вновь присыпаемая насыпь под второй путь имеет слоистую конструкцию, нижний слой которой отсыпан из недренирующего грунта.

Как видно из рис. 8, в этом случае не только предотвращается развитие деградации основания земляного полотна под вторым путем, но даже обеспечивается некоторый подъем верхней границы мерзлых грунтов в основании основной части насыпи, которая изначально находилась на глубине 4 м (см. рис. 6). На рис. 9 приведен вывод температурного поля для этого же расчета, выполненного в соответствии с рис. 3, где показаны температурные зоны талого и мерзлого грунта, разделенные областью с температурой, близкой к нулю.

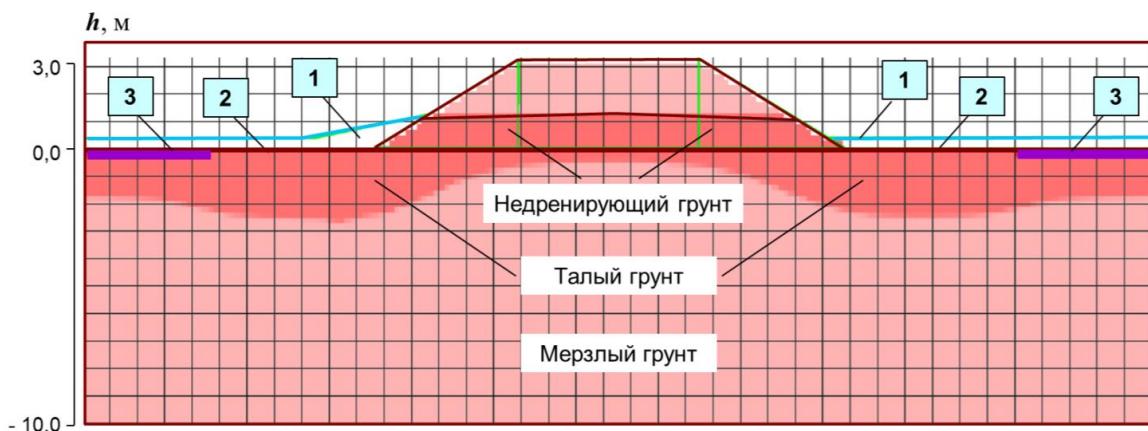


Рис. 7. Поле объемной влажности двухслойной насыпи из дренирующего и недренирующего грунта на 20-й год (конец сентября) с учетом отепляющего действия атмосферных осадков:
1 – снежные отложения; 2 – зона с нарушенным растительно-моховым покровом; 3 – моховой покров

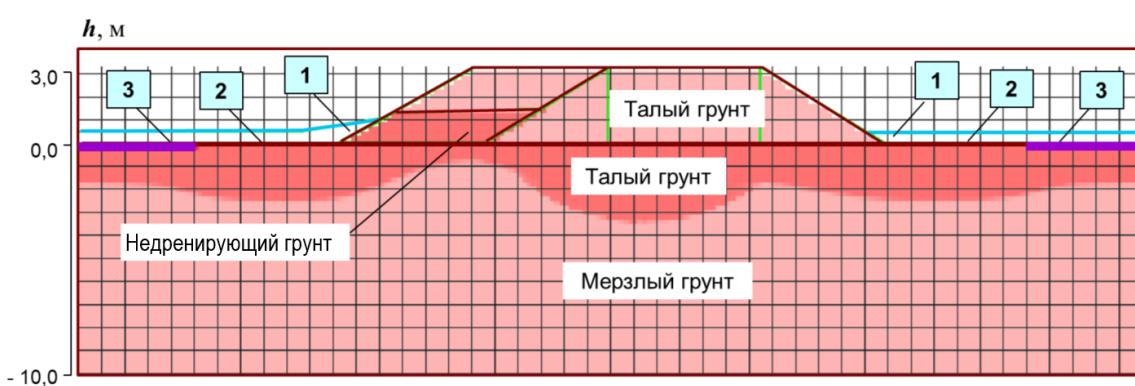


Рис. 8. Поле объемной влажности насыпи с двухслойной вставкой из дренирующего и недренирующего грунта под второй путь на 20-й год (конец сентября) с учетом отепляющего действия атмосферных осадков:
1 – снежные отложения; 2 – зона с нарушенным растительно-моховым покровом; 3 – моховой покров

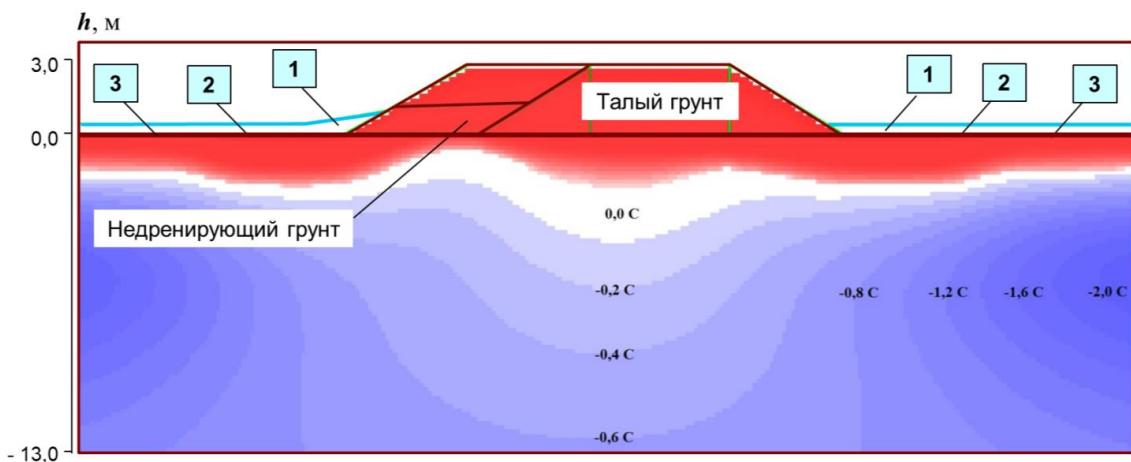


Рис. 9. Температурное поле насыпи с двухслойной вставкой из дренирующего и недренирующего грунта под второй путь на 20-й год (конец сентября) с учетом отепляющего действия атмосферных осадков:
1 – снежные отложения; 2 – зона с нарушенным растительно-моховым покровом; 3 – моховой покров

Выводы

1. Показана возможность при проведении теплофизических расчетов моделировать влияние отепляющего действия атмосферных осадков на грунты основания земляного полотна, сложенного дренирующими грунтами, путем введения поправки к коэффициенту теплопроводности на инфильтрацию атмосферных вод в тело насыпи.

2. Расчетным путем обоснована возможность предотвращения деградации многолетнемерзлых грунтов в основании земляного по-

лотна путем использования двухслойной конструкции насыпи из дренирующих грунтов, нижний слой которой, выполняющий функцию гидроизоляции, отсыпается из недренирующих грунтов.

3. Обоснована двухслойная конструкция насыпи из дренирующих грунтов для вторых путей, отличительной особенностью которой является сооружение нижнего слоя из недренирующих грунтов, исключающее деградацию грунтов основания вновь отсыпаемой насыпи.

Список источников

- Исаков А. Л., Устян Н. А. Проблемы деградации вечной мерзлоты в основании земляного полотна железных дорог и пути ее решения на базе теплотехнических расчетов // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Салехард, 2021. С. 177–180.
- Ашпиз Е. С. Опыт проектирования земляного полотна железных дорог России, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов // Материалы Пятой конференции геокриологов России. Москва : Университетская книга, 2016. С. 162–168.
- Гаврилов И. И. Состояние и причины повышенной деформативности земляного полотна на участках распространения многолетнемерзлых грунтов Дальнего Востока и Забайкалья // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2013. № 1. С. 129–143.
- Сазонов В. Н., Ашпиз Е. С. Актуальные проблемы обеспечения надежности земляного полотна на Восточном полигоне // Железнодорожный транспорт. 2015. № 9. С. 28–31.
- Гарагуля Л. С. Методика прогнозной оценки антропогенных изменений мерзлотных условий (на примере равнинных территорий). Москва : Издательство МГУ, 1985. 224 с.
- Wong H. The basic formulas and data on heat transfer for engineers. Москва : Атомиздат, 1979. 185 с.
- Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен. Москва : МЭИ, 2011. 562 с.
- СП 25.13330.2020. СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. № 915/пр : введен в действие с 1 июля 2021 г. : актуализированная редакция // Техническое нормирование в строительстве : [сайт]. URL: <https://api.faufcc.ru/api/assets/539d71a9-6030-4e5a-9ad6-0ce8e8f17b5c> (дата обращения: 19.02.2025).
- Гордийчук В. В. Программный комплекс для инженерных расчетов в строительстве «Frost 3D» : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20196113122 от 24.01.2019.

10. Усачев А. А. Программное обеспечение «Борей 3D» : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 218660189. 2018.

11. Машуков В. И., Исаков А. Л. Программа расчета температуры вечномерзлых грунтов земляного полотна «Freeze-Cold» : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2021611121. 2021.

References

1. Isakov A. L., Ustyan N. A. Problems of permafrost degradation in the base of the railway subgrade and ways to solve it based on heat engineering calculations. *Modern Studies of the Transformation of the Cryolithic Zone and Issues of Geotechnical Safety of Structures in the Arctic*. Salekhard; 2021. P. 177–180. (In Russ.).
2. Ashpiz E. S. Experience in designing the subgrade of Russian railways located in the permafrost zone. *Proceedings of the Fifth Conference of Geocryologists of Russia*. Moscow: Universitetskaya kniga, 2016. P. 162–168. (In Russ.).
3. Gavrilov I. I. State and causes of increased deformability of the subgrade in areas of permafrost soils in the Far East and Transbaikalia. *Designing the Development of the Regional Railway Network*. 2013;(1):129–143. (In Russ.).
4. Sazonov V. N., Ashpiz E. S. Actual problems of ensuring the reliability of the roadbed on the Eastern polygon. *Railway Transport*. 2015;(9):28–31. (In Russ.).
5. Garagulya L. S. Methodology for predictive assessment of anthropogenic changes in permafrost conditions (on the example of flat territories). Moscow: Moscow State University Publishing House; 1985. 224 p. (In Russ.).
6. Wong H. The basic formulas and data on heat transfer for engineers. Moscow: Atomizdat; 1979. 185 p.
7. Tsvetkov F. F., Grigoriev B. A. Heat and mass transfer. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2011. 562 p. (In Russ.).
8. SP 25.13330.2020 Foundations and foundations on permafrost soils. Approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 30.12.2020 No. 915/pr; enacted from 01.07.2021: updated edition. *Technical norming in construction: [site]*. (In Russ.). URL: <https://api.faufcc.ru/api/assets/539d71a9-6030-4e5a-9ad6-0ce8e8f17b5c>.
9. Gordiychuk V. V. Software package for engineering calculations in construction Frost 3D. Certificate of state registration of the computer program No. 20196113122 dated 24.01.2019. (In Russ.).
10. Usachev A. A. Software Borey 3D. Certificate of state registration of the computer program: 218660189, 2018. (In Russ.).
11. Mashukov V. I., Isakov A. L. Program for calculating the temperature of permafrost soils of the subgrade Freeze-Cold. Certificate of state registration of the computer program: RU2021611121, 2021. (In Russ.).

Информация об авторах

А. Л. Исаков – доктор технических наук, профессор кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

И. С. Моисеева – аспирант кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

И. Н. Гудкова – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. L. Isakov – Doctor of Engineering, Professor of the Surveying, Design and Construction of Railways and Motorways Department, Siberian Transport University.

I. S. Moiseeva – Postgraduate of the Surveying, Design and Construction of Railways and Motorways Department, Siberian Transport University.

I. N. Gudkova – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Surveying, Design and Construction of Railways and Motorways Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 14.02.2025; одобрена после рецензирования 18.02.2025; принята к публикации 24.02.2025.

The article was submitted 14.02.2025; approved after reviewing 18.02.2025; accepted for publication 24.02.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.21

doi 10.52170/1815-9265_2025_73_104

Применение имитационного моделирования для оценки долговечности балок пролетного строения железобетонных мостов

Глеб Леонидович Огурцов^{1✉}, Николай Алексеевич Ермшин², Олег Романович Бирюков³

^{1,2,3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹ ogurtsov_gl@spbstu.ru[✉]

² ermoshin_na@spbstu.ru

³ biryukov_or@spbstu.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросам прогнозирования долговечности и безотказности железобетонных пролетных строений мостовых сооружений. Предполагается, что данные параметры зависят от состояния главных балок, работоспособность которых определяется состоянием бетона и арматуры. Целью исследования является разработка методологического подхода к исследованию показателей надежности балок пролетного строения методами имитационного моделирования.

Для исследования долговечности и безотказности, выявления закономерностей влияния стохастических параметров транспортного потока, технологий содержания и условий эксплуатации на состояние мостовых сооружений предложены алгоритмы имитационного моделирования и процедуры «процессно-событийной» генерации воздействий деструктивных факторов. Безотказность и долговечность балок пролетного строения определяются по изменению величины площади поперечного сечения арматуры с учетом совместного влияния на бетон и арматуру состава и интенсивности движения, технологических процессов строительства и содержания мостовых сооружений, физико-механических характеристик применяемых материалов и воздействия агрессивных сред.

Разработка имитационной модели и проведение серии имитационных экспериментов позволили обосновать корреляционно-регрессионные и аналитические зависимости, отражающие статистические характеристики площади коррозионного разрушения арматуры и времени наработки на отказ балок пролетного строения в широком спектре воздействий нагрузок, противогололедных материалов, химически активных газов.

Предлагаемый методологический подход позволяет проектным и дорожно-эксплуатационным организациям прогнозировать межремонтные сроки службы пролетных строений железобетонных мостов, разрабатывать мероприятия по увеличению их долговечности и безотказности, что способствует снижению затрат не только на эксплуатацию мостового сооружения, но и на своевременную ликвидацию последствий преждевременных разрушений.

Ключевые слова: транспортное строительство, безотказность, долговечность, пролетное строение, мостовое сооружение, агрессивные среды, коррозия арматуры, железобетонная балка

Для цитирования: Огурцов Г. Л., Ермшин Н. А., Бирюков О. Р. Применение имитационного моделирования для оценки долговечности балок пролетного строения железобетонных мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 104–113. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_104.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

The algorithm of the simulation model implementation and the simulation results

Gleb L. Ogurtsov^{1✉}, Nikolay A. Ermoshin², Oleg R. Biryukov³

^{1,2,3} Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

¹ ogurtsov_gl@spbstu.ru[✉]

² ermoshin_na@spbstu.ru

³ biryukov_or@spbstu.ru

Abstract. The article is devoted to the issues of forecasting the durability and reliability of reinforced concrete superstructures of bridge structures. It is assumed that the durability and reliability of superstructures depend on the condition of the main beams, the performance of which is determined by the condition of concrete and

reinforcement. The purpose of the study is to develop a methodological approach to the study of reliability indicators of superstructure beams using simulation modeling methods.

To study durability and reliability, to identify patterns of influence of stochastic parameters of traffic flow, maintenance technologies and operating conditions on the condition of bridge structures, simulation algorithms and procedures for 'process-event' generation of destructive factors are proposed. The reliability and durability of superstructure beams are determined by changes in the cross-sectional area of the reinforcement, considering the combined effect on concrete and reinforcement of the composition and intensity of traffic, technological processes of construction and maintenance of bridge structures, physical and mechanical characteristics of the materials used and the effects of aggressive media.

The development of a simulation model and the conduct of a series of simulation experiments made it possible to substantiate correlation, regression and analytical dependences reflecting the statistical characteristics of the area of corrosion damage to reinforcement and the operating time for failure of superstructure beams in a wide range of effects of loads, deicing materials, and chemically active gases.

The proposed methodological approach allows design and road maintenance organizations to predict the inter-repair service life of spans of reinforced concrete bridges, to develop measures to increase their durability and reliability, which helps reduce costs not only for the operation of bridge structures, but also the timely elimination of the consequences of premature destruction.

Keywords: transport construction, reliability, durability, superstructure, bridge structure, aggressive environments, rebar corrosion, reinforced concrete beam

For citation: Ogurtsov G. L., Ermoshin N. A., Biryukov O. R. The algorithm of the simulation model implementation and the simulation results. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):104–113. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_104.

Введение

Прочностные и деформационные характеристики железобетонных конструктивных элементов пролетных строений мостов зависят от состояния бетона, рабочей арматуры и изменения площади ее поперечного сечения в течение срока эксплуатации мостового сооружения. Со временем происходит уменьшение площади поперечного сечения арматуры вследствие воздействия агрессивных факторов. Установлено, что достижение критического значения площади поперечного сечения рабочей арматуры приводит к отказам железобетонных пролетных строений мостов [1]. Отказ обусловлен увеличением площади сжатой зоны и кривизны продольной оси рассматриваемого нормального сечения в плоскости действия усилий, вызванных нагрузкой от движения транспортных средств. Уменьшение площади поперечного сечения арматуры балки приводит к снижению несущей способности, трещиностойкости, увеличению вертикального прогиба и ширины раскрытия трещин. Превышение предельно допустимой нормы хотя бы одного из этих показателей приводит к частичному или полному отказу балки пролетного строения и зависимому от отказу всего пролетного строения.

Основными агрессивными факторами, влияющими на состояние рабочей арматуры, являются циклическое воздействие подвижной нагрузки и коррозия, наступающая при достижении фронтом диффузии атмосферных газов [2] поверхности арматуры. При накоплении критического значения продуктов коррозии на поверхности крайних арматурных стержней

наблюдается скальвание защитного слоя бетона [3], что оказывает непосредственное влияние на время начала коррозии всей рабочей арматуры балки и ее работоспособность.

Основными факторами, влияющими на динамику изменения площади поперечных сечений арматуры, являются: коэффициенты диффузии углекислого газа и ионов хлорида, содержание цемента и воды в бетоне, концентрация углекислого газа и ионов хлорида на поверхности балки, температура и влажность окружающего воздуха, количество дней в году с осадками и толщина защитного слоя бетона [4, 5]. Количественные эквиваленты воздействия этих факторов – одномерные случайные величины, а площадь поперечного сечения арматуры – многомерная случайная величина. Поэтому построение аналитических зависимостей для определения состояния арматуры в конкретный момент времени представляет собой весьма сложную и трудоемкую задачу. Наиболее целесообразным способом оценки состояния долговечности балок пролетных строений мостовых сооружений в данном случае является применение методов имитационного моделирования.

Методы и материалы

Площадь поперечного сечения рабочей арматуры $\tilde{A}_{s(t)}$ в момент времени t обусловлена ее исходной величиной, продолжительностью, интенсивностью воздействия агрессивных факторов, а также усталостью материала от воздействия нагрузок. Она может быть рассчитана по формуле

$$\tilde{A}_{s(t)} = \tilde{A}_{s,0} [1 - \tilde{K}_{cor(t)} - \tilde{K}_{S-N(t)}], \quad (1)$$

где $\tilde{A}_{s,0}$ – случайная величина площади поперечного сечения арматуры при ее изготовлении, м²; $\tilde{K}_{cor(t)}$ – случайная относительная величина изменения площади арматуры в результате коррозионного разрушения в течение времени t , д. ед.; $\tilde{K}_{s-N(t)}$ – случайная относительная величина усталости материала арматуры в течение времени t , д. ед.

Площадь арматуры при изготовлении балок и возможная величина ее отклонения определяются стабильностью и точностью технологических процессов в соответствии с требованиями нормативно-технической документации. Исходя из нормативов [6, 7] допускается использовать арматуру, диаметр которой соответствует установленным допускам относительно номинального (проектного) значения.

Возможно предположить, что случайная величина диаметра арматуры при изготовлении подчиняется нормальному закону распределения. Математическое ожидание данной величины принимается равным номинальному (проектному) значению. В таком случае стандартное отклонение $\sigma_{s,g}$ можно определить согласно правилу «трех сигм»:

$$\sigma_{s,g} = \frac{0,25\pi d_{\max}^2 - 0,25\pi d_{\min}^2}{6}, \quad (2)$$

где d_{\max} и d_{\min} – максимальный и минимальный диаметр рабочей арматуры, мм.

Значение d_{\min} и d_{\max} определяется с учетом допусков:

$$d_{\min} = \bar{d} - \mu \bar{d}, \quad (3)$$

$$d_{\max} = \bar{d} + \mu \bar{d}, \quad (4)$$

где \bar{d} – математическое ожидание диаметра рабочей арматуры, принимаемое равным нормативному значению, мм; μ – величина допуска, определяемая по нормативным требованиям, д. ед.

Подставив величины d_{\min} и d_{\max} в формулу (2), возможно определить стандартное отклонение площади рабочей арматуры:

$$\sigma_{s,g} = \frac{\pi \mu \bar{d}^2}{6}. \quad (5)$$

Учитывая, что площадь напрягаемой арматуры представляет собой совокупность проволок с одинаковым математическим ожиданием диаметра, выражение (5) примет вид

$$\sigma_{sp,g} = \frac{4\pi \mu \bar{d}^2}{6} n, \quad (6)$$

где \bar{d} – математическое ожидание диаметра одной проволоки, мм; n – количество проволок в пучке напрягаемой арматуры, шт.

Определение способов получения значений \bar{d} и $\sigma_{sp,g}$ обеспечивает возможность имитацион-

ного моделирования исходной величины площади поперечного сечения арматурного стержня методом обратных функций по формуле

$$\tilde{A}_{s,0} = F^{-1}(\tilde{T}_i), \quad (7)$$

где \tilde{T}_i – равномерно распределенное случайное число, находящееся в диапазоне от 0 до 1, генерируемое по методу Неймана.

Необходимо отметить, что время начала коррозии арматуры зависит от способности атмосферных газов проникать в глубь бетонного камня и величины защитного слоя арматуры [8, 9]. При этом глубина диффузии атмосферных газов зависит от температуры и влажности воздуха, продолжительности периода обработки дорог солями-антиобледенителями, поверхностной концентрации агрессивных газов, содержания воды и цемента в бетоне [10–12].

При воздействии углекислого газа и ионов хлорида на рабочую арматуру начинается процесс коррозии, который приводит к снижению полезной площади ее сечения. Изменение полезной площади при воздействии углекислого газа $\tilde{A}_{s,g,cor}$ можно определить по формуле [12–14]:

$$\tilde{A}_{s,g,cor} = \pi \left(\frac{\tilde{d}_{s,g}}{2} - 0,01 \int_{t_{cor,carb}}^t \frac{\tilde{N}_{W(t)}}{365} dt \right)^2, \quad (8)$$

где $\tilde{d}_{s,g}$ – случайная величина диаметра арматуры, мм; $t_{cor,carb}$ – фактическое время коррозии арматуры из-за воздействия углекислого газа, лет; $\tilde{N}_{W(t)}$ – случайное количество дней в году с осадками более 2,5 мм.

Изменение полезной площади от воздействия ионов хлорида определяется следующим образом [12–14]:

$$\tilde{A}_{s,g,cor} = \pi \left(\frac{\tilde{d}_{s,g}}{2} - 0,28 \int_{t_{cor,cl}}^t \frac{\tilde{N}_{W(t)}}{365} dt \right)^2, \quad (9)$$

где $t_{cor,cl}$ – фактическое время коррозии арматуры от воздействия ионов хлорида, лет.

При прогнозировании величины эффективной площади поперечного сечения арматуры $\tilde{A}_{cor,t}$ на момент времени t с учетом взаимного влияния углекислого газа и ионов хлорида предлагается определять ее как

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{cor,t} = & \pi \left(\frac{\tilde{d}_{s,g}}{2} - 0,01 \int_{t_{cor,carb}}^t \frac{\tilde{N}_{W(t)}}{365} dt - \right. \\ & \left. - 0,28 \int_{t_{cor,cl}}^t \frac{\tilde{N}_{W(t)}}{365} dt \right)^2, \end{aligned} \quad (10)$$

Имитация случайной величины $\tilde{A}_{cor,t}$ осуществляется исходя из предположения о нормальном законе распределения количества дней с осадками. Параметры распределения (математическое ожидание и стандартное отклонение) устанавливаются на основании метеорологических данных.

Определение способов имитации воздействующих на арматуру деструктивных факторов, а также математического описания процессов изменения площади сечения арматуры во времени позволяет перейти к изложению целей и алгоритма имитационного моделирования.

Целью имитационного эксперимента является обоснование корреляционно-регрессионных математических моделей и аналитической зависимости прогнозирования величины площади поперечного сечения арматуры при эксплуатации пролетного строения мостового сооружения. Для достижения целей эксперимента используется процессно-событийная процедура моделирования с непрерывным изменением состояния.

При этом синхронизация процессов воздействия деструктивных факторов на арматуру осуществляется с использованием зависимости (10). Время имитационного моделирования и фиксированного шага (периода эксплуатации) его изменения определяется исходя из заданных технико-эксплуатационных показателей пролетного строения и принимается соответствующим сроку его службы и периодичности обследования соответственно. Результаты каждого прогона модели сохраняются в таблице (табл. 1) до достижения требуемого пробного количества имитаций W .

На основании выполненного количества имитаций r , превышающих пробное число W или равных ему, определяются статистические характеристики случайной относительной величины площади поперечного сечения арматуры. Статистические характеристики в последующем используются для вычисления требуемого количества прогонов модели K , обеспечивающих заданный уровень доверительной вероятности. Работа имитационной

модели прекращается в случае, когда выполненное количество имитаций r соответствует требуемому количеству K или превосходит его. Укрупненный алгоритм работы имитационной модели для выявления величины изменения площади поперечного сечения арматурных стержней во времени при воздействии деструктивных факторов (атмосферных газов, хлоридов, нагрузок) представлен на рис. 1.

Результаты исследования

Апробация работы имитационной модели выполнена для балки пролетного строения мостового сооружения в Санкт-Петербурге. Пролетное строение состоит из восьми главных балок Б 3300.б.153-ТВ длиной 33 м, выполненных по рабочим чертежам «Союздорпроекта». Для выявления аналитической зависимости, позволяющей прогнозировать время начала коррозии арматуры, определены входные параметры модели для заданного района эксплуатации мостового сооружения (табл. 2).

Входными параметрами, характеризующими конструктивно-технологические решения, являются содержание цемента и воды в бетоне, математические ожидания которых равны 500 и 200 кг/м³ соответственно [9], а также величина толщины защитного слоя. По результатам имитационного моделирования для различных толщин защитных слоев бетона (20, 28, 38, 68, 80 и 98 мм) были получены гистограммы частот времени начала коррозии арматуры при воздействии углекислого газа (рис. 2) и ионов хлорида (рис. 3). Результаты имитационного моделирования для толщин защитных слоев бетона 20 и 80 мм представлены на рис. 2 и 3.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при эксплуатации мостового сооружения депассификация защитного слоя бетона с последующей коррозией арматуры наступает раньше от воздействия ионов хлорида, нежели углекислого газа. Установлено, что время начала коррозии подчиняется нормальному закону распределения. Согласованность теоретических и экспериментальных частот

Пример результатов имитационной модели

Номер имитации	Относительная величина площади арматуры, д. ед., на год эксплуатации					
	0	5	15	30	...	100
1	1,00	0,98	0,86	0,83	...	0,04
2	1,00	0,98	0,93	0,81	...	0,05
3	1,00	0,98	0,91	0,83	...	0,04
...
r	1,00	0,97	0,90	0,78	...	0,04

Таблица 1

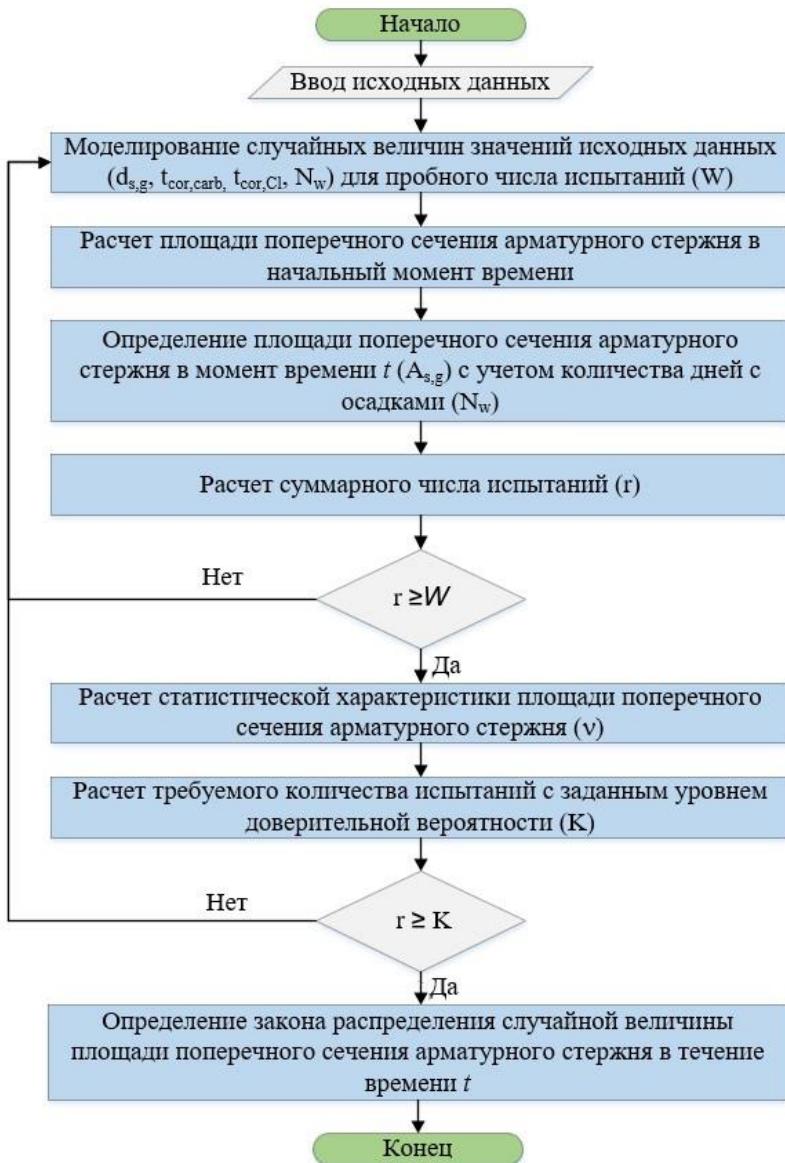


Рис. 1. Укрупненный алгоритм работы имитационной модели

Таблица 2

Природно-климатические условия района эксплуатации мостового сооружения

Показатель	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура, °C	-8	-8	-4	2	9	15	17	16	10	5	-1	-5
Влажность, %	88	85	80	70	65	68	73	78	83	84	88	89

определенена по критерию Пирсона при уровне значимости 0,05.

С целью обоснования корреляционно-регрессионных математических моделей изменения величины площади арматуры и превентивных мер по сохранению несущей способности балок пролетного строения в течение срока эксплуатации выявлены показатели исходной площади арматуры и защитного слоя бетона, а также определено время начала коррозии (табл. 3).

В результате имитационного моделирования получены значения изменения величины

площади арматуры в течение срока эксплуатации. Графическая интерпретация изменения величины площади поперечного сечения арматуры А-III и В1400 (1) представлена на рис. 4.

Имитационное моделирование позволило получить корреляционно-регрессионные математические модели определения площади поперечного сечения при коррозионном разрушении в момент времени t :

$$\bar{M}_{cor(t)} = 1 - 4,33 \cdot 10^{-9} t^4 + 1,27 \cdot 10^{-6} t^3 - 5,22 \cdot 10^{-5} t^2 - 1,29 \cdot 10^{-2} t, \quad (11)$$

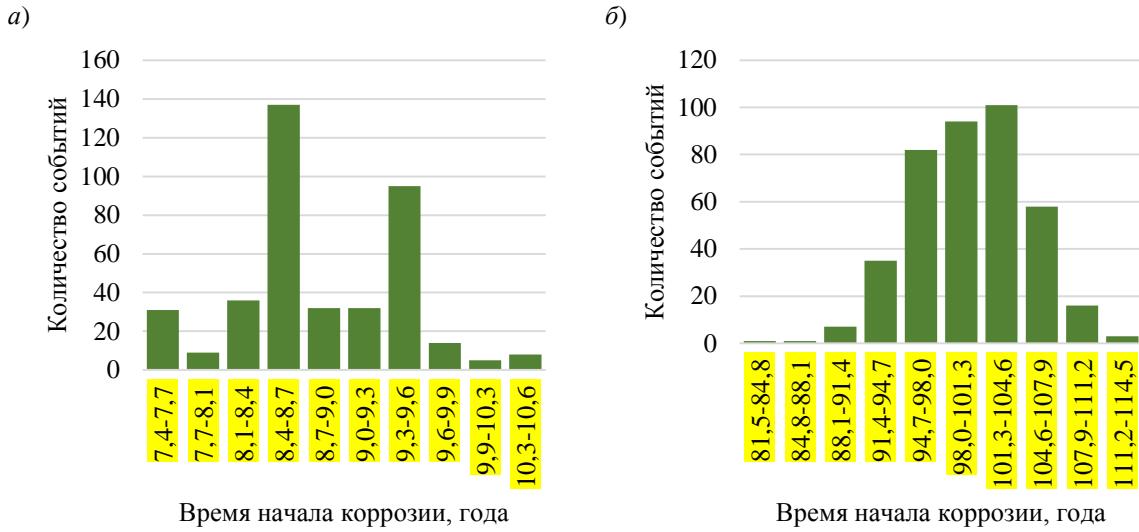


Рис. 2. Гистограмма частот времени начала коррозии арматуры при воздействии углекислого газа на толщину защитного слоя:
a – 20 мм (среднее время начала коррозии $\bar{t}_{cor} = 8,81$ года, $\sigma_{cor} = 0,65$);
б – 80 мм (среднее время начала коррозии $\bar{t}_{cor} = 100,48$ года, $\sigma_{cor} = 4,82$)

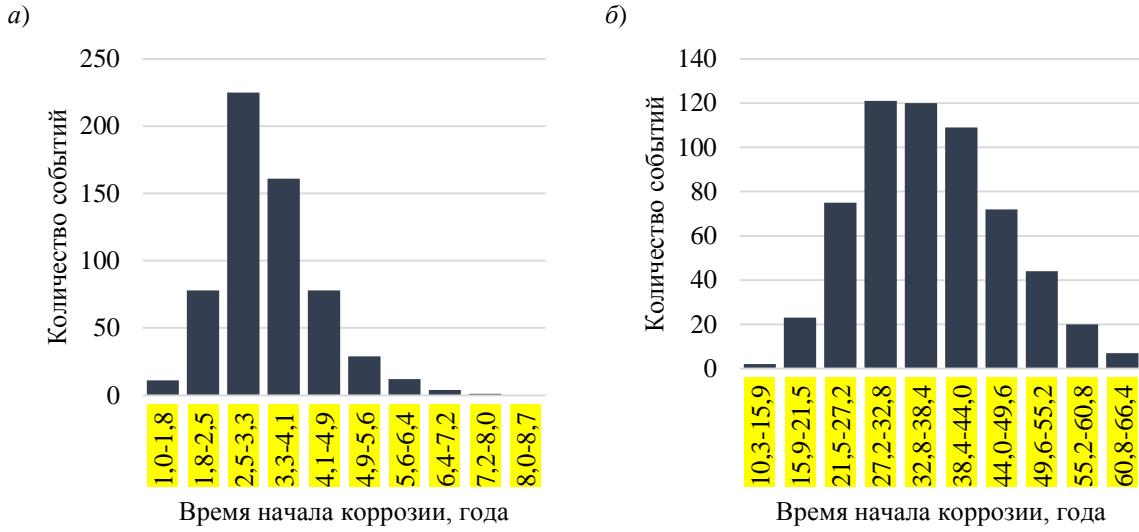


Рис. 3. Гистограмма частот времени начала коррозии арматуры при воздействии ионов хлорида на толщину защитного слоя:
a – 20 мм (среднее время начала коррозии $\bar{t}_{cor} = 3,43$ года, $\sigma_{cor} = 1,00$);
б – 80 мм (среднее время начала коррозии $\bar{t}_{cor} = 37,32$ года, $\sigma_{cor} = 10,51$)

$$\begin{aligned}\sigma_{cor(t)} = & 2,60 \cdot 10^{-11} t^5 - 9,76 \cdot 10^{-9} t^4 + \\ & + 1,33 \cdot 10^{-6} t^3 - \\ & - 8,26 \cdot 10^{-5} t^2 + 2,19 \cdot 10^{-3} t;\end{aligned}\quad (12)$$

– для арматуры В1400:

$$\begin{aligned}\bar{M}_{cor(t)} = & 1 - 4,80 \cdot 10^{-9} t^4 + 1,70 \cdot 10^{-6} t^3 - \\ & - 1,97 \cdot 10^{-4} t^2 + 2,15 \cdot 10^{-3} t,\end{aligned}\quad (13)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{cor(t)} = & 3,80 \cdot 10^{-11} t^5 + 1,34 \cdot 10^{-8} t^4 - \\ & - 1,55 \cdot 10^{-6} t^3 + \\ & + 5,67 \cdot 10^{-5} t^2 + 5,98 \cdot 10^{-4} t.\end{aligned}\quad (14)$$

Выявлено, что относительная величина площади поперечного сечения арматуры, подверженной коррозионному разрушению, $A_{cor(t)}$ за

время t с заданным уровнем доверительной вероятности подчиняется усеченно-нормальному закону распределения. Плотность вероятности усечено-нормального закона распределения определяется следующим образом:

$$f(A_{cor(t)}; \bar{M}_{cor(t)}; \sigma_{cor(t)}; A_{cor,min}; A_{cor,max}) = \begin{cases} 0 & \text{при } A_{cor(t)} < A_{cor,min}, \\ \frac{1}{\sigma_{cor(t)} \Phi_0(u_2) - \Phi_0(u_1)} \varphi(u) & \text{при } A_{cor,min} \leq A_{cor(t)} \leq A_{cor,max}, \\ 0 & \text{при } A_{cor(t)} > A_{cor,max}, \end{cases} \quad (15)$$

где $A_{cor,min}$ и $A_{cor,max}$ – минимальные и максимальные значения относительной площади

Таблица 3

Входные параметры имитационной модели

Тип арматурного стержня	A-III	A-I	B1400 (1)	B1400 (2)	B1400 (3)
Исходный диаметр арматуры/проволоки, мм	\bar{M}	12	8	5	5
	σ	0,24	0,16	0,03	0,03
Исходная площадь арматуры, мм^2	\bar{M}	113,10	50,27	471,24	471,24
	σ	4,52	2,01	6,28	6,28
Толщина защитного слоя, мм	—	20	28	68	80
Время начала коррозии при воздействии углекислого газа, год	\bar{M}	8,81	16,82	78,94	100,48
	σ	0,65	1,04	3,76	4,82
Время начала коррозии при воздействии ионов хлорида, год	\bar{M}	3,43	7,93	23,13	37,32
	σ	1,00	2,58	6,55	10,51
Количество дней в году, шт.	\bar{M}	65			
	σ	8,67			

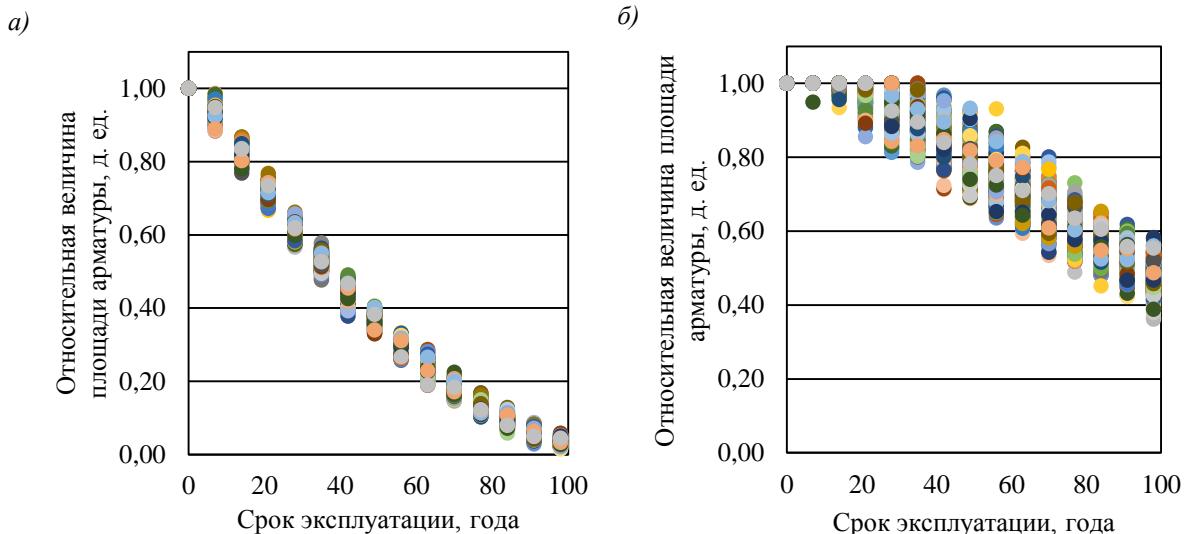


Рис. 4. Распределение изменения величины площади поперечного сечения арматуры в течение срока эксплуатации:
а – А-III; б – В1400 (1)

поперечного сечения арматуры, д. ед., принимаемые равными 0,0 и 1,0 соответственно; $\varphi(u)$ – плотность вероятности нормального закона распределения.

Значение $\varphi(u)$ составляет:

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}(u)^2\right], \quad (16)$$

где $u = \frac{A_{cor(t)} - \bar{M}_{cor(t)}}{\sigma_{cor(t)}}$.

$\Phi_0(u_2)$ и $\Phi_0(u_1)$ – функции, определяемые как

$$\Phi_0(u_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (17)$$

$$\Phi_0(u_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_1} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (18)$$

где $u_2 = \frac{A_{cor,max} - \bar{M}_{cor(t)}}{\sigma_{cor(t)}}$ и $u_1 = \frac{A_{cor,min} - \bar{M}_{cor(t)}}{\sigma_{cor(t)}}$.

Так как площадь поперечного сечения $A_{s,0}$ при изготовлении не подвержена коррозии, то

вероятность состояния, при котором площадь поперечного сечения арматуры достигнет критического значения $A_{s,crit}$ на момент времени t , может быть рассчитана по формуле

$$P(A_{s(t)} \leq A_{s,crit}) = F(A_{s,0})F(A_{cor(t)}; \bar{M}_{cor(t)}; \sigma_{cor(t)}; A_{cor,min}; A_{cor,max}). \quad (19)$$

При этом неработоспособное состояние (полный отказ) балки пролетного строения происходит, когда не выполняется следующее условие:

$$\tilde{M}_{ult(t)} \geq \tilde{M}_{y(t)}, \quad (20)$$

где $\tilde{M}_{ult(t)}$ – предельный изгибающий момент балки в момент времени t , кН·м; $\tilde{M}_{y(t)}$ – изгибающий момент, вызванный действием внешних сил, в момент времени t , кН·м.

Ограниченно неработоспособное состояние (частичный отказ) балки пролетного строения наступает, когда одно или два приведенных ниже условия не выполняются:

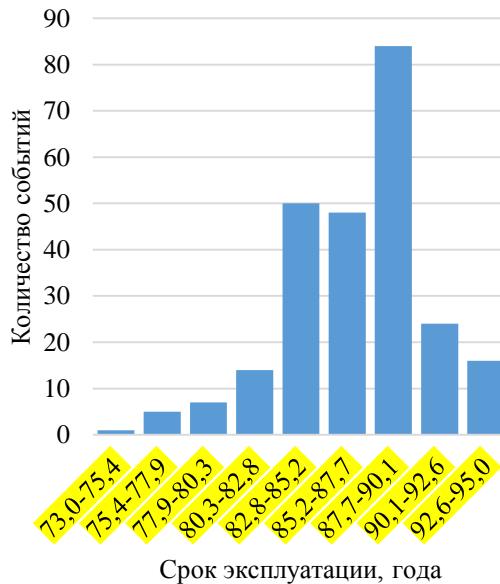
$$\tilde{f}_{z(t)} \leq f_{z,ult}, \quad (21)$$

$$\tilde{a}_{crc(t)} \leq a_{crc,ult}, \quad (22)$$

где $\tilde{f}_{z(t)}$ – вертикальные перемещения балки, вызванные действием внешних сил, в момент времени t , мм; $f_{z,ult}$ – предельные вертикальные перемещения балки, мм; $\tilde{a}_{crc(t)}$ – ширина раскрытия трещин, вызванная действием внешних сил, в момент времени t , мм; $a_{crc,ult}$ – предельная ширина раскрытия трещин, мм.

Исходя из этого с применением аналитической зависимости (19) и полученных корреляционно-регрессионных математических моделей (11)–(14) представляется возможным выявить аналитические зависимости для определения математического ожидания времени

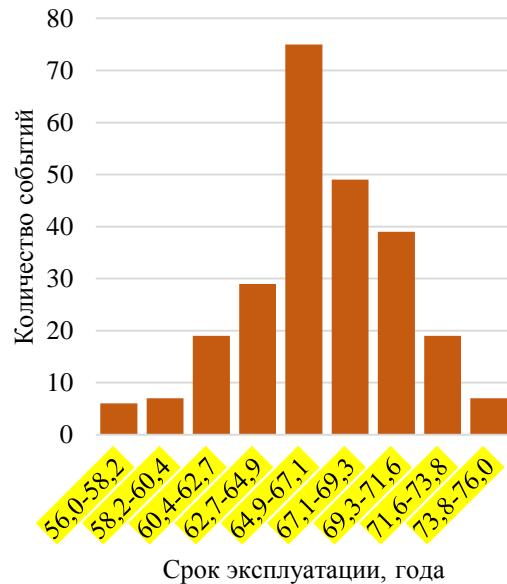
a)



наработки на частичный и полный отказ балки пролетного строения (рис. 5).

Результаты имитационного моделирования позволяют сделать вывод о том, что время наработки на частичный и полный отказ балки пролетного строения подчиняется нормальному закону распределения. Согласованность теоретических и экспериментальных частот определена по критерию Пирсона при уровне значимости 0,05. Ограниченно неработоспособное состояние балки наступает при невыполнении условия по прогибу. Математическое ожидание времени наработки на частичный отказ в заданных условиях эксплуатации

б)



в)

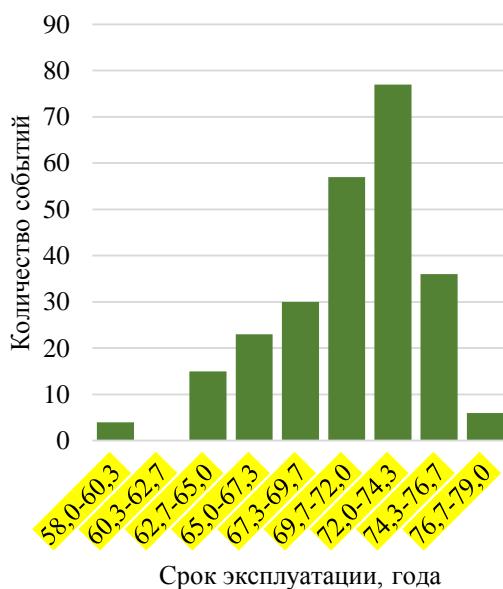


Рис. 5. Гистограмма частот времени наработки:

а – на полный отказ по несущей способности (среднее время $\bar{T} = 87,03$ года, $\sigma_T = 3,77$);
б – на частичный отказ по прогибу (среднее время $\bar{T} = 66,92$ года, $\sigma_T = 3,82$); *в* – на частичный отказ по ширине раскрытия трещин (среднее время $\bar{T} = 71,14$ года, $\sigma_T = 3,77$)

составило 66 лет 336 дней (см. рис. 5, б) с доверительной вероятностью 0,95. При этом математическое ожидание времени наработки на полный отказ балки составило 87 лет 110 дней (см. рис. 5, а), что меньше требуемого срока службы. Для обеспечения заданного уровня безотказности [15, 16] на 63-м году эксплуатации необходимо произвести ремонтно-восстановительные работы, такие как замена депасивированного защитного слоя бетона, очистка арматуры от коррозии, окраска открытых поверхностей бетона.

Заключение

Результаты имитационного моделирования позволяют оценить качество принятых конструктивно-технологических решений на этапе проектирования мостовых сооружений с учетом стохастических характеристик агрессивных факторов, установить время начала и величину коррозионного разрушения арматуры, а также

определить аналитические зависимости для оценки математического ожидания времени наработки на частичный и полный отказы.

Предложенные корреляционно-регрессионные математические модели коррозионного разрушения арматуры позволяют прогнозировать долговечность и безотказность балки пролетного строения, а также определять сроки и состав ремонтно-восстановительных работ для продления сроков функционирования мостовых сооружений. Апробация результатов имитационной модели проведена для главной балки пролетного строения мостового сооружения. Для заданных условий эксплуатации установлено, что математическое ожидание времени наработки на частичный отказ вследствие прогибов составляет 66 лет 336 дней. Математическое ожидание времени наработки на полный отказ – 87 лет 110 дней, что меньше требуемого срока службы.

Список источников

1. Овчинников И. И., Мигунов В. Н., Скачков Ю. П. Коррозионно-механическое разрушение железобетонных конструкций при одновременном действии хлоридной коррозии и карбонизации // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 2. С. 72–78.
2. Огурцов Г. Л. Метод прогнозирования момента трещинообразования пролетного строения моста // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2024. № 2 (6). С. 73–83.
3. Особенности оценки эксплуатационной надежности мостов в составе гидротехнических сооружений / Б. А. Бондарев [и др.] // Транспортные сооружения. 2021. Т. 8, № 1. URL: <https://t-s.today/PDF/08SATS121.pdf> (дата обращения: 05.01.2025).
4. Троян В. В. Моделирование долговечности железобетонных конструкций // Технологии бетонов. 2011. № 5/6 (58/59). С. 39–41.
5. Бородай Д. И. Прогноз долговечности типовых железобетонных плитных пролетных строений автодорожных мостов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2011. № 1 (87). С. 169–176.
6. ГОСТ 5781–82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2009. 14 с.
7. ГОСТ 7348–81. Проволока из углеродистой стали для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций. Технические условия. Москва : Издательство стандартов, 2003. 8 с.
8. Карапетов Э. С., Шестовицкий Д. А. Прогноз срока службы железобетонных мостов на основе модели процесса карбонизации защитного слоя // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. № 1 (46). С. 14–24.
9. Шмелев Г. Д., Варюшкин С. А. Диффузия углекислого газа в бетон строительных конструкций и оценка коэффициента диффузии интервальным методом // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. 2013. № 3. С. 315–320.
10. Шалый Е. Е., Леонович С. Н., Ким Л. В. Деградация железобетонных конструкций морских сооружений от совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии // Строительные материалы. 2019. № 5. С. 67–72.
11. Карапетов Э. С., Шестовицкий Д. А. Исследование по определению коэффициента диффузии хлоридов в бетоне // Мосты и тоннели: теория, исследования, практика. 2012. № 3. С. 68–74.
12. Леонович С. Н. Коррозия арматуры: общие подходы к расчету долговечности железобетонных конструкций // Вестник Брестского государственного технического университета. 2002. № 1. С. 38–43.
13. Ткачева М. И. Анализ методов определения скорости коррозии стальной арматуры в карбонизированном бетоне // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа, Гомель, 16–17 ноября 2023 года. Гомель : Белорусский государственный университет транспорта. 2023. С. 46–47.
14. Доломанюк Р. Ю., Дащевич С. В., Васильев А. А. Совершенствование прогнозирования состояния стальной арматуры железобетонных конструкций искусственных сооружений с учетом карбонизации бетона // Modern Science. 2020. № 2-1. С. 364–376.

15. ГОСТ Р 58137–2018. Дороги автомобильные общего пользования. Руководство по оценке риска в течение жизненного цикла. Москва : Стандартинформ, 2018. 57 с.

16. International Organization of Standardization ISO 2394-2015 – General principles of reliability for structures. [S. l.], 2015. 111 p.

References

1. Ovchinnikov I. I., Migunov V. N., Skachkov Yu. P. Corrosion-mechanical destruction of reinforced concrete structures under the simultaneous action of chloride corrosion and carbonation. *Regional Architecture and Construction*. 2012;(2):72–78. (In Russ.).
2. Ogurtsov G. L. Forecasting method of the bridge superstructure cracking moment. *Highways and Transport Infrastructure*. 2024;(6):73–83. (In Russ.).
3. Bondarev B. A. [et al.]. Features of assessing the operational reliability of bridges as part of hydraulic structures. *Transport Structures*. 2021;8(1). (In Russ.). URL: <https://t-s.today/PDF/08SATS121.pdf>.
4. Troyan V. V. Modeling the durability of reinforced concrete structures. *Technologies of Concrete*. 2011;(58/59):39–41. (In Russ.).
5. Borodai D. I. Durability forecast of typical reinforced concrete slab superstructures of highway bridges. *Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture*. 2011;(87):169–176. (In Russ.).
6. GOST 5781–82. Hot-rolled steel for reinforcement of reinforced concrete structures. Technical specifications. Moscow: Standartinform; 2009. 14 p. (In Russ.).
7. GOST 7348–81. Carbon steel wire for reinforcement of prestressed reinforced concrete structures. Technical specifications. Moscow: Publishing House of Standards; 2003. 8 p. (In Russ.).
8. Karapetov E. S., Shestovitsky D. A. Service life forecast of reinforced concrete bridges based on the model of the protective layer carbonation process. *Proceedings of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*. 2016;(46):14–24. (In Russ.).
9. Shmelev G. D., Varyushkin S. A. Diffusion of carbon dioxide into concrete of building structures and estimation of the diffusion coefficient by the interval method. *Issues of Modern Science and Practice. University named after V. I. Vernadsky*. 2013;(3):315–320. (In Russ.).
10. Shalyy E. E., Leonovich S. N., Kim L. V. Degradation of reinforced concrete structures of marine structures from the combined effects of carbonation and chloride aggression. *Building Materials*. 2019;(5):67–72. (In Russ.).
11. Karapetov E. S., Shestovitsky D. A. Research on the determination of the diffusion coefficient of chlorides in concrete. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*. 2012;(3):68–74. (In Russ.).
12. Leonovich S. N. Corrosion of reinforcement: general approaches to calculating the durability of reinforced concrete structures. *Bulletin of the Brest State Technical University*. 2002;(1):38–43. (In Russ.).
13. Tkacheva M. I. Analysis of methods for determining the corrosion rate of steel reinforcement in carbonized concrete. *Innovative Development of Transport and Construction Complexes: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 70th Anniversary of Belizhza – Belgut, Gomel, November 16–17, 2023*. Gomel: Belarusian State University of Transport; 2023. P. 46–47. (In Russ.).
14. Dolomanyuk R. Yu., Dashkevich S. V., Vasiliev A. A. Improvement of steel reinforcement condition prediction for reinforced concrete structures of artificial structures taking into account concrete carbonisation. *Modern Science*. 2020;(2-1):364–376. (In Russ.).
15. GOST R 58137–2018. Public roads. Guidelines for life-cycle risk assessment. Moscow: Standartinform; 2018. 57 p. (In Russ.).
16. International Organization of Standardization ISO 2394-2015 – General principles of reliability for structures. [S. l.], 2015. 111 p.

Информация об авторах

Г. Л. Огурцов – аспирант, ассистент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Н. А. Ермшин – доктор военных наук, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

О. Р. Бирюков – кандидат военных наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Information about the authors

G. L. Ogurtsov – Postgraduate, Assistant of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

N. A. Ermoshin – Doctor of Military Sciences, Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

O. R. Biryukov – Candidate of Military Sciences, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Статья поступила в редакцию 04.02.2025; одобрена после рецензирования 27.02.2025; принята к публикации 11.03.2025.

The article was submitted 04.02.2025; approved after reviewing 27.02.2025; accepted for publication 11.03.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.21

doi 10.52170/1815-9265_2025_73_114

Анализ конструктивного исполнения автодорожных железобетонных мостов для создания каталогов цифровых информационных моделей их элементов

Степан Васильевич Ефимов^{1✉}, Елена Солтановна Кокоева²

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

¹ esvmt@mail.ru✉

² lena.kokoeva.91@mail.ru

Аннотация. В последние десятилетия технологии информационного моделирования стали неотъемлемой частью строительной индустрии. Новые технологии предоставляют мощные инструменты для управления проектами, моделирования, оптимизации ресурсов и повышения точности и качества проектирования. Несмотря на очевидные преимущества, внедрение новых технологий управления процессами строительства сталкивается с рядом проблем в нашей стране, в частности с отсутствием библиотек типовых элементов мостовых сооружений.

В статье рассматривается необходимость взаимосвязи института типового проектирования и технологий информационного моделирования. Приведен анализ проектов эксплуатируемых конструкций железобетонных пролетных строений и промежуточных опор автодорожных мостовых сооружений. Установлен набор атрибутивной информации и параметров цифровой информационной модели, необходимых на стадии разработки проектной документации на ремонт и эксплуатации сооружения. Выявлены наиболее распространенные типовые проекты железобетонных пролетных строений и опор, для отдельных типоразмеров конструкций которых разработаны цифровые информационные модели с высокой степенью детализации, включающей рабочее и конструктивное армирование элементов. Данные модели экспортированы в открытый формат данных, что повышает их совместимость с различными программными продуктами и способствует широкому внедрению в практику.

Результаты работы могут стать основой для создания в ближайшие годы полного каталога эксплуатируемых железобетонных пролетных строений и опор автодорожных мостов. Внедрение таких решений не только сократит временные и ресурсные затраты, но и обеспечит переход отечественной инфраструктуры на качественно новый уровень цифровизации.

Ключевые слова: технологии информационного моделирования, цифровая информационная модель, автодорожный мост, типовой проект

Для цитирования: Ефимов С. В., Кокоева Е. С. Анализ конструктивного исполнения автодорожных железобетонных мостов для создания каталогов цифровых информационных моделей их элементов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 114–122. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_114.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Analysis of the road reinforced concrete bridges design for the creation a library of building information models of their elements

Stefan V. Efimov^{1✉}, Elena S. Kokoeva²

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

¹ esvmt@mail.ru✉

² lena.kokoeva.91@mail.ru

Abstract. In recent decades, building information modeling have become an integral part of the construction industry. These new technologies provide powerful tools for project management, modeling, resource optimization, and improving the accuracy and quality of design. Despite the obvious advantages, the implementation of new technologies for managing construction processes faces a number of challenges in our country, particularly the lack of libraries of standard elements for bridge structures.

The article examines the need to integrate standardized design practices with building information modeling. An analysis of the designs of existing reinforced concrete superstructures and intermediate supports of road bridge

structures is presented. A set of attribute information and parameters for building information models required at the stage of developing project documentation for the repair and operation of structures has been established. The most common standard designs of reinforced concrete superstructures and supports have been identified, and for selected standard sizes of structures, detailed digital information models have been developed, including working and structural reinforcement of elements. These models have been exported to an open data format, which enhances their compatibility with various software products and promotes widespread practical adoption.

The results of this work can serve as a foundation for creating a comprehensive catalog of existing reinforced concrete superstructures and supports for road bridges in the coming years. The implementation of such solutions will not only reduce time and resource costs but also ensure the transition of domestic infrastructure to a qualitatively new level of digitalization.

Keywords: building information modeling, building information model, road bridge, standard project

For citation: Efimov S. V., Kokoeva E. S. Analysis of the road reinforced concrete bridges design for the creation a library of building information models of their elements. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):114–122. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_114.

Введение

Изменения в законодательстве постепенно вносят корректировки и в отрасль дорожного проектирования. С 1 октября 2021 г. вступили в силу изменения в Градостроительный кодекс РФ (Федеральный закон от 01.07.2021 № 275-ФЗ в части типового проектирования). Кроме того, согласно Постановлению Правительства РФ № 331 от 05.03.2021, с 1 января 2022 г. применение технологий информационного моделирования (ТИМ) стало обязательным для финансируемых из бюджета РФ объектов.

На данный момент реализуется много программ по финансированию капитальных ремонтов линейных искусственных сооружений, в частности программа «Безопасные и качественные дороги» [1]. С учетом требований законодательства по применению технологий информационного моделирования в технических заданиях на разработку проектов искусственных сооружений появляются требования к разработке цифровых информационных моделей (ЦИМ). Нововведения также влияют на дорожную отрасль в части типового проектирования искусственных сооружений. Взаимосвязь типовых проектов (ТП) и обязательного применения ТИМ заключается в следующем. Суть информационного моделирования состоит не просто в создании трехмерной модели, а в управлении информацией об объекте капитального строительства, частью которой являются и сведения о типовом проекте.

Об эффективности применения ТИМ в сфере проектирования линейных сооружений свидетельствует опыт многих зарубежных стран [2, 3]. Создание цифровой информационной модели сооружения позволяет сократить сроки разработки проекта и строительства за счет минимизации коллизий и обосновать инвестиции с высокой степенью проработки [4, 5].

Аналогичные цели преследует типизация проектных решений: оптимизация конструктивных решений и возможность избежать лишних расходов на этапе согласований проекта и при строительстве [6]. Существующий Реестр типовой проектной документации, сформированный Минстроем [7] в рамках системы экономически эффективной проектной документации повторного использования, представляет собой файл в формате xls с оглавлением, показателями и перечнем объектов со ссылкой на файлы в формате pdf. Данный формат не полностью отвечает современным требованиям автоматизации процессов проектирования и внедрения ТИМ, поскольку не предполагает создания и хранения информационных моделей в открытом формате ifc. Из этого следует, что современное типовое проектирование в нашей стране на данный момент не основывается на технологии информационного моделирования.

Методы, используемые в области архитектуры, проектирования, строительства и эксплуатации, быстро развиваются, и эта эволюция неизменно определяется ростом новых требований в части применения ТИМ. С приходом технологий информационного моделирования меняется подход к типовому проектированию. Проектировщики не разрабатывают проектную документацию в привычном виде ручного итерационного подбора конструктивных решений и их длительных согласований, а следуют автоматизированным алгоритмам оптимизации конструкции: от момента задания исходных данных элемента до получения из цифровой информационной модели чертежей. Поэтому большое внимание сейчас должно уделяться предпроектному анализу – оценке и выявлению исходных данных, т. е. назначению необходимого и достаточного перечня атрибутов элементов модели [8].

Для каждого из этапов жизненного цикла сооружения в цифровой информационной модели назначается свой перечень необходимых атрибутов элементов моста и их материалов [9]. Для стадии проекта преимущественно требуются атрибуты, представляющие архитектурные, технические и технологические решения мостовых сооружений [10, 11], например:

- для железобетонных балок пролетного строения (ПС) в целом: тип конструкции, номер ТП, год выпуска ТП, наличие строительного подъема, тип исполнения и др.;
- для бетона: класс по прочности, марка по водонепроницаемости, марка по морозостойкости, модуль упругости и др.;
- для арматуры: класс, профиль, диаметр, шаг, усилие натяжения (для напрягаемой арматуры) и др.

Для стадии строительства цифровая информационная модель содержит атрибуты, обеспечивающие выполнение строительно-монтажных работ, включая проект производства работ с применением предусмотренного для этого информационно-технического обеспечения [12].

На стадии эксплуатации потребуются атрибуты, необходимые для контроля и диагностики сооружения, например сведения о техническом состоянии элементов, о наличии, степени развития и локализации дефектов в конструкциях и т. д. [13, 14].

Методы исследования

Выполнен анализ применения типовых проектов железобетонных пролетных строений и опор в эксплуатируемых сооружениях на основе Автоматизированной базы данных

мостов Федерального дорожного агентства (АБДМ ФДА). Всего на железобетонных мостовых сооружениях федеральных дорог применяется более 200 различных типовых проектов пролетных строений и около 50 типовых проектов опор. На рис. 1 представлена диаграмма распределения применения пролетных строений с типовым и индивидуальным проектом конструкции.

Были проанализированы и выявлены наиболее распространенные типовые проекты конструкций. Для отдельных конфигураций типовых проектов в рамках данного исследования были разработаны цифровые информационные модели.

Сейчас на федеральных дорогах РФ эксплуатируется 6,2 тыс. железобетонных автодорожных мостовых сооружений, из которых 1,1 тыс., согласно оценке технического состояния по АБДМ ФДА, исходя из анализа имеющихся дефектов, влияющих на безопасность, долговечность и грузоподъемность сооружения, находятся в неудовлетворительном состоянии, 136 – в предаварийном. И поскольку ежегодно для более 1,5 тыс. мостовых сооружений разрабатываются проекты ремонтов [15], с учетом новых требований, потребуется создание ЦИМ сооружения. На рис. 2 представлены наиболее распространенные типовые проекты железобетонных пролетных строений эксплуатируемых автодорожных мостов.

Нормативный срок службы железобетонных пролетных строений на автодорогах составляет около 50–60 лет, по истечении которых фасадные балки, а также нередко и промежуточные получают значительные повреждения деградационного характера, свидетельствующие

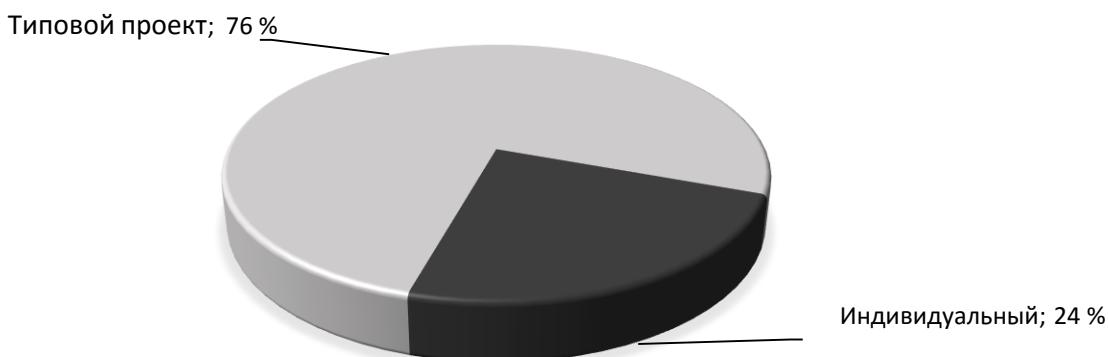


Рис. 1. Распределение применения пролетных строений с типовым и индивидуальным проектом конструкции

об их физическом износе [16]. Анализируя фактический срок службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов, можно спрогнозировать количество искусственных сооружений, на которых в ближайшие годы возникнет необходимость ремонта пролетных строений с частичной или полной заменой балок. Как было отмечено выше, при разработке проекта ремонта потребуется формирование эксплуатационной цифровой информационной модели сооружения. На рис. 3 представлена

диаграмма распределения типовых проектов пролетных строений по сроку службы.

Таким образом, для мостовых сооружений, на которых применяются указанные выше (см. рис. 2 и 3) типовые конструкции пролетных строений, в ближайшие годы потребуется разработка ЦИМ в рамках реализации проекта ремонта или реконструкции сооружений.

На основе проведенного анализа распространенности и состояния конструкций пролетных строений были выбраны для создания

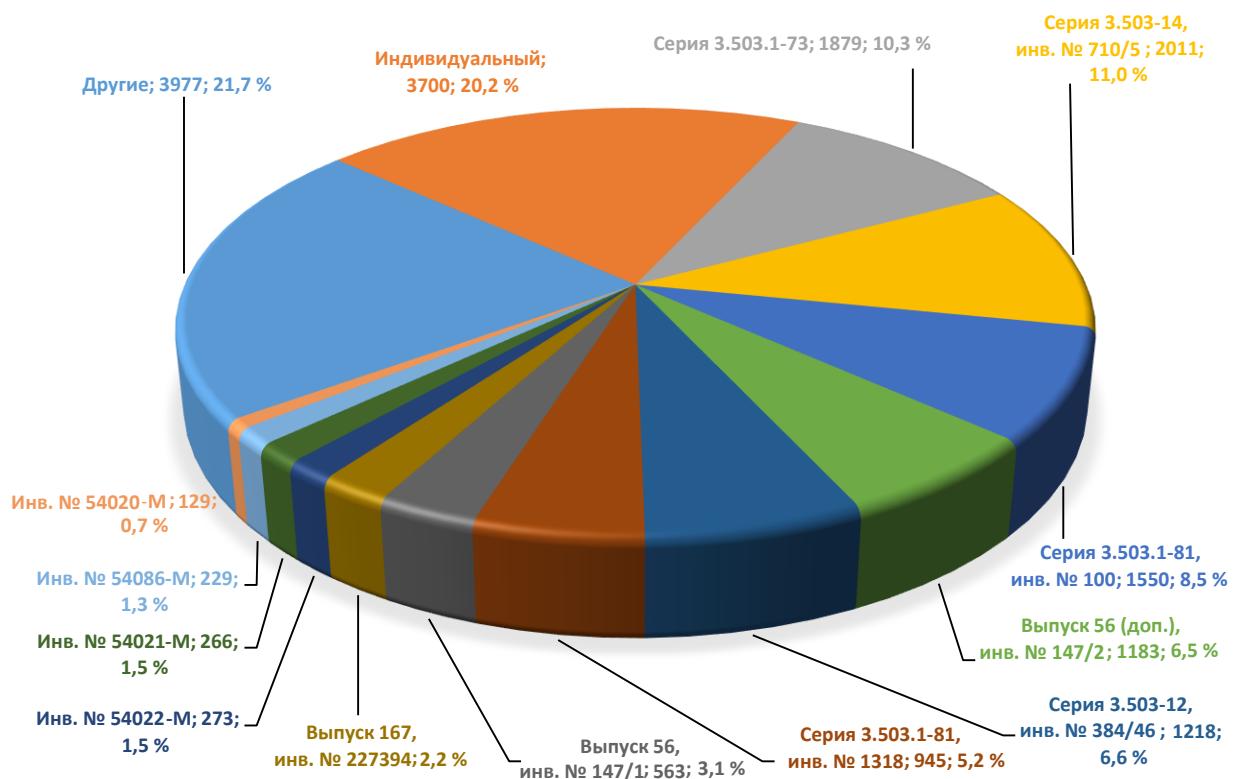


Рис. 2. Распределение количества конструкций проектов пролетных строений

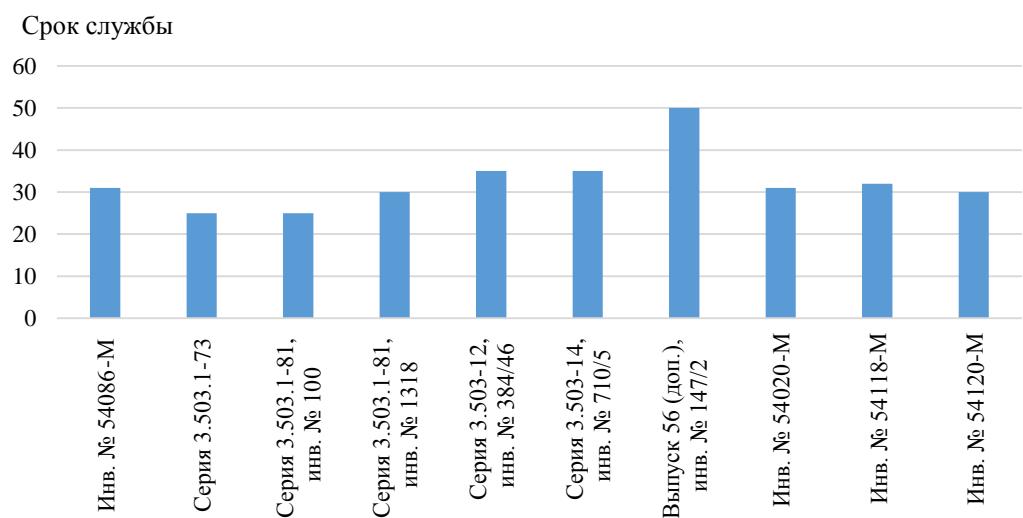


Рис. 3. Распределение некоторых типовых проектов железобетонных пролетных строений по сроку службы

ЦИМ следующие типовые проекты железобетонных пролетных строений:

- 1) серия 3.503.1-73;
- 2) серия 3.503-14, инв. № 710/5;
- 3) серия 3.503.1-81, инв. № 100;
- 4) выпуск 56 (доп.), инв. № 147/2;
- 5) серия 3.503-12, инв. № 384/46;
- 6) серия 3.503.1-81, инв. № 1318;
- 7) выпуск 56, инв. № 147/1;
- 8) выпуск 167, инв. № 227;
- 9) инв. № 54022-М;
- 10) инв. № 54021-М;
- 11) инв. № 54086-М;
- 12) инв. № 54020-М.

Типизация элементов мостов относится прежде всего к пролетным строениям и опорам, но, как следует из анализа базы АБДМ ФДА (рис. 4), конструкции опор чаще имеют индивидуальный проект ввиду разнообразия геологических условий, иногда информация о примененном проекте утеряна.

Результаты исследования

ЦИМ типовых несущих элементов мостовых сооружений были разработаны с помощью программного обеспечения Tekla Structures и Midas CIM. На рис. 5 представлена цифровая информационная модель балки полной длиной 24 м пролетного строения серии 3.503.1-81, инв. № 54086-М и ее атрибуты.

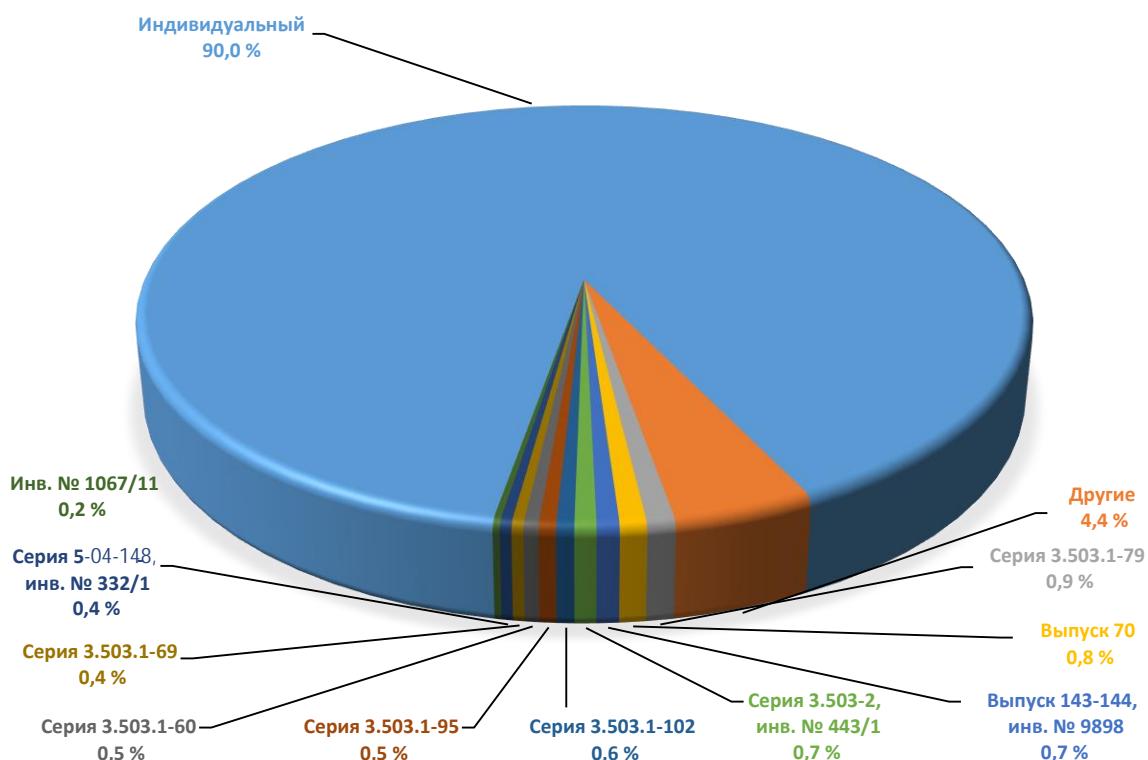


Рис. 4. Распределение количества проектов конструкций промежуточных опор

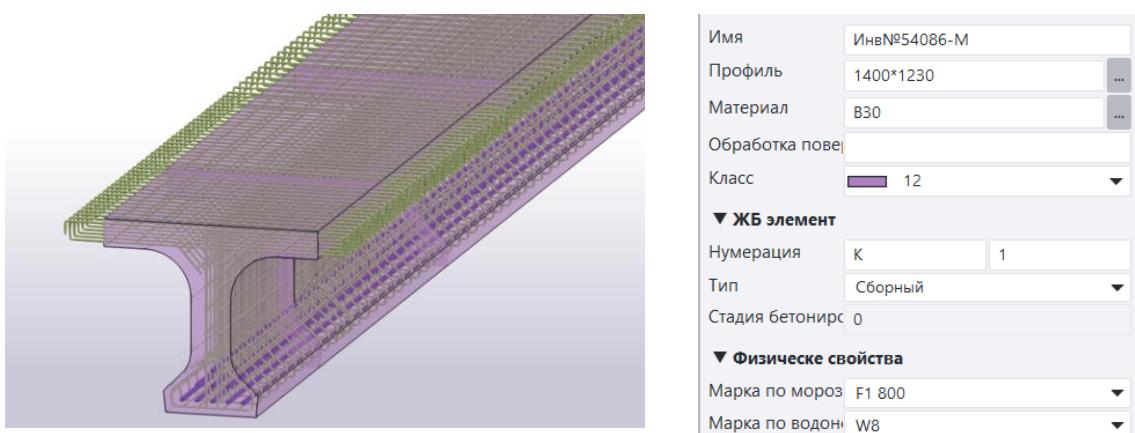


Рис. 5. ЦИМ балки полной длиной 24 м пролетного строения серии 3.503.1-81, инв. № 54086-М

Модель содержит армирование балки с соответствующими атрибутами, как то: диаметр, шаг, защитный слой арматуры, класс арматуры, усилие натяжения для напрягаемой арматуры (рис. 6).

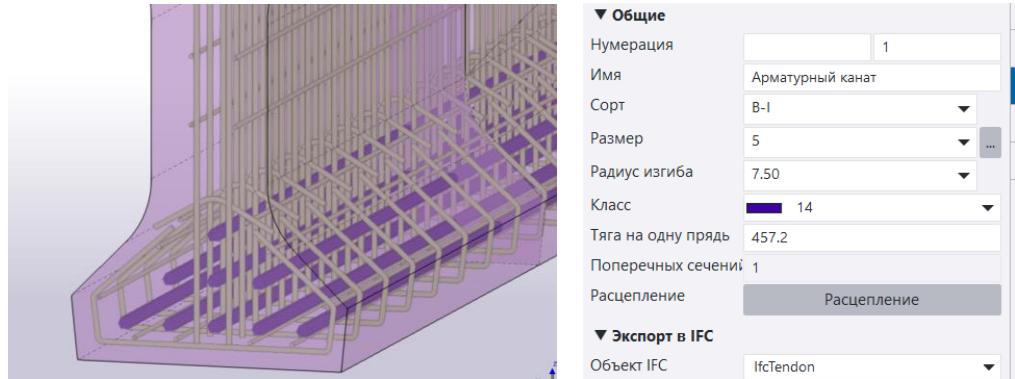


Рис. 6. Фрагмент армирования ЦИМ балки

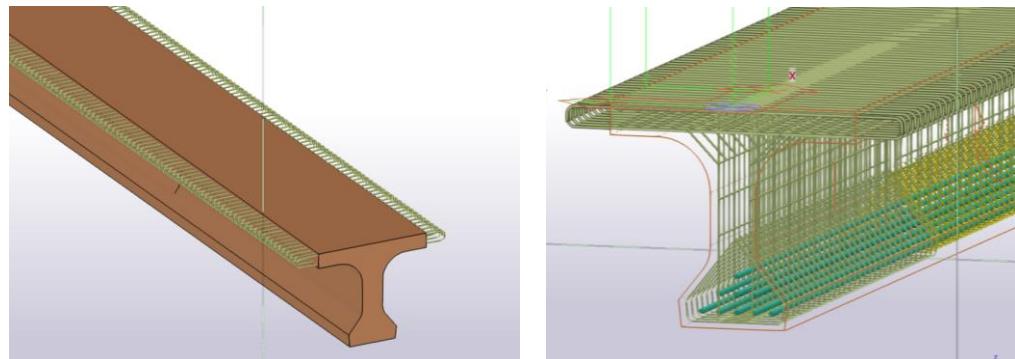


Рис. 7. ЦИМ балки длиной 24 м пролетного строения серии 3.503.1-81, инв. № 100

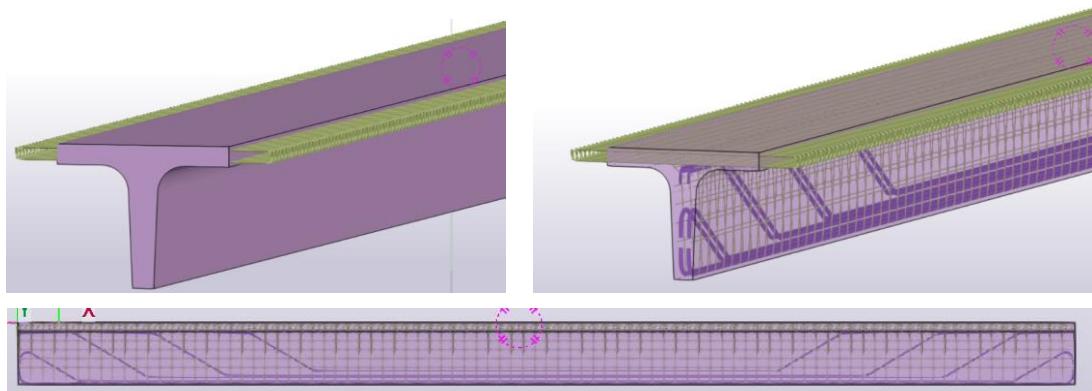


Рис. 8. ЦИМ балки длиной 18 м пролетного строения серии 3.503.1-73

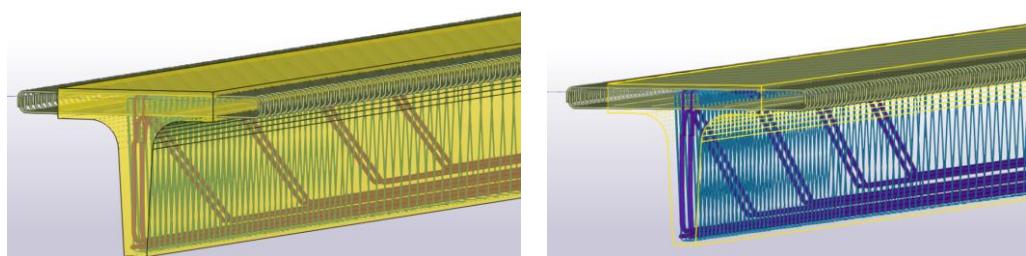


Рис. 9. ЦИМ балки длиной 18 м пролетного строения серии 3.503.1-81, инв. № 54118-М

На рис. 7–13 показаны цифровые информационные модели пролетных строений и опор отдельных типовых проектов.

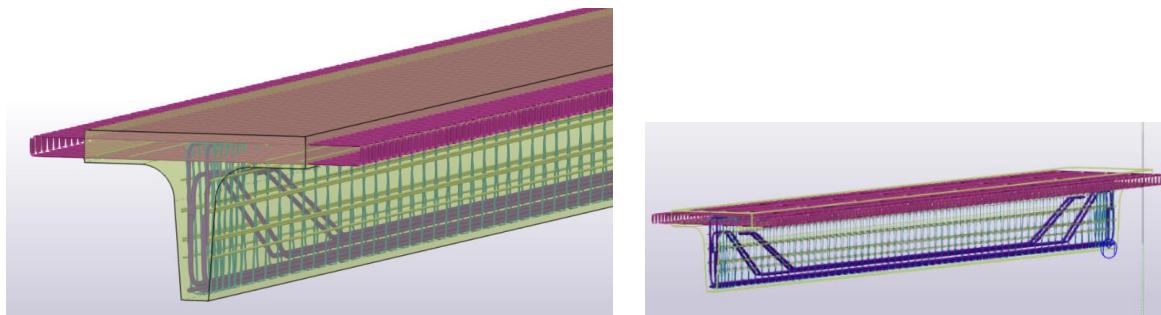


Рис. 10. ЦИМ балки длиной 9 м пролетного строения серии 3.503.1-81, инв. № 54020-М

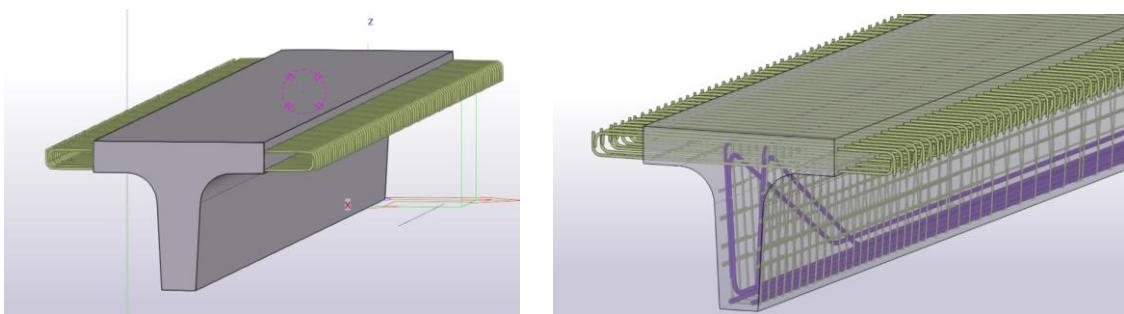


Рис. 11. ЦИМ балки длиной 9 м пролетного строения серии 3.503.1-81, инв. № 54120-М

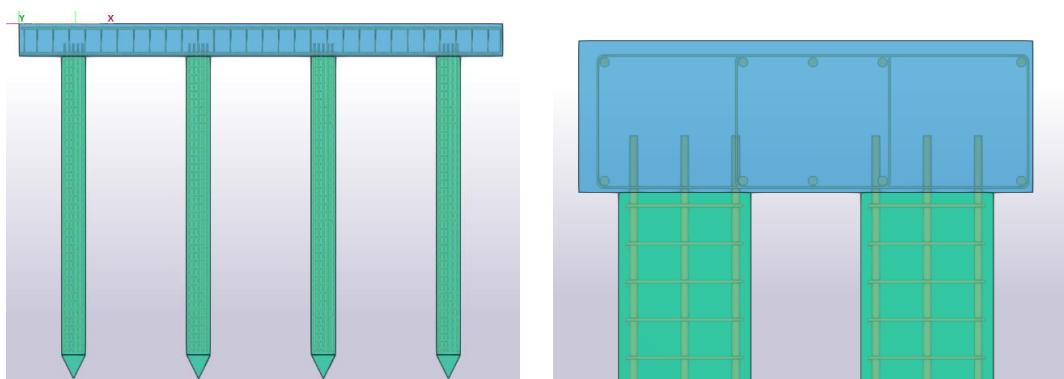


Рис. 12. ЦИМ промежуточной опоры, выпуск 70, габарит Г-6

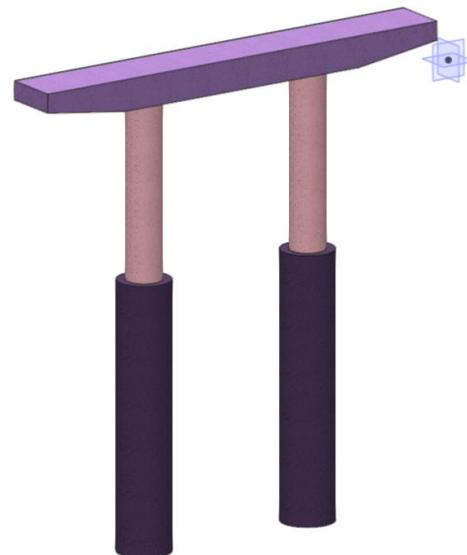


Рис. 13. ЦИМ промежуточной опоры серии 3.503.1-102, габарит Г-8

Выводы

В результате проведенного исследования были разработаны ЦИМ балок железобетонных пролетных строений и промежуточных опор наиболее распространенных проектов конструкций. Для эффективного применения технологий информационного моделирования в проектной отрасли реестр типовой документации должен содержать цифровые информационные модели искусственных сооружений в открытом формате. Это позволит работать в единой среде общих данных, используя разные форматы файлов ЦИМ. На сегодняшний день не разработаны ЦИМ эле-

ментов несущих конструкций мостовых сооружений (балок пролетных строений, опор) и, соответственно, отсутствует банк данных с подобной информацией. Работу в этом направлении следует вести, поскольку в ближайшие годы существенно возрастет потребность в таком банке данных при подготовке проектной документации на ремонты сооружений. Наличие банка данных информационных моделей типовых проектов основных несущих конструкций мостовых сооружений существенно облегчит и ускорит процесс создания ЦИМ сооружения и при разработке проектной документации.

Список источников

1. Безопасные качественные дороги / Минтранс России : [сайт]. URL: <https://bkdrf.ru/?ysclid=m7cs6fl5dj906632541> (дата обращения: 25.10.2024).
2. Ильинова В. В., Мицевич В. Д. Международный опыт использования BIM-технологий в строительстве // Российский внешнеэкономический вестник. 2021. С. 15.
3. Казаринов А. В., Куприяновский В. П., Талапов В. В. Международный опыт и тенденции развития технологии информационного моделирования применительно к жизненному циклу объектов железнодорожной инфраструктуры // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Vol. 8, No.12, November. P. 94–112.
4. Ефимов С. В., Кокоева Е. С. Анализ зарубежных стандартов в сфере информационного моделирования сооружений // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности : сборник научных статей XII Международной научной конференции, Казань, 30–31 декабря 2021 года. Часть 1. Казань : Конверт, 2021. С. 57–62. EDN WMMNIL.
5. Halittula H., Aapaoja A., Haapasalo H. The Contemporaneous use of Building Information Modeling and Relational Project Delivery Arrangements // Procedia Economics and Finance. 2015. May. P. 532–539.
6. Пантелеев Ю. А. Типовое проектирование. XXI век // Жилищное строительство. 2015. С. 76–77.
7. Типовая проектная документация // Минстрой России : [сайт]. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/trades/gradostroitelnaya-deyatelnost-i-arhitektura/17/> (дата обращения: 18.09.2024).
8. Girardet A., Boton C. A parametric BIM approach to foster bridge project design and analysis // Automation in Construction. 2021. Vol. 126, June. P. 101–123.
9. СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве : свод правил / Минстрой России. Москва, 2017. 195 с.
10. Требования к информационным моделям автомобильных дорог для прохождения экспертизы / Московская государственная экспертиза. Москва, 202. 48 с.
11. Требования к цифровым информационным моделям объектов капитального строительства, представляемым для проведения экспертизы. Санкт-Петербург, 2020. 182 с.
12. Nguyen D., Jeon C., Roh G. BIM-based preassembly analysis for design for manufacturing and assembly of prefabricated bridges // Automation in Construction. 2024. Vol. 160, April. P. 327–338.
13. Shen C., Jiang B., Yue L. LSTM combined with BIM technology in the management of small and medium-sized span highway concrete beam bridges // Results in Engineering. 2023. Vol. 20, December. P. 101–123.
14. Management of structural monitoring data of bridges using BIM / M. Juan, N. Gibbons, C. Middleton [et al.] // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering. 2016. Vol. 170, November. P. 204–218.
15. Ефимов С. В., Паторняк А. В., Чаплин И. В. Применение технологии информационного моделирования при разработке проекта ремонта мостового сооружения // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 3 (60). С. 113–121.
16. Дормидонтова Т. В., Варданян Т. М. Оценка технического состояния мостовых сооружений // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. 2018. С. 199–203.

References

1. Safe Quality Roads. Ministry of Transport of Russia: [site]. (In Russ.). URL: <https://bkdrf.ru/?ysclid=m7cs6fl5dj906632541>.
2. Ilyinova V. V., Micevich V. D International experience of using BIM-technologies in construction. *Russian Foreign Economic Journal*. 2021. P. 15. (In Russ.).
3. Kazarinov A. V., Kupriyanovskiy V. P., Talapov V. V. International experience and trends in the development of information modelling technology as applied to the life cycle of railway infrastructure objects. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020. Vol. 8, No. 12, November. P. 94–112. (In Russ.).
4. Efimov S. V., Kokoeva E. S. Analysis of foreign standards in the field of information modelling of structures. *Priority Directions of Innovation Activity in Industry. Proceedings of the XII International Scientific Conference*, Kazan, 30–31 December 2021. Part 1. Kazan: Convert; 2021. P. 57–62. (In Russ.).
5. Halttula H., Aapaoja A., Haapasalo H. The Contemporaneous use of Building Information Modeling and Relational Project Delivery Arrangements. *Procedia Economics and Finance*. 2015. May. P. 532–539.
6. Pantelev Yu. A. Typical design. XXI century. *Housing Construction*. 2015. P. 76–77. (In Russ.).
7. Typical design documentation. *Ministry of Construction of Russia: [site]*. (In Russ.). URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/trades/gradostroitelnaya-deyatelnost-i-architektura/17/>.
8. Girardet A., Boton C. A parametric BIM approach to foster bridge project design and analysis. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 126, June. P. 101–123.
9. SP 333.1325800.2020. Information modelling in construction. A set of rules. Ministry of Construction of Russia. Moscow; 2017. 195 p. (In Russ.).
10. Requirements for information models of motorways to pass the expertise. Moscow State Expertise. Moscow; 2021. 48 p. (In Russ.).
11. Requirements for digital information models of capital construction objects submitted for expertise. St. Petersburg; 2020. 182 p. (In Russ.).
12. Nguyen D., Jeon C., Roh G. BIM-based preassembly analysis for design for manufacturing and assembly of prefabricated bridges. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 160, April. P. 327–338.
13. Shen C., Jiang B., Yue L. LSTM combined with BIM technology in the management of small and medium-sized span highway concrete beam bridges. *Results in Engineering*. 2023. Vol. 20, December. P. 101–123.
14. Juan M., Gibbons N., Middleton C. [et al.]. Management of structural monitoring data of bridges using BIM. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering*. 2016. Vol. 170, November. P. 204–218.
15. Efimov S. V., Patornjak A. V., Chaplin I. V. Application of information modelling technology in the development of bridge structure repair project. *Bulletin of Engineering School of Far Eastern Federal University*. 2024;(60):113–121. (In Russ.).
16. Dormidontova T. V., Vardanyan T. M. Assessment of technical condition of bridge structures. *Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Construction*. 2018. P. 199–203. (In Russ.).

Информация об авторах

С. В. Ефимов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Е. С. Кокоева – аспирант кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

S. V. Efimov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Bridges Department, Siberian Transport University.

E. S. Kokoeva – Postgraduate of the Bridges Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 20.12.2024; одобрена после рецензирования 19.02.2025; принятая к публикации 11.03.2025.

The article was submitted 20.12.2024; approved after reviewing 19.02.2025; accepted for publication 11.03.2025.

Информация для авторов

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

2. Статья предоставляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (границы Times New Roman, кегль 14 pt; поля: верхнее и нижнее – 20, левое – 30, правое – 10 мм). Файл с текстом статьи должен быть назван фамилией автора (например: Иванов.doc).

3. Статья должна содержать:

- тип статьи (например, научная, обзорная, рецензия);
- УДК;
- название статьи;
- фамилию, имя и отчество каждого автора, место его работы/учебы, город, страну, ученую степень, звание, должность;
- аннотацию на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- библиографический список на русском и английском языках.

4. Список источников составляется в порядке упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Список должен содержать не менее 10 источников, из них собственных статей должно быть не более 30 %.

5. Графический материал должен быть выполнен в графических редакторах, поддерживающих векторную и растровую графику. Иллюстрации должны быть четкими, все подписи на рисунке должны хорошо читаться и иметь расшифровку. Если в тексте есть фотография, отсканированный рисунок, то они обязательно должны быть представлены также отдельным файлом в исходном графическом формате (например: jpeg, tiff).

6. Статья для опубликования в журнале и заявка отправляются по адресу: vestniksgups@sibgups.ru.

7. В редакцию представляются оригиналы документов: экспертное заключение о возможности опубликования статьи, статья и заявка.

8. Публикация статей в журнале бесплатная.

Более подробную информацию по вопросам опубликования статей и размещения другой информации в журнале можно найти на сайте издания.



www.stu.ru/science



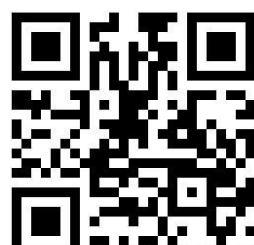
vestniksgups@sibgups.ru



+7 383 328-04-36



630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук,
191, корп. 3, комн. 307



Главный редактор *А. Л. Манаков*
Заместитель главного редактора *А. Д. Абрамов*
Заместитель главного редактора *С. В. Карасев*
Ответственный секретарь *М. С. Галай*
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*
Редактор *Е. Е. Рыжкова*
Корректор *А. А. Игумнов*
Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*
Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

Адрес редакции

630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, корп. 3, комн. 307.
Телефон/факс: (383) 328-04-36.
E-mail: vestniksgups@sibgups.ru

Адрес издателя

630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Телефон/факс: (383) 328-03-81.
E-mail: bvu@stu.ru

Подписано в печать 21.03.2025. Дата выхода в свет 24.03.2025

Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 14,6 уч.-изд. л., 15,5 усл.-печ. л. Заказ № 4000

Цена свободная

Отпечатано в издательстве СГУПС.
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
Тел. (383) 328-03-81; e-mail: bvu@stu.ru



Издательство Сибирского государственного
университета путей сообщения

ISSN 1815-9265
Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения
2025. № 1 (73), 1–124