

ISSN 1815-9265

# ВЕСТНИК

Сибирского государственного  
университета путей сообщения

№ 2 (65). 2023 16+





## **УЧРЕДИТЕЛЬ**

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»*

## **Состав редколлегии**

*Главный редактор*

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

*Заместитель главного редактора*

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

*Заместитель главного редактора*

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

*Ответственный секретарь*

*Галай Марина Сергеевна* – канд. техн. наук

*Члены редколлегии:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Редактор перевода текста на английский язык**

*Степачкова Ирина Игоревна* – старший преподаватель

**Редакторы:** *Е. Е. Рыжкова, А. О. Елесина, Ю. В. Печенкина*

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

**Макет, верстка** *Ю. В. Борцовой*

**Дизайн обложки** *А. С. Петренко*

**Сайт журнала:**

[www.stu.ru](http://www.stu.ru) (раздел «Научная деятельность»; журнал «Вестник СГУПС»)

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

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

## **FOUNDER**

*The Siberian Transport University*

## **Editors and Editorial Board**

*Editor-in-Chief*

**A. L. Manakov**, Doctor of Engineering, Professor

*Deputy Editor*

**A. D. Abramov**, Doctor of Engineering, Professor

*Deputy Editor*

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

*Executive Secretary*

**M. S. Galay**, Candidate of Engineering

*Editors*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*English Text Reviewer*

**I. I. Stepachkova**, Senior Lecturer

*Text Reviewers* **E. E. Ryzhkova**, **A. O. Elesina**, **Yu. V. Pechenkina**

*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](mailto:vestniksgups@sibgups.ru)

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

**ISSN: 1815-9265**

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

**№ 2 (65) · 2023 · АПРЕЛЬ – ИЮНЬ · 16+**

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

---

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **Транспорт**

- Витолин С. В., Федорова В. С., Колосков Р. С., Андреянов И. М., Егоров Д. Д.* Влияние скорости автомобилей на безопасность дорожного движения в городе ..... 5
- Богданова Е. С., Неволин Д. Г.* Совершенствование взаимодействия участников транспортного процесса при использовании информационно-справочных систем ..... 13
- Дмитренко А. В., Пушкарева Л. И., Ларченко Е. А.* Установление среднего веса грузовых поездов в зависимости от весовой нормы при ограниченной длине станционных путей ..... 20
- Матвеев А. Г., Менухова Т. А.* Метод экстраполяции пассажиропотоков по геолокации мобильных устройств на городском пассажирском транспорте ..... 29

### **Строительство и архитектура**

- Савельев С. В., Юрченко А. А., Литовченко Р. Е.* Обоснование параметров катка для повышения эффективности уплотнения земляных насыпей в транспортном строительстве ..... 40
- Коянкин А. А., Митасов В. М.* Расчет сборно-монолитного изгибаемого элемента по деформациям и трещиностойкости ..... 48
- Шахов С. А.* Получение искусственных почвогрунтов для системы биологической защиты откосов железных и автомобильных дорог ..... 55
- Семейко Н. В., Савенко А. И.* Влияние автомобилей на диссипативные свойства пролетных строений автодорожных мостов ..... 64
- Продоус О. А., Шлычков Д. И.* Оценка погрешностей гидравлического расчета сетей водоотведения с внутренними отложениями ..... 74
- Маликов М. Ю., Соловьев Л. Ю., Неровных А. А.* Экспериментальные исследования скорости роста усталостных трещин в сварных конструкциях железнодорожных мостов ..... 82
- Разуваев Д. А., Ланис А. Л., Чахлов М. Г., Печенкин Р. С.* Коэффициенты морозного пучения силикатизированных глинистых грунтов ..... 91

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

**№ 2 (65) · 2023 · April – June · 16+**

*Issued quarterly. Established in 1999*

---

## **CONTENTS**

### **Transport**

- S. V. Vitolin, V. S. Fedorova, R. S. Koloskov, I. M. Andreyanov, D. D. Egorov.* Impact of car speed on traffic safety in the city .....5
- E. S. Bogdanova, D. G. Nevolin.* Improving the interaction of participants in the transport process when using information and reference systems .....13
- A. V. Dmitrenko, L. I. Pushkareva, E. A. Larchenko.* The establishment of the average weight of freight trains depending on the weight rate with a limited length of station tracks .....20
- A. G. Matveev, T. A. Menukhova.* Method for extrapolation of passenger flows by geolocation of mobile devices in urban passenger transport .....29

### **Building and Architecture**

- S. V. Savelyev, A. A. Yurchenko, R. E. Litovchenko.* Road roller parameters substantiation to improve the efficiency of compacting in transport construction .....40
- A. A. Koyankin, V. M. Mitasov.* Calculation of a prefabricated monolithic at the same time deformable bent element according to the second group of limit states .....48
- S. A. Shakhov.* Obtaining artificial soils for the biological protection system of railway and highway slopes.....55
- N. V. Semeyko, A. I. Savenko.* Vehicle influence on road bridge superstructure damping.....64
- O. A. Prodous, D. I. Shlychkov.* Estimation of errors in the hydraulic calculation of sewerage networks with internal deposits .....74
- M. Yu. Malikov, L. Yu. Solovyev, A. A. Nerovnykh.* Experimental studies of fatigue crack growth rate in welded structures of railway bridges .....82
- D. A. Razuvaev, A. L. Lanis, M. G. Chakhlov, R. S. Pechenkin.* Frost heaving coefficients of silicified clay soils.....91

# ТРАНСПОРТ

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 5–12.  
The Siberian Transport University Bulletin. 2023. No. 2 (65). P. 5–12.

## ТРАНСПОРТ

Научная статья  
УДК 656.13  
doi 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_5

### Влияние скорости автомобилей на безопасность дорожного движения в городе

Сергей Владимирович Витолин<sup>1✉</sup>, Виолетта Сергеевна Федорова<sup>2</sup>,  
Роман Сергеевич Колосков<sup>3</sup>, Игорь Михайлович Андреянов<sup>4</sup>, Даниил Дмитриевич Егоров<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

<sup>1</sup> vitolinsv@mail.ru✉

<sup>2</sup> gortenzija6ws@yandex.ru

<sup>3</sup> 9\_pav\_9@mail.ru

<sup>4</sup> 87stalker77@mail.ru

<sup>5</sup> rufez10@gmail.com

**Аннотация.** Целью данной работы является оценка влияния скорости транспортных средств в населенных пунктах на безопасность дорожного движения. Распространенными местами концентрации дорожно-транспортных происшествий в крупных городах являются регулируемые перекрестки. Повороты налево – наиболее опасные маневры на регулируемых перекрестках, поэтому было проведено исследование фактических скоростей движения поворачивающих налево автомобилей. Наблюдение осуществлялось с помощью видеосъемки.

Анализ результатов обработки скоростей на регулируемых перекрестках в городах Волгоград и Волжский показал, что чем меньше радиус поворота, тем меньше скорость поворачивающих налево. Средняя скорость при повороте на радиусах от 23 до 40 м для легковых автомобилей составила 21,4–26,4 км/ч, для грузовых автомобилей – 19,2–21,0 км/ч. Средняя скорость поворачивающих налево на регулируемых перекрестках учитывается при расчете промежуточных тактов. В России рекомендуемое значение средней скорости 25 км/ч. В Германии расчетная скорость поворачивающих налево автомобилей зависит от радиуса поворота: 18 км/ч при радиусе менее 10 м и 25 км/ч при радиусе более 10 м. Фактическая средняя скорость поворачивающих налево, как показали наблюдения, может быть как выше, так и ниже российских рекомендаций. Чем меньше скорость поворачивающих налево автомобилей и больше радиус поворота на перекрестке, тем больше времени требуется для проезда автомобилем конфликтных точек. Если времени для проезда конфликтных точек недостаточно, высока вероятность дорожно-транспортного происшествия. Для повышения безопасности дорожного движения на таких сложных узлах улично-дорожной сети города, как регулируемые перекрестки, необходима детализация входящих параметров управления транспортно-пешеходными потоками.

**Ключевые слова:** скорость, безопасность дорожного движения, дорожно-транспортное происшествие, регулируемый перекресток, повороты налево

**Для цитирования:** Влияние скорости автомобилей на безопасность дорожного движения в городе / С. В. Витолин, В. С. Федорова, Р. С. Колосков, И. М. Андреянов, Д. Д. Егоров // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 5–12. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_5.

## TRANSPORT

Original article

### Impact of car speed on traffic safety in the city

Sergey V. Vitolin<sup>1✉</sup>, Violetta S. Fedorova<sup>2</sup>, Roman S. Koloskov<sup>3</sup>, Igor M. Andreyanov<sup>4</sup>,  
Daniil D. Egorov<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

<sup>1</sup> vitolinsv@mail.ru✉

<sup>2</sup> gortenzija6ws@yandex.ru

<sup>3</sup> 9\_pav\_9@mail.ru

<sup>4</sup> 87stalker77@mail.ru

<sup>5</sup> rufez10@gmail.com

**Abstract.** The purpose of this work is to assess the impact of vehicle speed in the city on traffic safety. Signalized intersections are common places where traffic accidents are concentrated in large cities. Left turns are the most dangerous maneuvers at signalized intersections, so an investigation of actual speeds for left-turning cars was carried out. Observations were carried out using video filming.

An analysis of the speed processing results at signalized intersections in Volgograd and Volzhsky showed that the smaller the turning radius, the lower the speed of turning left. The average turning speed with a radius of 23 to 40 m for cars was 21,4-26,4 km/h, for trucks – 19,2-21 km/h. The average speed of left turns at signalized intersections is taken into account when calculating meantime of cycles. In Russia, the recommended average speed is 25 km/h. In Germany, the design speed of cars turning left depends on the turning radius – 18 km/h with a radius of less than 10m and 25 km/h with a radius of more than 10m. The actual average speed of left turns, as observed, can be both higher and lower than the Russian recommendations. The lower the speed of cars turning left and the larger the signalized intersection, the longer it takes for the car to travel long-distance conflict points. If time is not enough, there is a high probability of a traffic accident. To improve road safety at such complex nodes of the city's road network as signalized intersections, it is necessary to detail the incoming parameters for managing transport and pedestrian flows.

**Keywords:** speed, traffic safety, traffic accident, signalized intersection, left turns

**For citation:** Vitolin S. V., Fedorova V. S., Koloskov R. S., Andreyanov I. M., Egorov D. D. Impact of car speed on traffic safety in the city. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(65):5–12. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_5.

### Введение

Исследованиям вопроса безопасности дорожного движения в зависимости от скорости движения в России уделяется большое внимание [1–4]. Чем выше скорость движения, тем больше время реагирования и тормозной путь автомобиля при экстренном торможении. На рис. 1 показано изменение доли погибших в зависимости от снижения скорости. При высоких скоростях даже увеличение скорости на

5 % приводит к существенному увеличению числа погибших в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [5].

Несмотря на то что в населенных пунктах не такие высокие разрешенные скорости движения, как на автомагистралях, тяжесть последствий ДТП для пешеходов весьма существенная. Именно поэтому вводятся ограничения скоростного режима, особенно у детских учебных заведений. В городах России разрешенная ско-

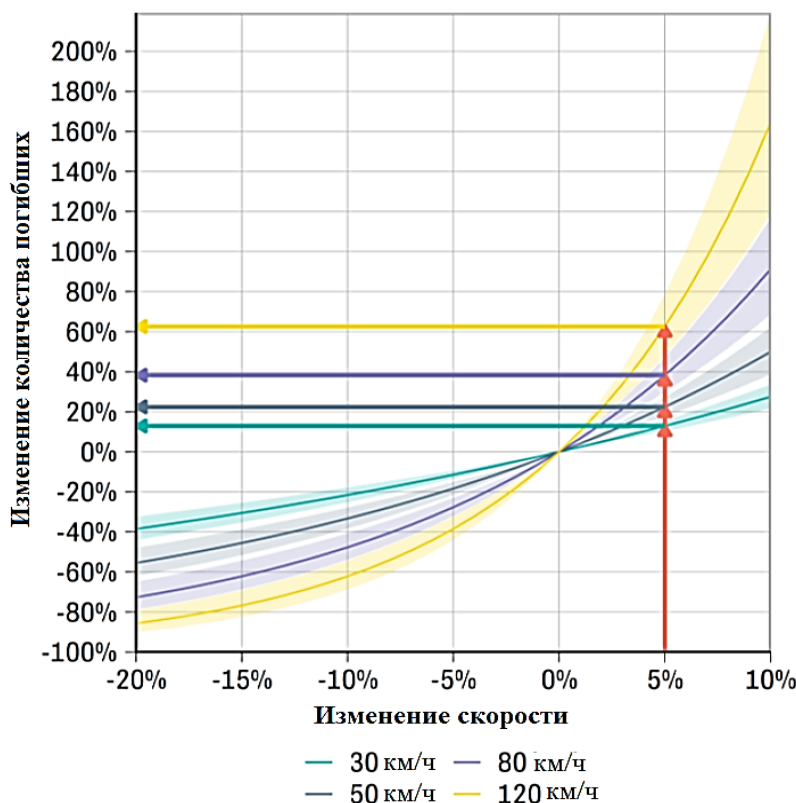


Рис. 1. Зависимость количества погибших в результате ДТП от изменения скорости движения автомобилей [5]

рость 60 км/ч, в Германии – 50 км/ч. У детских учебных заведений в России ограничивают скорость, как правило, до 40 км/ч, реже до 30 и 20 км/ч, в Германии – до 30 км/ч. Но даже при столкновении на скорости 40 км/ч, согласно европейскому исследованию [6], выживал только каждый второй взрослый пешеход (рис. 2).

#### Материалы и методы исследования

По данным статистических исследований Госавтоинспекции выведена сравнительная статистика ДТП погибших в городах Волгоград и Волжский за семь лет (рис. 3). В целом с 2016 по 2022 г. можно заметить снижение аварийности, но показатели по-прежнему не исключают проблему смертности на дороге, которая связана в первую очередь со скоростью при столкновении автомобиля с пешеходом или велосипедистом.

Распространенными местами концентрации ДТП являются регулируемые перекрестки (РП).

Влияние скорости на количество несчастных случаев наиболее заметно в городах, где имеет место взаимодействие нескольких групп участников дорожного движения: автомобилей, пешеходов, велосипедистов. Кроме того, высокая скорость отягчает последствия ДТП, произошедших по другим причинам.

Повороты налево являются наиболее опасными маневрами на РП. При большой доли поворачивающих налево автомобилей вместо РП рекомендуется устраивать кольцевые пересечения [7]. Средняя скорость в России для расчета промежуточных тактов при расчете цикла светофорного регулирования поворачивающих налево 25 км/ч [8], в Германии [9]

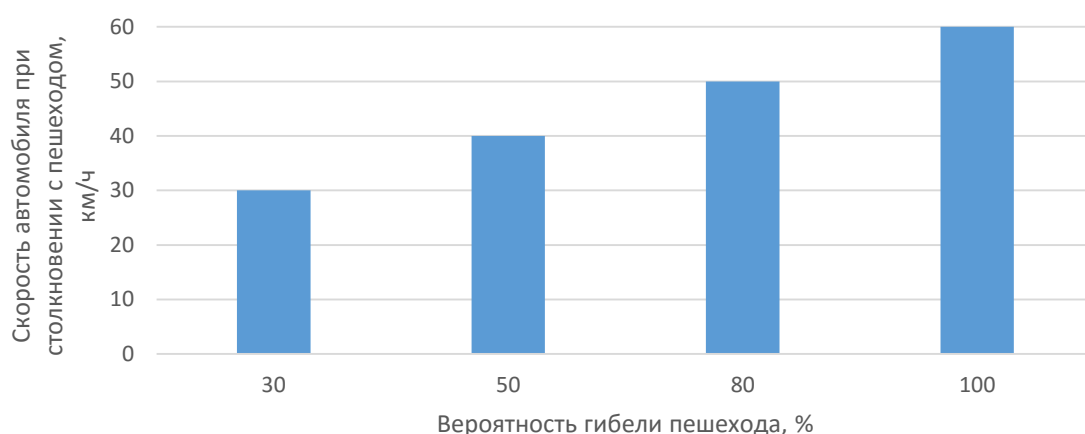


Рис. 2. Вероятность несчастного случая для пешехода в зависимости от скорости автомобиля при столкновении (на основе исследования в Германии и Швейцарии в 1990 г.) [6]

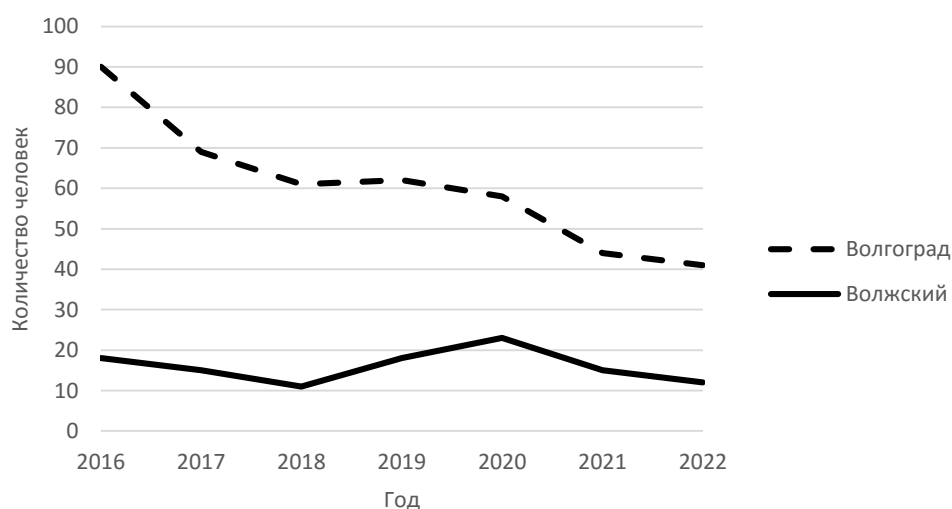


Рис. 3. Статистика погибших в ДТП по Волгограду и Волжскому



скорость поворачивающих налево автомобилей зависит от радиуса поворота – 18 км/ч при радиусе менее 10 м и 25 км/ч при радиусе более 10 м.

Были выбраны конфликтные РП в Волгограде и Волжском, проанализирована статистика ДТП и проведено исследование фактических скоростей движения для поворачивающих налево автомобилей. С целью определения скоростей движения автомобилей, совершающих поворот налево на РП, производился анализ видеосъемки данных перекрестков. В результате обработки видеоматериала собирались данные о типах транспортных средств, времени, расстоянии и скорости их движения.

Для определения времени поворота одного автомобиля и более точного установления начала и конца движения путь автомобиля просматривался по кадрам (рис. 4). По точкам начала и конца движения производился замер времени с помощью секундомера с точностью до миллисекунд.

Расстояние движения при повороте налево рассчитывалось с помощью спутниковых карт и программы Autodesk AutoCAD. Рассматриваемый перекресток масштабировался по карте и переносился в систему AutoCAD для определения длины участка в метрах (рис. 5).

Таким образом, были получены значения времени поворота  $t$ , с, и расстояния движения



Рис. 4. Определение времени поворота:  
а – начало маневра; б – конец маневра

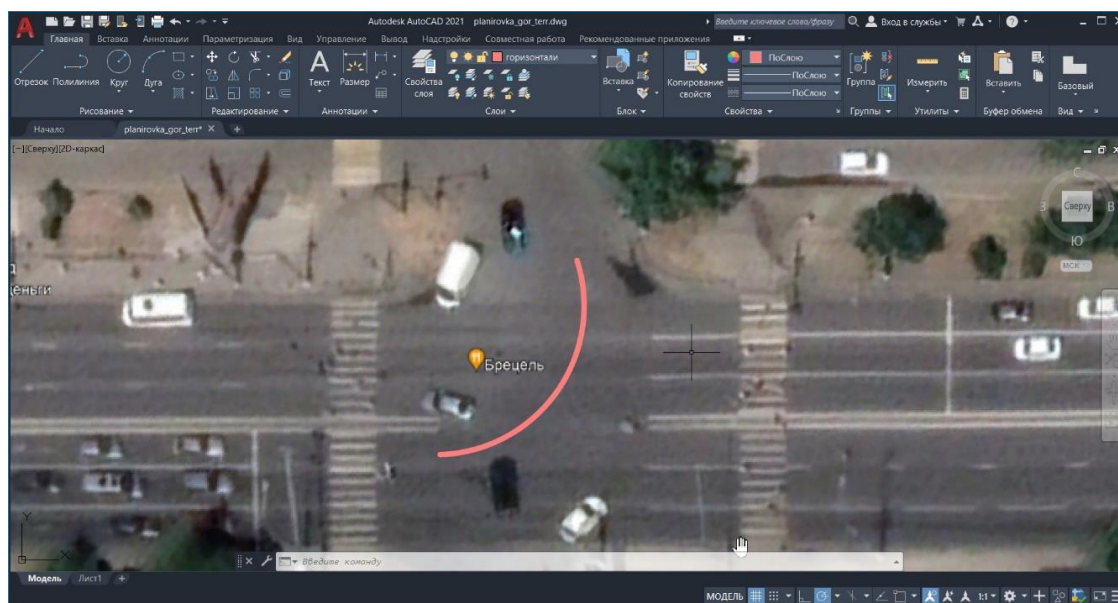


Рис. 5. Определение длины участка в программе Autodesk AutoCAD

$S$ , м, для каждого автомобиля. Чтобы рассчитать значения скорости, км/ч (рис. 6), использовали формулу

$$V = \frac{S}{t} \cdot 3,6.$$

Пример исследуемого перекрестка представлен на рис. 7.

#### Результаты исследования

В период с 2016 по 2022 г. на перекрестках, по данным карты, выявлено 37 ДТП. Наиболее частый вид ДТП – столкновения. За указанный период произошло 29 столкновений транспортных средств, 18 из них – при повороте налево.

Для определения процентной обеспеченности скоростей были составлены гistogramмы распределения скоростей легковых и грузовых автомобилей (рис. 8).

Полученная процентная обеспеченность скоростей движения автомобилей на обозначенных перекрестках представлена в таблице.

Таким образом, были получены данные распределения скоростей автомобилей при повороте налево. Было установлено, что при изменении радиуса  $R$  с 23 до 40 м средняя скорость для легковых автомобилей менялась от 21,4 до 26,4 км/ч.

Информирование водителей об их скорости движения может быть различным. На рис. 9 представлены методы из немецкого исследования [10].

По данным этого исследования, диалоговый дисплей в Германии являлся наиболее эффективным методом информирования, нейтральное информирование имеет наименьший эффект.

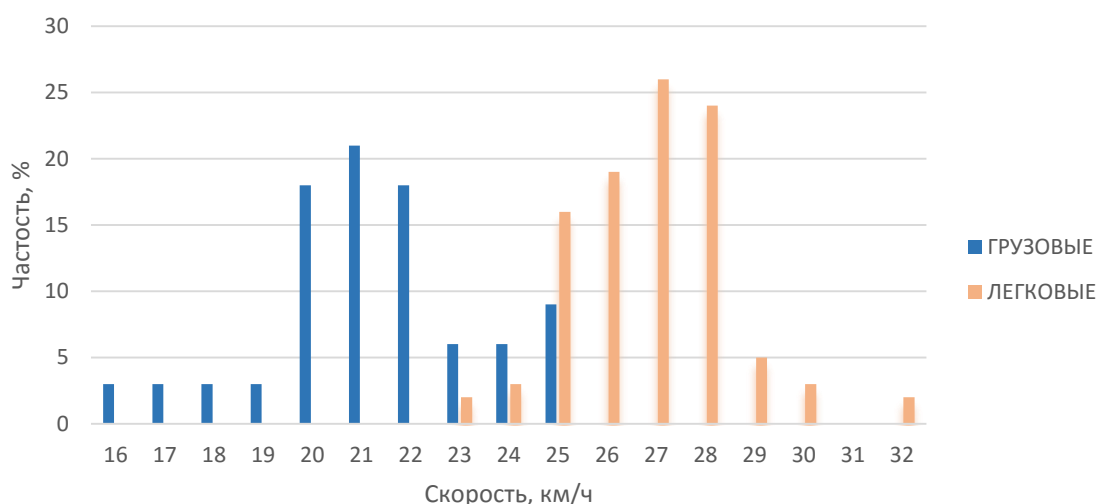


Рис. 6. Распределение скоростей легковых и грузовых автомобилей на перекрестке улиц Мясникова – Николая Отрады (Волгоград)

а)



б)

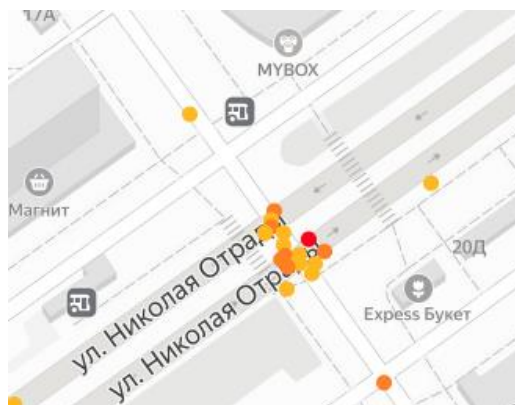
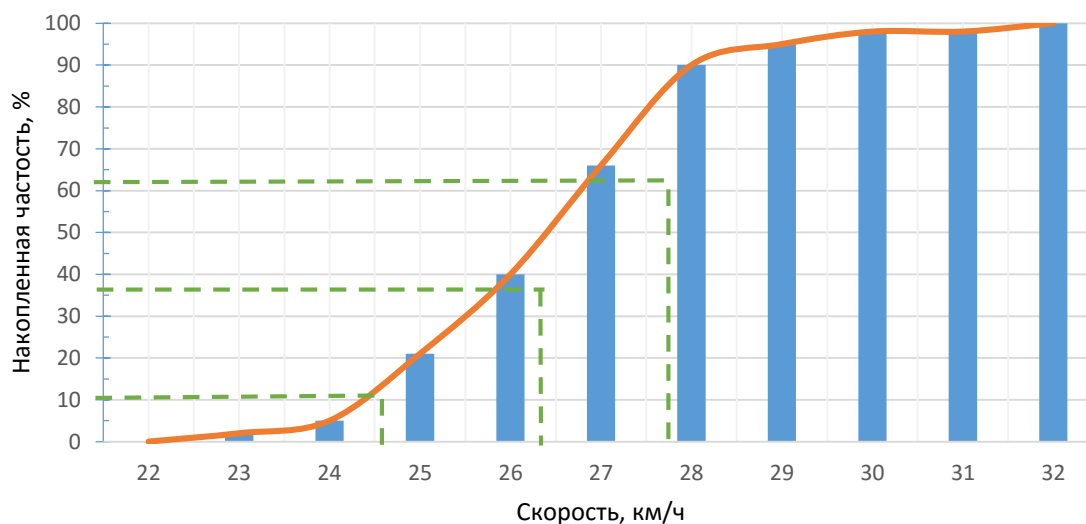


Рис. 7. Исследуемый регулируемый перекресток улиц Мясникова – Николая Отрады: а – фото перекрестка; б – карта концентрации ДТП в период с 2016 по 2022 г.

а)



б)

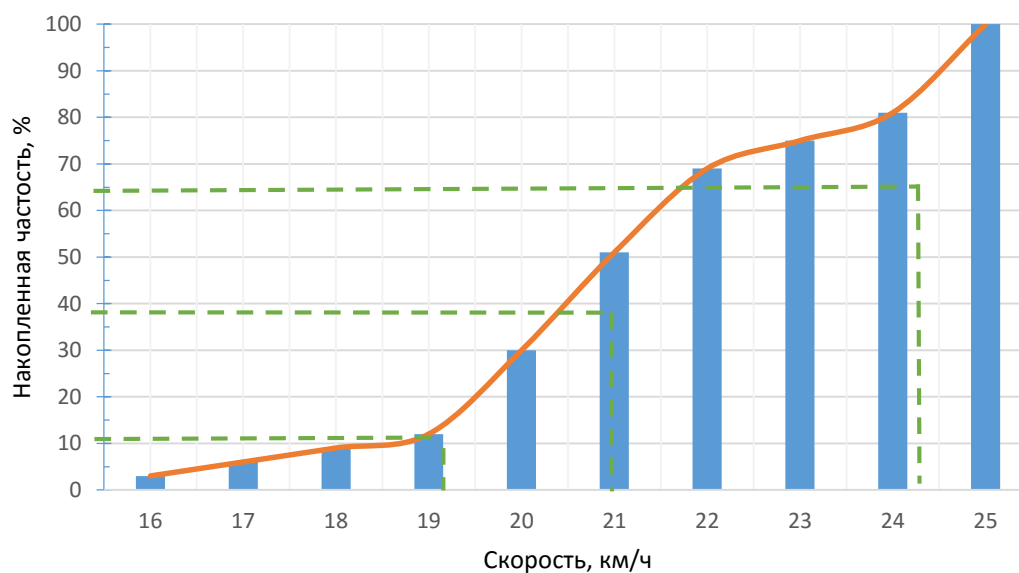


Рис. 8. Кумулятивные кривые распределения скоростей легковых (а) и грузовых (б) автомобилей на перекрестке улиц Мясникова – Николая Отрады

**Процентная обеспеченность скоростей движения автомобилей, км/ч, на перекрестках Волгограда**

Автомобили	Процентная обеспеченность		
	15	50	85
<i>Ул. Мира – ул. Оломоуцкая, R = 23 м</i>			
Легковые	20,0	21,4	25,5
Грузовые	18,2	20,4	21,7
<i>Ул. Карбышева – ул. Оломоуцкая, R = 36 м</i>			
Легковые	21,1	24,0	27,8
Грузовые	16,3	19,2	21,9
<i>Ул. Мясникова – ул. Николая Отрады, R = 40 м</i>			
Легковые	24,6	26,4	27,9
Грузовые	19,2	21,0	24,2



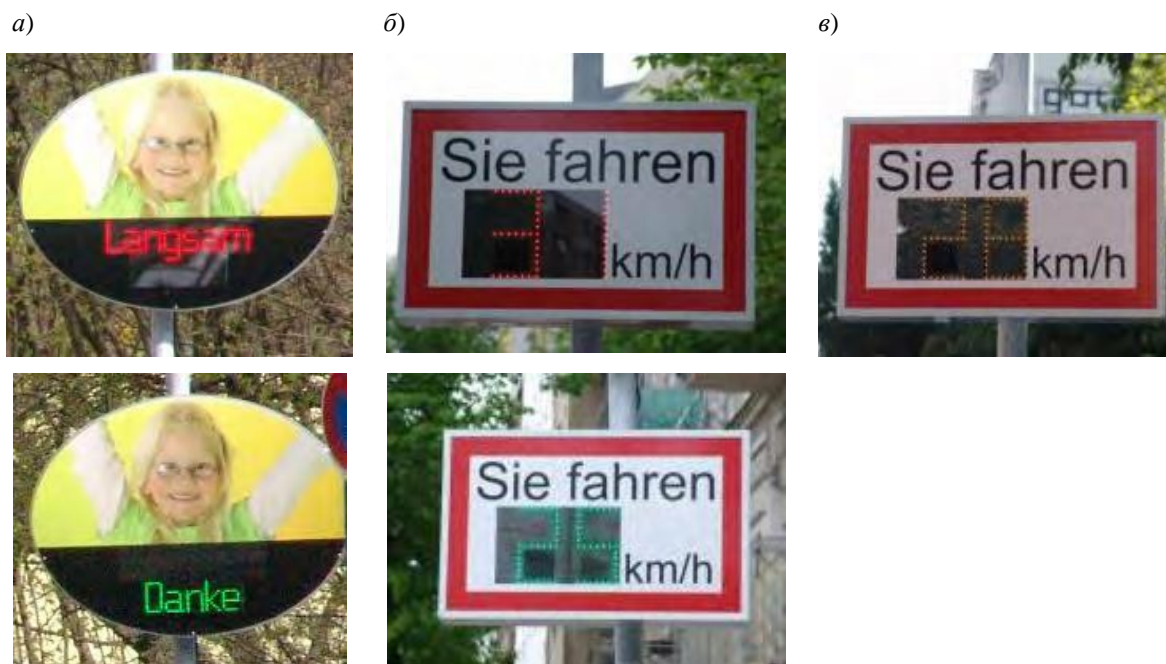


Рис. 9. Методы информирования водителей о скорости в Германии:  
а – диалоговый дисплей; б – оцениваемое информирование; в – нейтральное информирование

### Выводы

В результате наблюдений установлено, что с увеличением радиуса поворота налево растет и скорость движения транспортных средств.

Фактическая средняя скорость поворачивающих налево автомобилей может быть как выше, так и ниже рекомендованных в России значений (25 км/ч [8]) для расчета промежуточных тактов цикла регулирования. Чем меньше скорость поворачивающих налево ав-

томобилей и больше радиус поворота на перекрестке, тем больше времени требуется для проезда автомобилем конфликтных точек. Если времени недостаточно, высока вероятность ДТП. Для повышения безопасности дорожного движения на таких сложных узлах улично-дорожной сети города, как регулируемые перекрестки, необходима детализация входящих параметров управления транспортно-пешеходными потоками.

### Список источников

1. Брехман А. И., Мусин В. И. Исследование транспортно-эксплуатационных показателей и определение их закономерностей на обходных автомобильных дорогах вокруг средних и малых городов Республики Татарстан // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (30). С. 313–319.
2. Василенко В. А. Исследование влияния психофизиологических особенностей женщин и мужчин на процесс управления автомобилем // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 5 (76). С. 235–239.
3. Голов Е. В. Повышение точности расчета скорости движения в момент ДТП при столкновениях с неполным перекрытием части кузова автомобиля // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 3 (79). С. 306–316. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-306-316>.
4. Куприянова А. Б., Михайлов А. Ю. К вопросу об успокоении движения в центрах крупных городов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 6 (53). С. 65–69.
5. Mit Tempo 30 die Verkehrssicherheit erhöhen. Fakten und Argumente, Beratungsstelle für Unfallverhütung. Bern, 2020. 12 с. URL: [https://www.bfu.ch/media/zkblooi/2020-12-18\\_tempo\\_30\\_fakten\\_de\\_fin.pdf](https://www.bfu.ch/media/zkblooi/2020-12-18_tempo_30_fakten_de_fin.pdf) (дата обращения: 20.12.2022).
6. Limbourg M. Die Auswirkungen von Tempo 30 auf die Verkehrssicherheit. Universität Duisburg-Essen. URL: [https://www.vsf.de/fileadmin/inhalte/public/06\\_Engagement/tempo30/Maria\\_Limbourg\\_Tempo30.pdf](https://www.vsf.de/fileadmin/inhalte/public/06_Engagement/tempo30/Maria_Limbourg_Tempo30.pdf) (дата обращения: 20.12.2022).
7. Витолин С. В. Анализ опыта применения кольцевых пересечений в сравнении с регулируемыми перекрестками // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 3 (50). С. 5–15.



8. ОДМ 218.6.003–2011. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. Москва : Росавтодор, 2013. 69 с.
9. RiLSA. Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Herausgeber. Köln, 2003. 107 s.
10. Butterwegge P. Verkehrssicherheit im Rad- und Fussverkehr. Unfallforschung der Versicherer. Zentrales Behörden-Seminar 1/2015. 19 Mai. Stuttgart, 2015. 76 s.

## References

1. Brekhman A. I., Musin V. I. Study of transport and operational indicators and determination of their patterns on bypass roads around medium and small towns of the Republic of Tatarstan. *News Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2014;(30):313–319. (In Russ.).
2. Vasilenko V. A. Study of the influence of psychophysiological characteristics of women and men on the process of driving a car. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;(76):235–239. (In Russ.).
3. Golov E. V. Improving the accuracy of calculating the speed of movement at the time of an accident in collisions with incomplete overlap of a part of the car body. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(79):306–316. (In Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-306-316>.
4. Kupriyanova A. B., Mikhailov A. Yu. On the question of calming traffic in the centers of large cities. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011;(53):65–69. (In Russ.).
5. Mit Tempo 30 die Verkehrssicherheit erhöhen. Fakten und Argumente, Beratungsstelle für Unfallverhütung. Bern; 2020. 12 s. (In Germ.). URL: [https://www.bfu.ch/media/zkblooi/2020-12-18\\_tempo\\_30\\_fakten\\_de\\_fin.pdf](https://www.bfu.ch/media/zkblooi/2020-12-18_tempo_30_fakten_de_fin.pdf).
6. Limbourg M. Die Auswirkungen von Tempo 30 auf die Verkehrssicherheit. Universität Duisburg-Essen. (In Germ.). URL: [https://www.vsf.de/fileadmin/inhalte/public/06\\_Engagement/tempo30/Maria\\_Limbourg\\_Tempo30.pdf](https://www.vsf.de/fileadmin/inhalte/public/06_Engagement/tempo30/Maria_Limbourg_Tempo30.pdf).
7. Vitolin S. V. Analysis of the experience of using roundabouts in comparison with controlled intersections. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2019;(50):5–15. (In Russ.).
8. ОДМ 218.6.003–2011. Guidelines for the design of traffic lights on highways. Moscow: Rosavtodor; 2013. 69 p. (In Russ.).
9. RiLSA. Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Herausgeber. Köln; 2003. 107 s. (In Germ.).
10. Butterwegge P. Verkehrssicherheit im Rad- und Fussverkehr. Unfallforschung der Versicherer. Zentrales Behörden-Seminar 1/2015. 19 Mai. Stuttgart; 2015. 76 s. (In Germ.).

## Информация об авторах

- С. В. Виталин** – доцент кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений» Волгоградского государственного технического университета, кандидат технических наук.
- В. С. Федорова** – магистрант второго года обучения кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений» Волгоградского государственного технического университета.
- Р. С. Колосков** – магистрант второго года обучения кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений» Волгоградского государственного технического университета.
- И. М. Андреянов** – студент IV курса факультета транспортных инженерных систем и техносферной безопасности Волгоградского государственного технического университета.
- Д. Д. Егоров** – студент IV курса факультета транспортных инженерных систем и техносферной безопасности Волгоградского государственного технического университета.

## Information about the authors

- S. V. Vitolin** – Associate Professor of the Construction and Operation of Transport Facilities Department, Volgograd State Technical University, Candidate of Engineering.
- V. S. Fedorova** – Second-year Master's Student of the Construction and Operation of Transport Facilities Department, Volgograd State Technical University.
- R. S. Koloskov** – Second-year Master's Student of the Construction and Operation of Transport Facilities Department, Volgograd State Technical University.
- I. M. Andreyanov** – Senior Student of the Transport Engineering Systems and Technosphere Safety Faculty, Volgograd State Technical University.
- D. D. Egorov** – Senior Student of the Transport Engineering Systems and Technosphere Safety Faculty, Volgograd State Technical University.

Статья поступила в редакцию 26.12.2022; одобрена после рецензирования 26.01.2023; принята к публикации 04.04.2023.

The article was submitted 26.12.2022; approved after reviewing 26.01.2023; accepted for publication 04.04.2023.

## ТРАНСПОРТ

Научная статья  
УДК 624.159.2  
doi 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_13

### Совершенствование взаимодействия участников транспортного процесса при использовании информационно-справочных систем

Елена Сергеевна Богданова<sup>1✉</sup>, Дмитрий Германович Неволин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> esbogdanova@rambler.ru✉

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

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы совершенствования взаимодействия участников транспортного процесса при использовании информационно-справочных систем. Развитие данная тема получила после изменений, которые произошли в сетях связи за последние 10 лет: переход от построения информационно-справочных служб на базе сетей с коммутацией каналов к сетям с пакетной коммутацией, реализующим IP-технологии. Были учтены особенности, которые принципиально улучшают качество обслуживания клиентов ОАО «РЖД» на основе предложенных методов автоматизации и цифровизации, возникающие при применении искусственного интеллекта. В работе определены слабые места при предоставлении доступа через сеть пакетной коммутации к узлу информационно-справочных услуг. Приведены условия, при которых абоненты не получают отказ в обслуживании своих заявок при организации взаимодействия участников транспортного процесса.

Целью данного исследования является определение оптимальных параметров сети связи, при которых будет обеспечиваться безотказное обслуживание абонентов. Особое внимание уделено вопросу согласования интенсивности нагрузки при использовании искусственного интеллекта, которое позволяет увязать транспортное и организационное взаимодействие в информационно-справочных системах, сократить время транзакций, повысить скорость принятия заявок от всех участников процесса, увеличить скорость передачи данных для принятия организационных и управленческих решений.

**Ключевые слова:** информационно-справочные системы, искусственный интеллект, пропускная способность

**Для цитирования:** Богданова Е. С., Неволин Д. Г. Совершенствование взаимодействия участников транспортного процесса при использовании информационно-справочных систем // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 13–19. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_13.

## TRANSPORT

Original article

### Improving the interaction of participants in the transport process when using information and reference systems

Elena S. Bogdanova<sup>1✉</sup>, Dmitry G. Nevolin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> esbogdanova@rambler.ru✉

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

**Abstract.** The article deals with the issues of improving the interaction of participants in the transport process when using information and reference systems. This topic was developed after the changes, that have occurred in communication networks over the past ten years. Namely, the transition from the construction of information and reference services on the basis of circuit-switched networks to packet-switched networks that implement IP-technologies. The emerging features that fundamentally improve the quality of customer service of Russian Railways on the basis of the proposed methods were taken into account. automation and digitalization arising from the application of artificial intelligence. Weaknesses in granting access identified in the work through the packet switching network to the node of information and reference services. The conditions for the trouble-free operation of reference nodes are given. Under which subscribers do not receive a refusal to service their applications, which must be performed when organizing the interaction of participants in the transport process.

The purpose of this study is to determine the optimal parameters of the communication network, at which trouble-free service to subscribers will be ensured. Particular attention in the article is paid to the issue of harmonizing the intensity of the load. When using artificial intelligence, which makes it possible to link transport and organizational interaction in information and reference systems, allows you to reduce the time of transactions, increase the speed of accepting applications from all participants in the process, increases the speed of transmission of responses and data transfer for organizational and management decisions.

**Keywords:** information and reference systems, artificial intelligence, bandwidth

**For citation:** Bogdanov E. S., Nevolin D. G. Improving the interaction of participants in the transport process when using information and reference systems. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(65):13–19. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_13.

## Введение

Совершенствование взаимодействия между участниками транспортного рынка стало возможным благодаря развитию средств связи [1]. Именно применение инфокоммуникационных систем позволяет выполнять работы в рамках реализации программы долгосрочного развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 г. [2], утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. В рамках выполнения данной программы определены работы, которые направлены:

- на экономию и оптимизацию использования ресурсов посредством совершенствования технологических процессов содержания объектов инфраструктуры, подвижного состава и обеспечения безопасности движения;
- повышение комфортности пассажирских перевозок за счет увеличения номенклатуры и качества услуг в пути следования;
- увеличение количества и улучшение качества услуг грузовых перевозок;
- увеличение доступности сервисов и услуг железнодорожного транспорта, сокращение времени их заказа и ожидания;
- увеличение скоростей движения и сокращение времени доставки грузов [3].

Как было отмечено в работах В. М. Сая, П. М. Тихонова [4, 5], ОАО «РЖД» является крупной холдинговой компанией, для нее характерны избыточные издержки, которые снижаются при цифровизации и автоматизации процессов взаимодействия в организационных структурах и вместе с тем предоставляют конкурентные преимущества.

Заместитель генерального директора ОАО «РЖД» Е. Чаркин в своем выступлении на конференции TAdviser Summ IT 29 ноября 2022 г. поделился приоритетами цифровой трансформации компании. Он определил важные решения, базирующиеся на идеях пятой промышлен-

ной революции, в основу которой положен принцип внедрения искусственного интеллекта:

- применение концепции искусственного интеллекта в ОАО «РЖД» как основы системной работы на железнодорожном транспорте;
- интеллектуальная обработка результатов измерений, как следствие снижение затрат и высвобождение работников;
- создание естественного диалога, автоматический подбор ответов, что способствует сокращению времени обработки обращений пользователей.

Был обозначен еще ряд решений, которые увеличивают пропускную способность станций и сокращают время простоя вагонов [6].

Кроме того, совершенствование взаимодействия помогает решить вопросы эффективной организации междугородных перевозок, которая в значительной степени зависит от оптимизации оперативного поиска груза для транзитной составляющей маршрута. С целью осуществления такого поиска используются системы информационного взаимодействия участников транспортного рынка [7].

Современный грузовладелец обладает большими возможностями в получении разнообразной информации, в связи с этим повышаются его требования к услугам, предоставляемым логистическим провайдером [8].

Вопрос информационно-справочных систем (ИСС) для участников транспортного рынка был рассмотрен в работах Е. С. Богдановой [9, 10]. В дальнейшем он получил свое развитие в трудах Ю. В. Юркина, Г. А. Тимофеевой, Д. С. Завалищина [11–14]. На момент проведения исследования взаимодействие между участниками процесса осуществлялось с помощью операторов контакт-центров, работающих на сетях с коммутацией каналов. В настоящее время большинство сетей построено на основе пакетной коммутации, реализующей принципы построения IP-сетей, что

принципиально изменило подходы к организации работы ИСС при взаимодействии участников транспортного рынка.

#### Материалы и методы исследования

Среди услуг, предоставляемых на сетях связи абонентам или клиентам, отметим информационно-справочные услуги, которые являются ИСС различного ведомственного подчинения. Одним из аспектов деятельности этих служб, вызывающих раздражение клиентов, становится частая занятость операторов в часы наибольшей нагрузки (ЧНН).

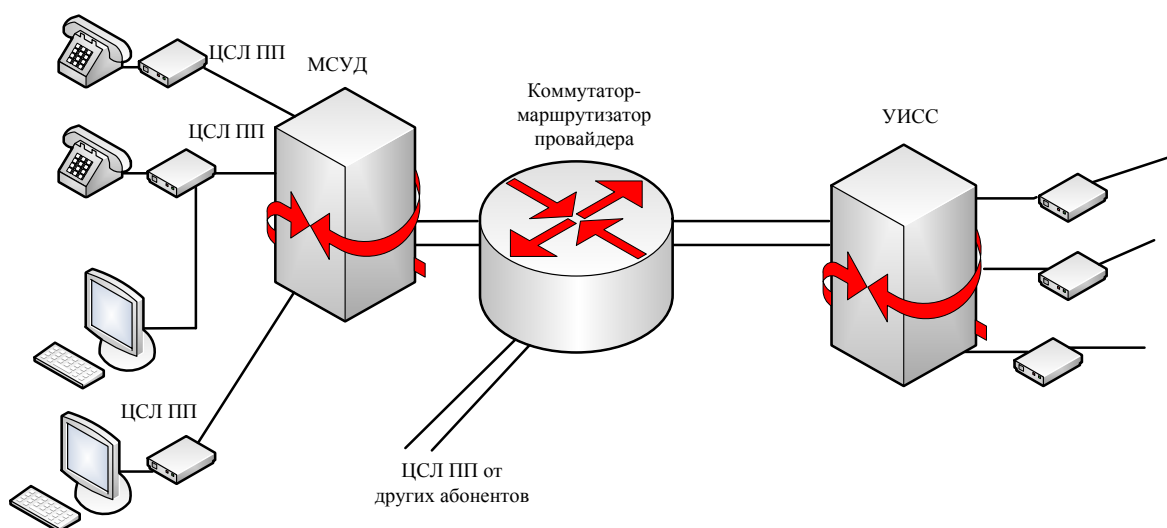
Особенно сложной стала обстановка на узлах ИСС при переходе к сетям с коммутацией пакетов от сетей с коммутацией каналов, при которой имеются группы отдельных линий с единственным номером, обслуживаемых группой операторов, работающих по принципу «абонент занял любую свободную линию в этот момент, а любой из свободных операторов подключился к ней и отвечает на вопросы абонента». Такая организация ИСС, при которой на сетях связи для каждого абонента и для каждого его соединения на период разговора, справки и т. п. выделялась отдельная (из совокупности) линия определенного назначения, например из пучка линий к ИСС, была основной. Первоначально это были физические линии, включенные в поле группового искателя электронной автоматической телефонной станции, а после появления цифровых соединительных линий (ЦСЛ) с импульсно-кодовой модуляцией и цифровых авто-

матических телефонных станций для подключения оператора все чаще использовали ЦСЛ с преобразованием индивидуальных кодовых импульсов в обычные звуки в устройствах оператора. Однако во всех этих системах число соединительных линий и число операторов необходимо было согласовывать с интенсивностью нагрузки, поступающей в ЧНН на узел ИСС. Данный вопрос подробно рассмотрен в работах авторов [9, 10, 15].

С появлением на сетях связи систем с передачей пакетов по ЦСЛ (ЦСЛ ПП) условия работы ИСС сильно изменились [16]. Теперь на сети от интернет-провайдера потоки запросов сообщений в виде пакетов битов поступают на сети к ИСС по одной линии, общей для всех операторов. Процессор узла ИСС выбирает пакеты с определенным адресом (поступающие от одного из клиентов) и направляет их к свободному на период получения справки оператору.

В такой системе необходимо согласовывать не только число операторов с интенсивностью нагрузки, поступающей на них в ЧНН, но и со скоростью передачи битов (пакетов битов) и от клиента, и по ЦСЛ ПП от провайдера, так как интенсивность нагрузки в системе с ПП связана со скоростью передачи битов (пакетов битов) на всех участках системы.

Упрощенная структурная схема доступа абонентов локальной сети IP к узлу ИСС приведена на рисунке.



Доступ абонентов локальной сети к узлу информационно-справочных служб



Как видно из рисунка, потоки сообщений (пакетов) от абонентских терминальных устройств (цифровых телефонных аппаратов, персональных компьютеров и т. д.) концентрируются в мультисервисном узле доступа, в его абонентском блоке или в вычислительном центре организации и направляются по общей линии (отдельной для входящих и исходящих пакетов) к узлу провайдера услуг IP (Интернета). И уже на узле провайдера через коммутатор пакеты к узлу ИСС (и от него) направляются в ЦСЛ ПП, включенную в узел ИСС. В узле пакеты, относящиеся к определенной ИСС, выделяются и направляются к свободному оператору для обслуживания запроса, справки и других услуг.

В последних моделях узлов ИСС на первом этапе обслуживания используются машины с искусственным интеллектом (МИИ), каждая из которых, как и оператор, определяет суть вопроса и вразумительно отвечает на него (с помощью искусственного голоса). Если же МИИ не определила суть вопроса, то сообщение перенаправляется к реальному оператору. В конечном итоге МИИ позволяет сократить число операторов, и экономия на их зарплате оправдывает их применение. При этом следует выделить тот факт, что на приеме в ЦСЛ ПП пакеты сначала попадают в буферное устройство, в котором и определяется фактический адрес пакета, причем зачастую этих буферных устройств несколько и от их числа значительно зависит время ожидания ответа МИИ или оператора абоненту или клиенту узла ИСС.

Буферных устройств может быть недостаточно для обслуживания реального числа пакетов и тогда с вероятностью большей, чем

$$P_{\text{отк}} \leq P_{\text{д.ои}} \leq 0,01 \dots 0,001,$$

где  $P_{\text{отк}}$ ,  $P_{\text{д.ои}}$  – вероятность отказа в обслуживании и вероятность длительного ожидания соответственно;  $0,01 \dots 0,001$  – значение величины от одного отказа на 100 абонентов до одного отказа на 1 000 абонентов, абонент или клиент получает сигнал «занято» и будет вынужден повторить запрос услуги.

Из этого фрагмента описания схемы обслуживания абонентов в узле ИСС видно, что последний представляет собой схему обслуживания с ожиданием и наличием нескольких мест для ожидания. С учетом этого и рассмотрим условия, при которых  $P_{\text{отк}} \leq P_{\text{д.ои}}$  (т. е. абон-

ненты узла ИСС практически не получают отказы при вызове ИСС).

Во введении к статье уже отмечалось, что, как в любой системе обслуживания, главным фактором, влияющим на ее работу, является нагрузка  $Y$  или сумма всех времен занятий, обслуживаемых системой в ЧНН:

$$Y_T = \sum_{i=0}^C t_i, \quad (1)$$

где  $C$  – число занятий (пакетов, поступающих в систему за время длительности наблюдений);  $t_i$  – время длительности занятия (обслуживания заявки).

В свою очередь общее число пакетов  $C_i$ , объединенных общим назначением, зависит от общей суммы пакетов разных видов сообщений из перечисленных видов и требований к качеству их воспроизведения, а  $t_i$  – от числа битов в пакете сообщений определенного вида и скорости передачи этих битов по линии связи от коммутатора провайдера до узла ИСС  $\omega_{\text{перед}}$  бит/с:

$$\bar{Y} = \sum_{i=0}^C t_i = \sum_{j=0}^k \bar{c}_k \bar{t}_k = \sum_{j=0}^k \bar{c}_{jk} \bar{U} \frac{1}{v}, \quad (2)$$

где  $C_{jk}$  – среднее число пакетов в сообщении;  $\bar{U}$  – среднее число битов в пакете вида  $jk$ ;  $\frac{1}{v}$  – среднее время передачи одного бита из пакетов любого вида, с, равное величине обратной скорости передачи битов за 1 с, обеспечиваемой провайдером на участке между его коммутатором и узлом ИСС.

Из выражения для  $Y$  следует, что, как упоминалось ранее, она зависит от числа сообщений каждого вида: речевого запроса или ответа, видеоизображения или буквенно-цифрового сообщения. И, конечно, она разная в каждом из направлений.

Для полной оценки условий работы при связи с узлом ИСС важна не только нагрузка (исходящая от узла ИСС и входящая к нему), но и средние интенсивности этих нагрузок. Как известно, средняя интенсивность нагрузки в течение ЧНН определяется соотношениями:

$$Y_{\text{исх ср}} = \frac{Y_{\text{исх}}}{T_{\text{ЧНН}}}, \quad (3)$$

$$Y_{\text{вх ср}} = \frac{Y_{\text{вх}}}{T_{\text{ЧНН}}}. \quad (4)$$

Единицей измерения величины, полученной в выражениях (3) и (4), является эрланг (Эрл). При этом следует подчеркнуть, что и

для исходящей, и для входящей связи выделяется по одной линии и интенсивность нагрузок будет обязательно меньше 1 Эрл.

Из закона о соотношении максимальных значений, принимаемых переменной случайной величиной, и среднего значения этой величины следует, что для исключения переполнения тракта это среднее значение должно быть равным не более половины некоего среднего максимального значения. Так как в рассматриваемом случае максимальная интенсивность нагрузки не может быть больше 1 Эрл (через одну линию), то отсюда следует, что среднее значение интенсивности нагрузки, проходящей через ЦСЛ ПП в течение ЧНН, не должно превышать 0,5 Эрл. Из этого постулата следует, что среднее число занятий (пакетов), их средний объем в битах и скорость передачи битов от провайдера (и обратно) по ЦСЛ ПП в совокупности не должны превышать 0,5 Эрл. Из рассмотренных характеристик сообщений различных видов можно сделать вывод, что при предоставлении справки оператором узла ИСС среднее число пакетов и их средний объем в битах, поступающие к оператору (и от него абоненту), можно считать достаточно стабильными.

## Результаты исследования

На основании проведенного исследования можно заключить, что для нормальной работы узла ИСС скорость передачи битов, запрашиваемых у провайдера услуг IP-сети, должна быть не меньше величины, определяемой из выражения:  $V_{\text{опт}} \geq 2V_{\text{сред}}$ . Оптимальная скорость передачи должна быть больше удвоенной средней скорости передачи битов за секунду, позволяя тем самым предоставлять информацию участникам взаимодействия транспортного процесса. Это не опровергает ранее проведенные исследования авторов, которые изложены в работах [9, 10, 15].

## Выводы

Таким образом, для определенных условий (емкости сети, числа абонентов, пользующихся услугами ИСС в часы наибольшей нагрузки, среднего числа запросов от них, среднего времени запроса и среднего времени ответа на запрос) число операторов на узле ИСС зависит от средней интенсивности нагрузки, а она, в свою очередь, – от реальной средней скорости передачи битов по ЦСЛ ПП. При этом запрашиваемая скорость передачи битов по ЦСЛ ПП между узлом ИСС и коммутатором провайдера должна быть в соответствии с нормальным законом распределения случайной величины в два раза больше.

## Список источников

1. Живицкая Е. Н. Инфокоммуникационные потоки в логистике // Веснік сувязі. 2015. № 6 (134). С. 51–54.
2. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года // ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/> (дата обращения: 03.12.2022).
3. Инновационная деятельность холдинга ОАО «РЖД» // Годовой отчет ОАО «РЖД» : [сайт]. URL: <https://ar2021.rzd.ru/ru/performance-overview/innovation-driven-development/innovative-activity#digitalisation-strategy> (дата обращения: 03.12.2022).
4. Сай В. М., Тихонов П. М. Моделирование действий агента-заказчика при закупочной процедуре // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2020. № 2 (46). С. 51–68.
5. Тихонов П. М. Цифровизация и автоматизация управления движением ресурсных потоков в организационных сетях (на примере холдинга «РЖД») // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1 (56). С. 20–27.
6. Информационные технологии в РЖД // Tadviser. Государство, бизнес, технологии : [сайт]. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Информационные\\_технологии\\_в\\_РЖД](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Информационные_технологии_в_РЖД) (дата обращения: 03.12.2022).
7. Горяев Н. К., Кудрявцев К. Н. Теория игр в моделировании цены при взаимодействии участников транспортного рынка // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2016. № 4 (32). С. 132–139.
8. Сергеева Т. Г., Никифорова Г. И. Повышение конкурентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2020. Т. 17, № 3. С. 428–436.
9. Богданова Е. С. Моделирование работы двухуровневой модели центра обслуживания вызовов // Транспорт Урала. 2007. № 2 (13). С. 75–77.
10. Богданова Е. С. Оптимизация работы справочно-информационной службы железной дороги // Транспорт Урала. 2008. № 2 (17). С. 26–27.

11. Солуянов А. В., Юркин Ю. В. Исследование математической модели call-центра на железнодорожном транспорте // Бюллетень результатов научных исследований. 2012. № 2 (3). С. 122–128.
12. Юркин Ю. В., Передрук А. Д. Двухуровневая модель информационной системы железнодорожного транспорта // 71-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио : труды конференции (Санкт-Петербург, 20–28 апреля 2016 г.). Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2016. С. 238–239.
13. Timofeev N. A., Timofeeva G. A. Call center work optimization on the basis of Markovian process theory // Herald of the Ural State University of Railway Transport. 2010. No. 2 (6). P. 22–28.
14. Завалишин Д. С., Тимофеев Н. А. Оптимизация режима работы контакт-центра // Информационные технологии моделирования и управления. 2015. Т. 92, № 2. С. 138–144.
15. Неволин Д. Г., Богданова Е. С. Организация двухуровневой справочно-информационной системы на железнодорожном транспорте. Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2013. 99 с.
16. Лебединский А. К., Павловский А. А., Юркин Ю. В. Автоматическая телефонная связь на железнодорожном транспорте : учебник для студентов вузов железнодорожного транспорта. Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. 529 с. (Высшее профессиональное образование).

## References

1. Zhivitskaya E. N. Infocommunication flows in logistics. *Vestnik of Communication*. 2015;(134):51–54. (In Russ.).
2. Long-term development program of Russian Railways until 2025. *Russian Railways: [site]*. (In Russ.). URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/>.
3. Innovative activity of the Russian Railways holding. *Annual report of Russian Railways: [site]*. (In Russ.). URL: <https://ar2021.rzd.ru/ru/performance-overview/innovation-driven-development/innovative-activity#digitalisation-strategy>.
4. Sai V. M., Tikhonov P. M. Modeling the actions of the customer agent in the procurement procedure. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2020;(46):51–68. (In Russ.).
5. Tikhonov P. M. Digitalization and automation of resource flow management in organizational networks (on the example of the Russian Railways holding). *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(56):20–27. (In Russ.).
6. Information technology in Russian Railways. *Tadviser. State, business, technology: [site]*. (In Russ.) URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Информационные\\_технологии\\_в\\_РЖД](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Информационные_технологии_в_РЖД).
7. Goryaev N. K., Kudryavtsev K. N. Game theory in price modeling in the interaction of transport market participants. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2016;(32):132–139. (In Russ.).
8. Sergeeva T. G., Nikiforova G. I. Increasing the competitiveness of transport and logistics companies in the context of digitalization. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2020;17(3):428–436. (In Russ.).
9. Bogdanova E. S. Modeling of the two-level model of the call center. *Transport of the Urals*. 2007;(13):75–77. (In Russ.).
10. Bogdanova E. S. Optimization of the work of the reference and information service of the railway. *Transport of the Urals*. 2008;(17):26–27. (In Russ.).
11. Soluyanov A. V., Yurkin Yu. V. Research of the mathematical model of the call-center in railway transport. *Bulletin of the results of scientific research*. 2012;(3):122–128. (In Russ.).
12. Yurkin Yu. V., Peredruk A. D. Two-level model of the information system of railway transport. *71<sup>st</sup> All-Russian Scientific and Technical Conference dedicated to Radio Day: Proceedings of the Conference (Saint Petersburg, April 20–28, 2016)*. Saint Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University named after V. I. Ulyanov (Lenin); 2016. P. 238–239. (In Russ.).
13. Timofeev N. A., Timofeeva G. A. Call center work optimization on the basis of Markovian process theory. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2010;(6):22–28.
14. Zavalishchin D. S., Timofeev N. A. Optimization of the contact-center operation mode. *Information technologies of modeling and management*. 2015;92(2):138–144. (In Russ.).
15. Nevolin D. G., Bogdanova E. S. Organization of a two-level reference and information system in railway transport. Yekaterinburg: Ural State University of Railway Transport; 2013. 99 p. (In Russ.).
16. Lebedinsky A. K., Pavlovsky A. A., Yurkin Yu. V. Automatic telephone communication in railway transport: a textbook for students of railway transport universities. Moscow: Educational and methodological center for education on railway transport; 2008. 529 p. (Higher professional education). (In Russ.).

### ***Информация об авторах***

*Е. С. Богданова* – доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

*Д. Г. Неволин* – профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

### ***Information about the authors***

*E. S. Bogdanova* – Associate Professor of the Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport, Candidate of Engineering.

*D. G. Nevolin* – Professor of the Design and Operation of Automobiles Department, Ural State University of Railway Transport, Doctor of Engineering.

Статья поступила в редакцию 27.02.2023; одобрена после рецензирования 24.03.2023; принята к публикации 15.05.2023.

The article was submitted 27.02.2023; approved after reviewing 24.03.2023; accepted for publication 15.05.2023.



## TRANSPORT

Научная статья  
УДК 658.51  
doi 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_20

### Установление среднего веса грузовых поездов в зависимости от весовой нормы при ограниченной длине станционных путей

Алексей Васильевич Дмитренко<sup>1✉</sup>, Лариса Ивановна Пушкарева<sup>2</sup>,  
Елена Анатольевна Ларченко<sup>3</sup>

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

<sup>3</sup> Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, Чита, Россия

<sup>1</sup> dmitrenkoav@mail.ru✉

<sup>2</sup> li\_pushkareva@rambler.ru

<sup>3</sup> Len0Lar@mail.ru

**Аннотация.** Со времен создания железнодорожного транспорта одним из основных способов освоения возрастающих объемов перевозок было систематическое повышение среднего веса грузовых поездов. Эта величина ограничивается полезной длиной станционных путей, мощностью поездных локомотивов, структурой грузопотоков, показывающих вес вагонов с грузом, приходящийся на один погонный метр поезда. Учитывая эти условия, в течение продолжительного времени повышение среднего веса грузовых поездов получали, удлиняя станционные пути, вводя четырехосные вагоны с повышенной грузоподъемностью (по сравнению с двухосными), заменяя винтовую сцепку вагонов, общепринятую в те времена, автосцепкой. В статье устанавливается влияние полезной длины станционных путей на величину среднего веса составов грузовых поездов в зависимости от структуры грузопотоков магистральной железнодорожной линии, а также фактическая величина среднего веса грузовых поездов с учетом различных весовых норм. Определяется весовая норма, при которой в случае ограничений полезной длиной станционных путей происходит ухудшение использования мощности поездных локомотивов. Мощность, а следовательно и тип поездных локомотивов, варьируется в зависимости от среднего веса поезда.

Наличие грузопотоков не только из тяжеловесных, но и легковесных грузов создает возможность вождения грузовых поездов локомотивами малой мощности. Для вождения тяжелых составов могут применяться более мощные двух- и трехсекционные локомотивы, кратная тяга.

Увеличение количества поездов малого веса позволяет за счет сокращения затрат времени на накопление и простоев готовых к отправлению составов в ожидании поездных локомотивов в период спада в движении сокращать парк вагонов и их простой на сортировочных станциях. Это обеспечит устойчивость в работе узловых пунктов за счет организации более равномерной работы магистральных железнодорожных линий.

**Ключевые слова:** вагон, вес грузовых поездов, локомотивы, погонная нагрузка, станция, участок

**Для цитирования:** Дмитренко А. В., Пушкарева Л. И., Ларченко Е. А. Установление среднего веса грузовых поездов в зависимости от весовой нормы при ограниченной длине станционных путей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 20–28. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_20.

## TRANSPORT

Original article

### The establishment of the average weight of freight trains depending on the weight rate with a limited length of station tracks

Alexey V. Dmitrenko<sup>1✉</sup>, Larisa I. Pushkareva<sup>2</sup>, Elena A. Larchenko<sup>3</sup>

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

<sup>3</sup> Trans-Baikal Institute of Railway Transport – a branch of the Irkutsk State Transport University, Chita, Russia

<sup>1</sup> dmitrenkoav@mail.ru✉

<sup>2</sup> li\_pushkareva@rambler.ru

<sup>3</sup> Len0Lar@mail.ru

**Abstract.** Since the creation of rail transport, one of the main ways to master the increasing volume of traffic has been a systematic increase in the average weight of freight trains. This value is limited by the useful length of the station tracks, the power of train locomotives, and the structure of cargo flows showing the weight of cars with cargo per one linear meter of the train. Given these conditions, for a long time, an increase in the average weight of freight trains was obtained by lengthening station tracks, introducing four-axle wagons with increased load capacity (compared to two-axle ones), replacing the screw coupling of wagons, generally accepted at that time, with automatic coupling. The article establishes the influence of the useful length of station tracks on the average weight of freight train trains depending on the structure of freight flows of the main railway line; actual value of average weight of freight trains is set taking into account different weight standards. The value of the weight norm is determined, at which, in case of restrictions on the useful length of the station tracks, the use of power of train locomotives deteriorates. Power, and accordingly, the type of train locomotives varies depending on the average weight of the train.

The presence of cargo flows not only from heavy, but also from light cargoes creates the possibility of driving freight trains with low-power locomotives. For driving heavy trains, more powerful two and three-section locomotives, multiple traction, can be used.

The increase in the number of low-weight trains allows, by reducing the time spent on accumulation, as well as downtime of ready-to-leave trains waiting for train locomotives during a period of decline in traffic, to reduce the fleet of cars and their downtime at sorting stations. This will ensure stability in the operation of junction points by ensuring more uniform operation of main railway lines.

**Keywords:** carriage, freight trains, locomotives, chain load, station, site

**For citation:** Dmitrenko A. V., Pushkareva L. I., Larchenko E. A. The establishment of the average weight of freight trains depending on the weight rate with a limited length of station tracks. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2023;(65):20–28. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_20.

## Введение

Создание нового вида транспорта – железнодорожного – позволило организовать повышенные объемы перевозок грузов и пассажиров с высокой скоростью движения, а также с меньшими удельными затратами по сравнению с ранее существовавшим гужевым транспортом. Поэтому на железнодорожном транспорте сразу начал быстро возрастать объем перевозок, что потребовало крупных капитальных затрат, связанных с дальнейшим усилением технического оснащения магистральных линий.

Во все времена функционирования железнодорожного транспорта одним из основных способов освоения возрастающих объемов перевозок было систематическое повышение среднего веса грузовых поездов. Это позволяло повышать провозную способность магистральных линий, а также обеспечивать сокращение расходов, связанных с перевозочным процессом [1–3].

В то же время на железнодорожном транспорте величина среднего веса грузовых поездов ограничивалась следующими основными параметрами: полезной длиной станционных путей, мощностью поездных локомотивов, структурой грузопотоков, осевыми и погонными нагрузками.

Исходя из этих условий, в течение многих десятилетий повышение среднего веса грузовых поездов достигалось путем удлинения станционных путей, введения четырехосных вагонов с

повышенной грузоподъемностью, перехода на автосцепки. Для снижения текущих эксплуатационных расходов было осуществлено сокращение численности обслуживающего персонала грузовых поездов в пути следования: уменьшение штата кондукторов и локомотивных бригад при замене паровозов тепловозами и электровозами. Было внедрено в практику вождение нескольких локомотивов одной локомотивной бригадой.

Все приведенные выше факторы при возможном повышении среднего веса грузовых поездов влияют друг на друга. Также они оказывают влияние на величину показателей среднего веса грузовых поездов на магистральных железнодорожных линиях.

Задачей исследования является установление зависимости среднего веса грузовых поездов от весовой нормы на участках при ограничении длин станционных путей на основе анализа данных о поездопотоке по четному направлению Транссибирской магистрали.

На начальном этапе развития транспорта при малых объемах перевозок эффективной мерой усиления его технического оснащения с целью повышения среднего веса грузовых поездов было удлинение станционных путей. На этапе использования паровой тяги его можно было производить с малыми затратами на окраинах городов с небольшой территорией.

При оценке эффективности мероприятий в технико-экономических расчетах длительное

время принималось, что норма веса грузовых поездов и их средний вес равны между собой [4, 5]. При этом считалось, что при повышении весовой нормы (например, в случае введения новых более мощных многоосных локомотивов) будет пропорционально возрастать средний вес грузовых поездов.

В то же время структура грузопотоков, наличие вагонов с различным весом грузов оказывают влияние на величину среднего веса поездов в случае их ограничения только полезной длиной станционных путей. Так, для четного грузового направления в восточной части Транссибирской магистрали в случае организации формирования только полносоставных грузовых поездов их средний вес оказывается равным всего около 4 800 т (при весовой норме 6 000 т) [6]. При этом мощность локомотивов недоиспользуется на 20 %, что вызывает рост затрат на тяговые средства. В статье учитывалось наличие существующих локомотивов, обращающихся на Транссибирской магистрали.

Значительное недоиспользование мощности поездных локомотивов на участках Транссибирской магистрали в условиях разнородного по весу грузопотока делает целесообразным осуществлять вождение части грузовых поездов, вес которых ниже установленной повышенной нормы, локомотивами меньшей мощности. Актуальной становится задача определения влияния нормы веса грузовых поездов на величину их фактического среднего веса в условиях ограничений их величины стандартной полезной длиной станционных путей (1 050 м).

На начальном этапе функционирования железнодорожного транспорта мощность локомотивов имела малую величину. Для паровозной тяги вес грузовых поездов ограничивался в первую очередь не параметрами инфраструктуры, а недостаточной мощностью локомотивов, в зависимости от которой и устанавливалась весовая норма. Поэтому вначале фактический средний вес грузовых поездов обычно был равен установленной норме [7–9]. При перевозке тяжеловесных грузов повышение среднего веса грузовых поездов достигалось вождением двумя локомотивами. В то же время на важнейших сортировочных станциях, а также по прилегающим магистральным железнодорожным линиям имеется множество возможных

вариантов формирования составов грузовых поездов, связанных со следующими условиями:

1) локомотивы имеют различные варианты мощности: в настоящее время для электровозов используются 6-, 8- и 12-осные локомотивы;

2) вес отдельных физических порожних вагонов и вагонов с грузом может колебаться в различных значениях: от 22 (порожние) до 90 т (груженые);

3) на магистральных железнодорожных линиях могут быть периоды как повышенных, так и уменьшенных объемов перевозок.

Положение с дальнейшим возможным повышением среднего веса грузовых поездов существенно изменилось на современном этапе функционирования железнодорожного транспорта в странах мира в целом по следующим причинам:

1. В связи с появлением крупных городов и плотной их застройкой значительно возросли затраты, связанные с удлинением станционных путей. Это, в свою очередь, влечет огромные затраты на соответствующее развитие крупных станций (особенно на электрифицированных линиях).

2. Создалась возможность одной локомотивной бригадой управлять в движении несколькими локомотивами сразу либо использовать еще более перспективные беспилотные технологии, которые уже активно внедряются в России в пассажирском (Московское центральное кольцо) и маневровом (ст. Лужская) движении, а в других странах мира применяются также и в грузовом движении на специализированных линиях. Появилась возможность в увеличении среднего веса грузовых поездов путем использования суммарной мощности нескольких локомотивов.

3. На железнодорожном транспорте сложилась определенная структура грузопотоков, выделены груженое и порожнее направления. Особенно важно использовать имеющуюся мощность поездных локомотивов в груженом направлении, в том числе для повышения среднего веса грузовых поездов.

4. Наличие централизации позволило осуществлять строительство вставок вторых главных путей на существующих магистральных линиях. Данная мера оказалась эффективной для загруженных дорог. В новых условиях создалась возможность осваивать расту-

шие объемы перевозок, в первую очередь за счет увеличения размеров движения при увеличении количества главных путей, а не путем дальнейшего повышения среднего веса грузовых поездов. В новых условиях отпадает необходимость в крупных капитальных затратах на удлинение станционных путей [10–12].

В создавшейся ситуации встала задача, как в условиях ограниченной полезной длины станционных путей и наличия локомотивов различной мощности установить рациональную весовую норму и длину для грузовых поездов, обеспечивающую, в зависимости от структуры грузопотоков, повышение степени использования мощности локомотивов на магистральных железнодорожных линиях.

#### Материалы и методы исследования

Расчеты влияния нормы веса грузовых поездов на величину их фактического среднего веса производились авторами для грузового четного направления Транссиба с учетом ограничения полезной длины станционных путей.

Средний вес грузовых поездов устанавливался по следующей формуле:

$$Q_{\text{ср}}^i = \frac{\sum P}{N_{\text{гр}}^i}, \quad (1)$$

где  $\sum P$  – суммарный вес отправляемых в грузовом направлении поездов для рассматриваемого полигона магистральной железнодорожной линии;  $N_{\text{гр}}^i$  – число составов грузовых поездов.

Для различных значений весовой нормы степень использования мощности поездных локомотивов можно определить по формуле

$$\gamma_i = \frac{100Q_{\text{ср}}^i}{Q_{\text{н}}^i}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{ср}}^i$  – средний фактический вес грузовых поездов для заданной  $i$ -й нормы веса, т;  $Q_{\text{н}}^i$  – заданная  $i$ -я норма веса поезда, т.

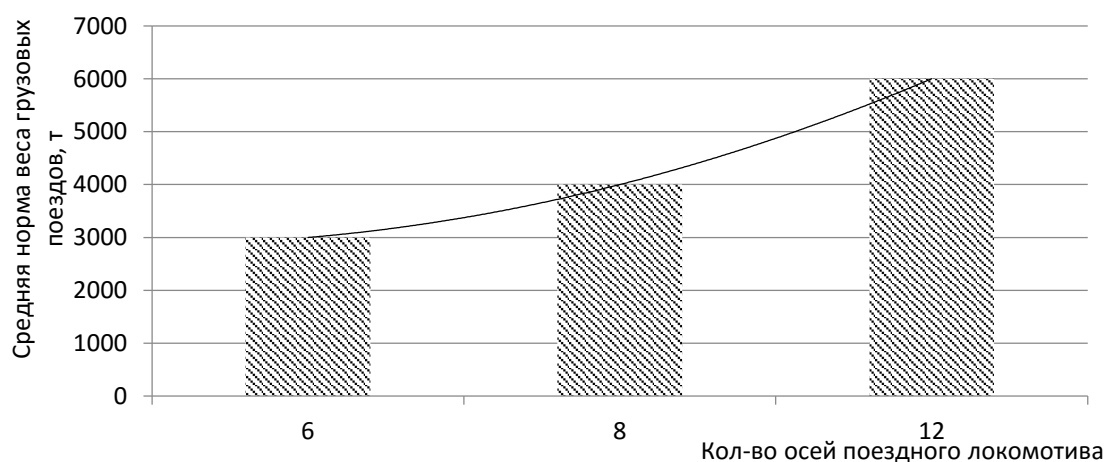
Средняя погонная нагрузка для грузопотоков, имеющих на данном рассматриваемом направлении магистральную железнодорожную линию, устанавливалась отдельно для грузового и порожнего направлений.

Величина средней погонной нагрузки для грузового направления может быть установлена по следующей формуле:

$$P_{\text{пн}} = \frac{\sum Q}{\sum Nl}, \quad (3)$$

где  $\sum Q$  – суммарный вес всех формируемых и отправляемых по магистрали грузовых поездов;  $\sum Nl$  – суммарная длина всех формируемых составов грузовых поездов по данной магистральной линии.

В ранее выполненных исследованиях установлено, что средняя погонная нагрузка для восточного грузового направления по Транссибирской магистрали составляет около 4,8 т/пог. м [6]. Имеющаяся структура грузопотоков оказывает значительное влияние на использование мощности локомотивов, обращающихся на магистральной железнодорожной линии. В зависимости от конструкции выпущенные локомотивы имеют различное количество осей. Так, при наличии шести осей в локомотиве норма веса составов грузовых поездов составляет 3 000 т; при наличии восьми осей – 4 000 т; при наличии 12 осей – 6 000 т (рисунок).



Изменение нормы веса поезда при использовании поездных локомотивов с разным количеством осей

Для различной мощности в зависимости от конструкции локомотивов средняя длина грузовых поездов устанавливалась по формуле

$$l_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{н}}^i}{P_{\text{пн}}}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{н}}^i$  – норма веса грузовых поездов в зависимости от мощности локомотивов, имеющих  $i$  число осей;  $P_{\text{пн}}$  – средняя погонная нагрузка для формируемых грузовых поездов.

Прирост в норме веса грузовых поездов устанавливается при введении новых локомотивов с большим количеством осей по сравнению с существующим уровнем. При введении 8-осных локомотивов вместо 6-осных прирост в норме веса грузовых поездов будет равен:

$$\Delta Q_{\text{н}}^{\text{пр}} = Q_{\text{н}}^{\text{пов}} - Q_{\text{н}}^{\text{сущ}}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{пов}}$  – вес грузовых поездов при повышении весовой нормы;  $Q_{\text{н}}^{\text{сущ}}$  – норма веса грузовых поездов при существующей норме для локомотивов с меньшим количеством осей.

При увеличении количества осей с шести до восьми норма веса грузовых поездов возрастает с 3 000 до 4 000 т, т. е. на 1 000 т. В случае удлинения станционных путей и введения 12-осных локомотивов вместо 8-осных норма веса грузовых поездов возрастает с 4 000 до 6 000 т, т. е. на 2 000 т.

Прирост в среднем весе грузовых поездов при увеличении количества осей в локомотивах определится по формуле

$$\Delta Q_{\text{ср}}^{\text{пр}} = Q_{\text{ср}}^{\text{пов}} - Q_{\text{ср}}^{\text{сущ}}, \quad (6)$$

где  $Q_{\text{ср}}^{\text{пов}}$  – средний вес грузовых поездов при повышении весовой нормы;  $Q_{\text{ср}}^{\text{сущ}}$  – средний вес грузовых поездов при существующей весовой норме.

#### Результаты исследования

В случае увеличения весовой нормы с 3 000 до 4 000 т, т. е. на 1 000 т, средний вес грузовых поездов также возрастает примерно

на такую же величину. В то же время при увеличении нормы с 4 000 до 6 000 т средний вес грузовых поездов возрастает всего на 800 т вследствие ограничений в длине станционных путей в случае вождения грузовых поездов с легковесными грузами.

Для 12-осных локомотивов при норме веса грузовых поездов в 6 000 т возможная длина сформированных грузовых поездов будет составлять 1 000 м. Рассчитанные показатели использования мощности локомотивов в зависимости от весовой нормы грузовых поездов сведены в таблицу.

Из таблицы следует, что в случае постепенного увеличения мощности локомотивов будет также возрастать средний вес грузовых поездов.

На начальном этапе роста нормы будет в такой же мере увеличиваться средний вес грузовых поездов. Однако при увеличении нормы сверх 4 000 т рост величины среднего веса составов грузовых поездов резко замедляется. Так, при увеличении нормы на 2 000 т (с 4 000 до 6 000 т) средний вес грузовых поездов возрастает примерно на 800 т (с 4 000 до 4 800 т).

Использование дополнительной мощности локомотивов (в процентах) может быть определено по формуле

$$\Delta M_{\%} = \frac{100 \Delta Q_{\text{ср}}}{\Delta Q_{\text{н}}}, \quad (7)$$

где  $\Delta Q_{\text{ср}}$  – прирост среднего веса грузовых поездов при повышении весовой нормы;  $\Delta Q_{\text{н}}$  – прирост в норме веса грузовых поездов.

Таким образом, с целью улучшения экономических показателей и повышения эффективности затрат в тяговые средства железнодорожному транспорту необходимо поставлять локомотивы, обеспечивающие выполнение нормы веса в 3 000 и 4 000 т. Необходимо рассмотреть возможность сокращения поста-

**Показатели использования мощности локомотивов  
в зависимости от весовой нормы грузовых поездов**

Показатель веса грузовых поездов	Число осей в локомотивах		
	6	8	12
Норма веса грузовых поездов, т	3 000	4 000	6 000
Средний фактический вес грузовых поездов, т	3 000	4 000	4 800
Степень использования мощности локомотивов, %	100	100	80
Прирост в норме веса грузовых поездов, т	3 000	1 000	2 000
Прирост в среднем весе грузовых поездов, т	3 000	1 000	800
Степень использования дополнительной мощности локомотивов, %	100	100	40



вок железнодорожному транспорту 12-осных локомотивов, обеспечивающих вождение составов грузовых поездов весом 6 000 т. В случае появления таких составов повышенного веса они смогут следовать с двумя маломощными локомотивами и одной локомотивной бригадой. Организация вождения большего количества грузовых поездов менее мощными локомотивами по предлагаемой схеме может быть использована в качестве меры повышения эффективности применения тяговых средств. Однако в этом случае потребуются дополнительная оценка эффективности.

Организация движения поездов локомотивами меньшей мощности, а следовательно и меньшей стоимости, позволяет сокращать затраты на локомотивы и в то же время отправлять с сортировочных станций повышенное количество поездов (и вагонов). При этом простой вагонов на сортировочной станции в период спада в движении будет значительно сокращаться по сравнению с вариантом организации формирования только полновесных или полносоставных поездов.

В случае использования локомотивов меньшей мощности становится возможным организовать движение тяжеловесных поездов несколькими локомотивами с управлением одной локомотивной бригадой. В перспективе можно будет иметь в парке локомотивы с шестью и восемью осями.

В практических условиях эксплуатации при неравномерности в движении имеется два значительно различающихся между собой периода:

- временный спад в движении;
- период повышенных объемов перевозок.

В случае спада в движении пропускная способность линии имеет значительные резервы, по магистрали пропускается малое количество поездов. Однако при формировании грузовых поездов большого веса на сортировочной станции находится большое количество вагонов. В случае повышения объемов перевозок в дальнейшем парк вагонов по сортировочной станции возрастает за счет простоя большого количества полновесных поездов с локомотивами, имеющими в составе 12 осей.

Совершенно иное положение по сортировочной станции будет иметь место в случае возможности отправления в свободные про-

межутки большего количества вагонов составами меньшего веса. В этом случае простой вагонов под накоплением в сортировочном парке сокращается. Это вызывает значительное снижение парка вагонов. Поэтому формирование большего количества поездов меньшего веса обеспечит повышение надежности работы сортировочных станций.

Величину сокращения простоя вагонов под накоплением ориентировочно можно определить по формуле

$$\Delta Bt = 12K(M_{\text{пол}} - M_{\text{неп}}), \quad (8)$$

где 12 – параметр накопления, который показывает, что для увеличения составов сформированных грузовых поездов на один вагон в сутки потребуется 12 вагоно-часов;  $K$  – количество назначений плана формирования;  $M_{\text{пол}}$  – количество вагонов в составах полновесных грузовых поездов;  $M_{\text{неп}}$  – количество вагонов в составах неполновесных грузовых поездов весом ниже установленной нормы.

Предлагаемая система регулирования веса грузовых поездов путем использования поездных локомотивов различной мощности имеет значительные преимущества по сравнению с существующей системой [13–16]. В предлагаемой системе, при наличии локомотивов меньшей мощности, за счет отправления дополнительных поездов меньшего веса обеспечивается сокращение простоя вагонов под накоплением. Поэтому при повышенном подходе дополнительный простой вагонов совмещается с накоплением составов грузовых поездов повышенного веса и длины. Благодаря данной мере в управлении резко уменьшатся затраты, связанные с повторной переработкой вагонов и ожиданием отправления со станций формирования.

Внедрение предлагаемой системы обеспечивает, на наш взгляд, значительное улучшение всех технико-экономических показателей эксплуатационной работы магистральных линий.

Во-первых, произойдет улучшение качества в использовании локомотивного парка. Подавляющая часть составов грузовых поездов будет иметь полную весовую норму при полном использовании мощности локомотивов. В случае повышенных объемов перевозок будет иметь место организация формирования составов грузовых поездов повышенного веса с вождением двумя локомотивами.

Во-вторых, при большом количестве грузовых поездов малого веса они будут следовать равномерно с меньшими интервалами. Это позволит повысить качество использования пропускной способности магистральных железнодорожных линий.

В-третьих, на сортировочных станциях значительно сократится простой вагонов под накоплением, особенно для составов маломощных назначений плана формирования. Также сократится объем повторной переработки вагонов в сортировочных парках, так как уменьшится продолжительность осаживания вагонов.

В-четвертых, как по прибытии, так и по отправлении на прилегающих магистральных линиях будет обеспечиваться более равномерный поток поездов и вагонов. Будут отсутствовать периоды повышенных объемов перевозок, значительно превышающих средний уровень на прилегающих магистральных железнодорожных линиях.

#### **Выводы**

1. Повышение среднего веса грузовых поездов являлось эффективным средством освоения возрастающих объемов перевозок при малых его значениях на начальном этапе развития железнодорожного транспорта. На современном этапе технического прогресса при высоких размерах движения дальнейшее повышение среднего веса грузовых поездов за счет удлинения станционных путей, в первую очередь на территории крупных городов, ста-

новится менее эффективной мерой в освоении возрастающих объемов перевозок.

2. Наличие вагонов с легковесными грузами в структуре грузопотоков приведет к тому, что при наличии нормы в 6 000 т средний вес полновесных или полносоставных грузовых поездов для грузового четного направления по Транссибирской магистрали составит только 4 800 т. При этом мощность поездных локомотивов недоиспользуется на 20 %.

3. Наиболее эффективна поставка железнодорожному транспорту локомотивов малой мощности, имеющих в своем составе шесть и восемь осей. При этом их мощность используется практически полностью за счет формирования только полновесных или полносоставных грузовых поездов. Также более рационально будет использоваться пропускная способность магистральных железнодорожных линий. В этом случае в период спада в движении возможно будет отправлять со станции большее количество вагонов, чем при отправлении малого количества грузовых поездов повышенного веса или длины. Поставка железнодорожному транспорту особо мощных 12-осных локомотивов вызовет снижение степени использования их мощности.

4. Отправление грузовых поездов весом ниже установленной нормы на свободные нитки графика позволит уменьшить парк вагонов сортировочных станций. Эта мера способствует достижению устойчивости в пропуске грузовых поездов по магистральным линиям в условиях неравномерности движения.

#### **Список источников**

1. История железнодорожного транспорта России / Г. М. Фадеев, Ф. К. Амелин, Ф. К. Бернгард [и др.]. Санкт-Петербург ; Москва : Петербургский государственный университет путей сообщения, 1994. 335 с.
2. Сотников Е. А., Шапкин И. Н. Эксплуатационная работа на железных дорогах мира // Железнодорожный транспорт. 2009. № 2. С. 72–80.
3. Нехорошков В. П. Железнодорожный транспорт в развитии внешнеэкономической деятельности восточных регионов России. Новосибирск : Наука, 2011. 225 с.
4. Перспективы развития транспорта при переходе к рынку / Н. Е. Аксененко, А. В. Дмитренко, И. А. Милованов, В. Н. Поздеев // Железнодорожный транспорт. 1993. № 2. С. 37–42.
5. Давыдов А. В., Аксенов В. В. Актуальные аспекты совершенствования труда поездного диспетчера. Новосибирск : Советская Сибирь, 2010. 124 с.
6. Дмитренко А. В., Ларченко Е. А., Еременко А. А. Эффективные пути повышения среднего веса грузовых поездов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 12. С. 69–73.
7. Ефремов В. А., Куренков П. В. Логистизация управления движением поездов // Логистика сегодня. 2004. № 5. С. 31–38.
8. Бубнова Г. В., Федоров Ю. Н. Об эффектах специализации железнодорожных линий // Мир транспорта. 2012. Т. 10, № 6 (44). С. 62–69.

9. Макарович А. М., Дьяков Ю. В. Использование и развитие пропускной способности железных дорог. Москва : Транспорт, 1981. 287 с.
10. Батурин А. П., Пазойский Ю. О., Жукова Т. А. Обоснование весовых норм для тяжеловесного движения // Мир транспорта. 2018. № 6. С. 126–135.
11. Покровская О. Д., Самуйлов В. М. Международная логистика Транссибирской магистрали: использование транзитного потенциала России // Инновационный транспорт. 2016. № 3. С. 3–7.
12. Корнеев М. В., Осиновская Е. А. Применение процессного подхода в логистической системе // Поли-транспортные системы : материалы X Международной научно-технической конференции. Новосибирск : Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2019. С. 284–288.
13. Дмитренко А. В., Карасев С. В., Пурэв Б. Эффективность оборудования автоблокировкой перегонов в зависимости от их протяженности // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1/2. С. 146–149.
14. Национальная безопасность России и транспорт / В. А. Персианов, П. В. Метелкин, Т. В. Богданова, А. В. Курбатова // Вестник транспорта. 2020. № 10. С. 8–17.
15. Дмитренко А. В. Оценка влияния способов управления железнодорожным транспортом на возможность ликвидации периодических кризисов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 4 (28). С. 182–191.
16. Дмитренко А. В., Рожков А. Н. Варианты пропуска поездов при капитальном ремонте и затруднениях в движении на двухпутных линиях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2011. № 1. С. 221–224.

## References

1. Fadeev G. M., Amelin F. K., Bernhard F. K. [et al.]. The history of railway transport in Russia. Saint Petersburg; Moscow: Saint Petersburg State Transport University; 1994. 335 p. (In Russ.).
2. Sotnikov E. A., Shapkin I. N. Operational work on the railways of the world. *Railway transport*. 2009;(2):72–80. (In Russ.).
3. Nekhoroshkov V. P. Railway transport in the development of foreign economic activity of the Eastern regions of Russia. Novosibirsk: Nauka; 2011. 228 p. (In Russ.).
4. Akseenko N. E., Dmitrenko A. V., Milovanov I. A., Pozdeev V. N. Prospects for the development of transport in the transition to the market. *Railway Transport*. 1993;(2):37–42. (In Russ.).
5. Davydov A. V., Aksenov V. V. Actual aspects of improving the work of a train dispatcher. Novosibirsk: Soviet Siberia; 2010. 124 p. (In Russ.).
6. Dmitrenko A. V., Larchenko E. A., Eremenko A. A. Efficiency of construction of additional main tracks on existing railway lines. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(12):69–73. (In Russ.).
7. Efremov V. A., Kurenkov P. V. Logistics of train traffic management. *Logistics today*. 2004;(5):31–38. (In Russ.).
8. Bubnova G. V., Fedorov Yu. N. On the effects of specialization of railway lines. *The world of transport*. 2012;10(44):62–69. (In Russ.).
9. Makarochkin A. M., Dyakov Yu. V. Use and development of railway capacity. Moscow: Transport; 1981. 287 p. (In Russ.).
10. Baturin A. P., Pazoyskiy Yu. O., Zhukova T. A. Substantiation of weight norms for heavy traffic. *The world of transport*. 2018;(6):126–135. (In Russ.).
11. Pokrovskaya O. D., Samuylov V. M. International logistics of the Trans-Siberian Railway: using the transit potential of Russia. *Innovative transport*. 2016;(3):3–7. (In Russ.).
12. Korneev M. V., Osinovskaya E. A. Application of the process approach in the logistics system. *Polytransport systems: Materials of the X International Scientific and Technical Conference*. Novosibirsk: Siberian Transport University Publishing House; 2019. P. 284–288. (In Russ.).
13. Dmitrenko A. V., Karasev S. V., Purev B. The efficiency of the equipment with auto-blocking of the crossings, depending on their length. *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2014;(1/2):146–149. (In Russ.).
14. Persianov V. A., Metelkin P. V., Bogdanova T. V., Kurbatova A. V. National security of Russia and transport. *Bulletin of Transport*. 2020;(10):8–17. (In Russ.).
15. Dmitrenko A. V. Assessment of the impact of railway transport management methods on the possibility of eliminating periodic crises. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2010;(28):182–191. (In Russ.).
16. Dmitrenko A. V., Rozhkov A. N. Options for skipping trains during major repairs and difficulties in movement on double-track lines. *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2011;(1):221–224. (In Russ.).

### ***Информация об авторах***

*А. В. Дмитренко* – профессор кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

*Л. И. Пушкарева* – старший преподаватель кафедры «Железнодорожные станции и узлы» Сибирского государственного университета путей сообщения.

*Е. А. Ларченко* – ведущий инженер Центра научно-инновационной деятельности Забайкальского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения.

### ***Information about the authors***

*A. V. Dmitrenko* – Professor of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering.

*L. I. Pushkareva* – Senior Lecturer of the Railway Stations and Junctions Department, Siberian Transport University.

*E. A. Larchenko* – Leading Engineer of the Research and Innovation Center of the Trans-Baikal Institute of Railway Transport, a branch of the Irkutsk State Transport University.

Статья поступила в редакцию 27.12.2022; одобрена после рецензирования 23.01.2023; принята к публикации 04.04.2023.

The article was submitted 27.12.2022; approved after reviewing 23.01.2023; accepted for publication 04.04.2023.

## TRANSPORT

Научная статья  
УДК 656  
doi 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_29

### Метод экстраполяции пассажиропотоков по геолокации мобильных устройств на городском пассажирском транспорте

Александр Григорьевич Матвеев<sup>1✉</sup>, Татьяна Анатольевна Менухова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> alexzander.matveev@yandex.ru ✉

<sup>2</sup> men-ta@yandex.ru

**Аннотация.** В крупных городах и агломерациях переход от личного транспорта к общественному для рабочих и бытовых поездок является важной задачей. Так, огромное количество личных автомобилей создает большую и все возрастающую нагрузку на дорожную сеть города, негативно сказывается на экологии, в том числе из-за выбросов отработанных газов, шумового загрязнения, а также сопутствующих вредных процессов при обслуживании транспортных средств. Для обеспечения достойной альтернативы личному транспорту требуется проводить мониторинг текущей загруженности общественных городских маршрутов и на основании этого формировать резервы их пропускной способности. В данной работе рассматривается метод определения пассажиропотоков на городских маршрутах по геолокации мобильных устройств в ближайших пассажирообразующих пунктах с привязкой ко времени суток и дню недели. Такой подход может быть перспективным для определения не только общего объема перевозок, выполненных подвижным составом городского транспорта, но и наполняемости транспортного средства и, как следствие, для расчета средней дальности ездки пассажира. В связи с этим предложен второй метод, состоящий из ряда формул, позволяющих определять коэффициент уникальности пассажиров на рейсе с учетом времени суток и сезонности спроса на городские перевозки с последующим вычислением дальности ездки уникального пассажира, что в конечном счете позволяет более детально представлять потребности населения в перевозках, а также слабые места в инфраструктуре городского транспорта. Предложенные методы являются универсальными и могут применяться как для автобусов и троллейбусов, так и для трамваев и даже метро. Кроме того, первый метод можно использовать в качестве инструмента исследования и управления человеческими потоками в городской среде (пешеходные потоки).

**Ключевые слова:** экстраполяция пассажиропотоков, геолокация мобильных устройств, коэффициент уникальности пассажиров

**Для цитирования:** Матвеев А. Г., Менухова Т. А. Метод экстраполяции пассажиропотоков по геолокации мобильных устройств на городском пассажирском транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 29–39. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_29.

## TRANSPORT

Original article

### Method for extrapolation of passenger flows by geolocation of mobile devices in urban passenger transport

Alexander G. Matveev<sup>1✉</sup>, Tatiana A. Menukhova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> alexzander.matveev@yandex.ru ✉

<sup>2</sup> men-ta@yandex.ru

**Abstract.** In large cities and agglomerations, the transition from personal to public transport for work and household trips is an important task. Thus, a huge number of private cars creates a large and ever-increasing load on the city's road network, negatively affects the environment, including due to exhaust gas emissions, noise pollution, as well as related harmful processes during vehicle maintenance. To provide a worthy alternative to personal transport, it is required to monitor the current congestion of public city routes and, on the basis of this, form reserves of their capacity. This paper discusses a method for determining passenger flows on urban routes by geolocation of mobile devices in the nearest passenger generating points with reference to the time of day and day of the week. Such an approach can be promising not only for determining the total volume of traffic performed



by the rolling stock of urban transport, but also for determining the occupancy of the vehicle, and as a result, for calculating the average passenger travel distance. In this regard, a second method is proposed, consisting of a number of formulas have been proposed that allow determining the coefficient of uniqueness of passengers on a route, taking into account the time of day and the seasonality of demand for urban transportation, followed by calculating the travel distance of a unique passenger, which, ultimately, allows a more detailed representation of the population's needs for transportation, as well as weak places in the urban transport infrastructure. The proposed methods are universal and can be used both for buses and trolleybuses, as well as for trams and even the metro. Also, the first method can be used as a tool for research and management of human flows in the urban environment (pedestrian flows).

**Keywords:** extrapolation of passenger flows, geolocation of mobile devices, passenger uniqueness factor

**For citation:** Matveev A. G., Menukhova T. A. Method for extrapolation of passenger flows by geolocation of mobile devices in urban passenger transport. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(65):29–39. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_29.

## Введение

В наше время роль общественного транспорта все больше и больше увеличивается. В крупных городах власти стремятся заменить личный автомобильный транспорт автобусными, троллейбусными, трамвайными маршрутами и метрополитеном [1–3]. Это связано с рядом факторов. Во-первых, требуется разгрузка улично-дорожных сетей (УДС) с целью решения проблемы дорожных «пробок», которая обусловлена не только увеличившимся количеством транспорта, но и недостаточной мощностью УДС. Расширять имеющиеся дорожные магистрали в достаточной мере не позволяет дороговизна проектов, а также существующая городская инфраструктура, в том числе историческая застройка или природные объекты [4]. Во-вторых, сложившаяся экономическая ситуация снижает доступность личного транспорта для населения. Таким образом, возможным решением становится комплекс мер по поэтапному отказу граждан от использования личного автомобиля в повседневных городских поездках. Так, например, в Санкт-Петербурге в 2022 г. был осуществлен переход к новой транспортной модели, которая позволила убрать с улиц маршрутные такси путем замены их новыми автобусными маршрутами с регулярными тарифами [5]. В столице вовсе отказались от применения троллейбусного парка еще летом 2020 г. [6]. Помимо введения новых и оптимизации существующих маршрутов, власти используют другие способы повышения привлекательности общественного транспорта: увеличивают комфортность автотранспортных средств (АТС) и электротранспорта, создают удобные и разнообразные способы и условия оплаты (льготные тарифы проезда, суточные проезд-

ные, онлайн-оплата билета), онлайн-расписание, возможность отслеживать движение конкретного автобуса или трамвая в электронных системах и др. [7].

Предпринимаемые меры направлены на разгрузку УДС, удовлетворение спроса горожан на пассажирские перевозки, а также способствуют повышению доступности удаленных районов и общественно-востребованных городских объектов. В связи с этим автобусный транспорт является самым перспективным. Он не требует дополнительных вложений при отсутствии необходимости реконструкции УДС, а также изменения величины автобусного парка. Кроме того, сопутствующая инфраструктура оказывается более мобильной в отличие от других видов общественного транспорта. Все это позволяет быстро создавать новые, оптимизировать и корректировать имеющиеся маршруты без сложных, долгосрочных и дорогостоящих строительных, энергообеспечивающих и прочих работ.

В статье описывается метод прогнозирования пассажиропотоков, который основан на натурных исследованиях и данных из открытых геоинформационных систем. Метод включает несколько этапов:

- 1) натурные исследования, на которых считается количество пассажиров на рассматриваемом маршруте;

- 2) использование данных из открытых геоинформационных систем для определения посещаемости пассажирообразующих пунктов на маршруте и вывода относительной интенсивности пассажиропотока;

- 3) интерполяция или экстраполяция данных из натурных исследований с учетом имеющихся относительных показателей интенсивности пассажиропотока во времени для получения абсолютных прогнозных показателей

пассажиропотока на конкретный временной интервал.

Также в работе рассматривается возможность на основании полученных абсолютных прогнозных данных рассчитать *коэффициент уникальности пассажира*. Этот коэффициент определяет долю пассажиров в общем пассажиропотоке, которые ранее не были замечены на данном маршруте.

#### Материалы и методы исследования

Любой пассажиропоток можно условно разделить на три части: утренний, дневной и вечерний. На утренний и вечерний периоды, как правило, приходятся пиковые нагрузки. Именно в эти часы УДС максимально загружена [8, 9].

В данной работе на примере городского автобусного маршрута 47 в Санкт-Петербурге рассмотрены пассажиропотоки в прямом и обратном направлении. Маршрут автобуса 47 «ул. Кораблестроителей – Университет» является типичным городским маршрутом, курсирует в густонаселенной части города с большим скоплением организаций и учреждений. Для него характерно обычное распределение пассажиропотока в течение дня: увеличение в утренние и вечерние часы и спад в дневные.

Натурным методом были произведены замеры пассажиропотока на рассматриваемом маршруте (табл. 1, 2).

По приведенным значениям средняя загрузка транспорта составляет примерно 26,4 % (пассажировместимость рассматриваемого АТС 49 чел.). Основываясь на результатах замера пассажиропотока и соответствующих временных метках, можно вывести количество пассажиров, соответствующее *потенциальной 100%-й* загруженности (теоретическое количество пассажиров, приходящееся на ТС в рассматриваемый момент времени, которое изменяется в соответствии с посещаемостью пассажирообразующих пунктов на маршруте). Иначе говоря, есть какой-либо день и какой-либо час в этот день недели, когда поток был максимальным – 100 %, это значение показывает относительную интенсивность потока за исследуемый период.

Для подсчета прогнозируемого пассажиропотока предлагается следующий метод. Требуется умножить относительный показатель интенсивности потока, соответствующий по времени прибытия АТС на остановочные пункты, на рассчитанный показатель 100%-й интенсивности. Это действие применяется для

Таблица 1

Пассажиропоток на маршруте 47 в прямом направлении, чел. (07.09.2022 с 17:38 до 18:12)

Остановка	Количество			Время <i>t</i>
	в салоне	вошедших	вышедших	
Ул. Кораблестроителей	3	3	0	17:38
Ул. Кораблестроителей, 35	5	2	0	17:40
Капитанская ул.	13	9	1	17:43
Новосмоленская наб., уг. ул. Кораблестроителей	13	0	0	17:44
Магазин «Строитель»	13	0	0	17:45
Ст. метро «Приморская»	14	7	6	17:46
Новосмоленская наб.	13	0	1	17:47
Ул. Нахимова	14	1	0	17:49
Малый пр. В. О., уг. Наличной ул.	11	0	3	17:51
Ул. Шевченко	11	3	3	17:53
24–25-я линии В. О.	16	5	0	17:54
18–19-я линии В. О.	17	3	2	17:55
12–13-я линии В. О.	19	3	1	17:59
8–9-я линии В. О., уг. Малого пр. В. О.	11	0	8	18:01
Наб. Макарова	8	0	3	18:03
1-я и Кадетская линии В. О.	12	5	1	18:05
1-я и Кадетская линии, уг. Среднего пр.	10	0	2	18:07
1-я линия В. О., уг. Большого пр. В. О.	6	0	4	18:08
Университетская наб., уг. 1-й и Кадетской линий В. О.	6	0	0	18:09
Университет	0	0	6	18:12
<i>Итого</i>	215	41	41	–

Примечание. Используемые в табл. 1–4 сокращения: ул. – улица, ст. – станция, наб. – набережная, уг. – угол, пр. – проспект, В. О. – Васильевский остров.

Таблица 2

Пассажиропоток на маршруте 47 в обратном направлении, чел. (07.09.2022 с 18:22 до 19:02)

Остановка	Количество			Время $t$
	в салоне	вошедших	вышедших	
Университет	7	7	0	18:22
Университетская наб., уг. 1-й и Кадетской линий	7	0	0	18:23
Большой пр. В. О.	7	0	0	18:24
Кадетская линия, уг. Среднего пр.	10	3	0	18:27
Ст. метро «Василеостровская»	7	1	4	18:29
Средний пр. В. О. по 9-й линии	11	4	0	18:30
8–9-я линии В. О., уг. Малого пр. В. О.	21	10	0	18:38
12–13-я линии В. О.	22	2	1	18:39
16–17-я линии В. О.	21	2	3	18:40
24–25-я линии В. О.	23	2	0	18:42
Ул. Беринга	17	1	7	18:43
Гаванская ул., уг. Малого пр.	17	1	1	18:45
Малый пр. В. О., уг. Наличной ул.	21	6	2	18:46
Ул. Нахимова	16	0	5	18:48
Ст. метро «Приморская»	30	20	6	18:52
Магазин «Строитель»	28	1	3	18:54
Ул. Кораблестроителей, уг. Новосмоленской наб.	25	0	3	18:55
Капитанская ул.	10	2	17	18:56
Ул. Кораблестроителей, 35	2	0	8	18:58
Наличная ул., уг. Уральской ул.	0	0	2	19:02
<i>Итого</i>	302	62	62	–

каждой остановки соответствующими относительными показателями интенсивности потока. Ниже приведено более детальное описание метода и его формулы.

Таким образом, получаем экстраполированное значение количества человек на каждой остановке в каждый момент прибытия АТС по расписанию. Следовательно, требуется получить относительный показатель интенсивности пассажиропотока, соответствующий интенсивности по моменту времени, а также в ближайшем пассажирообразующем пункте. В идеале эту информацию можно было бы получать при обследовании пассажирообмена остановочного пункта [10–12]. Однако на данный момент техническое оснащение и требования городской транспортной системы не позволяют получать достоверную оценку пассажиропотоков в определенный момент времени [13, 14]. Ранее в Москве были предприняты попытки сбора похожих данных на основе bluetooth- и MAC-адресов с автобусных остановок, но из-за отключенных bluetooth- и Wi-fi-модулей телефонов при использовании на улице подобный метод оказался непригодным [15].

### Результаты исследования

В настоящее время многие городские жители имеют мобильное устройство с выходом в Интернет. Подобные устройства собирают обширную информацию о пользователе для разных сервисов, включая текущее и прошлое местоположение. На основании этого существует оценка посещаемости мест. В отличие от оценки пассажиропотоков напрямую подобным методом, оценка посещаемости мест дает более точную информацию, исключая случайных прохожих за счет проведенного времени в определенной точке. То есть при попытке отследить использование того или иного маршрута на основе данных по геопозиции устройства можно случайно включить в учет прохожих, а также пассажиров и водителей проезжающих легковых автомобилей. В основу метода положена гипотеза, что информация о посещениях пассажирообразующих пунктов по информации из ГИС используется как потенциальная величина спроса на перевозки, которая приводится к абсолютным значениям пассажиропотока посредством приведения абсолютных величин из результатов натурных исследований. Поэтому не

требуется получать точную геолокацию отдельного устройства, а можно воспользоваться ее приблизительным значением с привязкой по времени.

Укажем на карте города важные пассажирообразующие пункты (станции метро, торговые центры, больницы и поликлиники, заводы и крупные предприятия, образовательные учреждения и т. п.).

На рис. 1 представлена карта Васильевского острова Санкт-Петербурга с изображением прямого и обратного направлений автобусного маршрута 47 и важными пассажирообразующими пунктами (ПОП). Приведенный рисунок показывает не все ПОП, а их примерное расположение, концентрацию и частоту возникновения на пути следования по маршруту.

На карте видно, что одним из главных факторов для размещения тех или иных учреждений является наличие метрополитена [16–19]. Поэтому можно выделить три очага: станции метро «Приморская», «Василеостровская» и «Спортивная». Именно вдоль этих станций проложен 47-й маршрут автобуса.

На данный момент у компании Google имеются наиболее обширные данные по геолокации мобильных устройств, так как их сервисы, собирающие информацию, предоставлены на большинстве мобильных устройств (Android) и на многих IOS-девайсах (iPhone, iPad и т. д.). Все это позволяет Google в собственном сервисе Google maps предоставлять открытую информацию по посещению мест по времени и дню недели (рис. 2).

Наличие поблизости станции метро является ключевым фактором при размещении общественных мест (ресторанов, библиотек, больниц и т. д.) и, следовательно, пассажирообразующих пунктов. В крупных городах линии метро служат магистральными ветками для пассажирского сообщения, а остальной транспорт обеспечивает развоз людей к локальным точкам города, поэтому данные о посещаемости ближайших станций вместе с другими пассажирообразующими пунктами можно считать основными для определения величины пассажиропотоков на наземном транспорте. Более того, из табл. 1 и 2 видны значения наполненности салона транспорта в определенный момент времени, а также

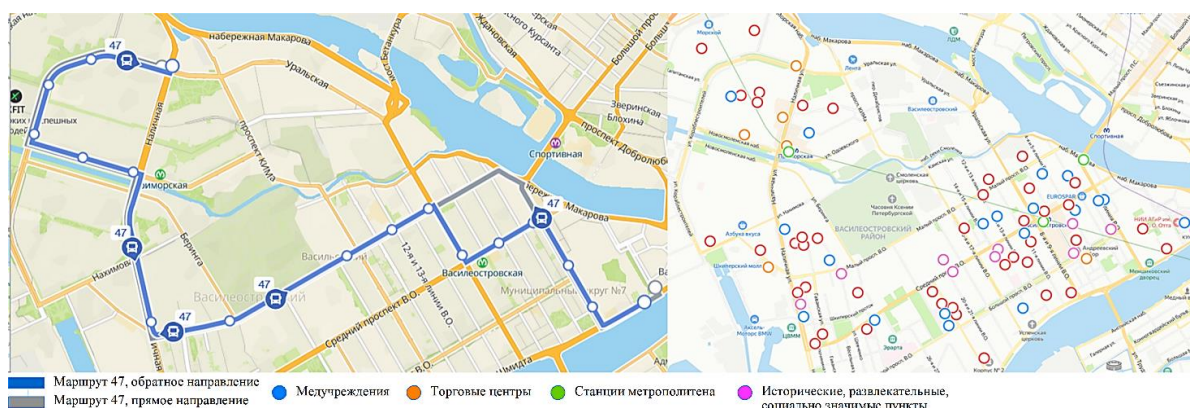


Рис. 1. Ближайшие пассажирообразующие пункты к маршруту 47

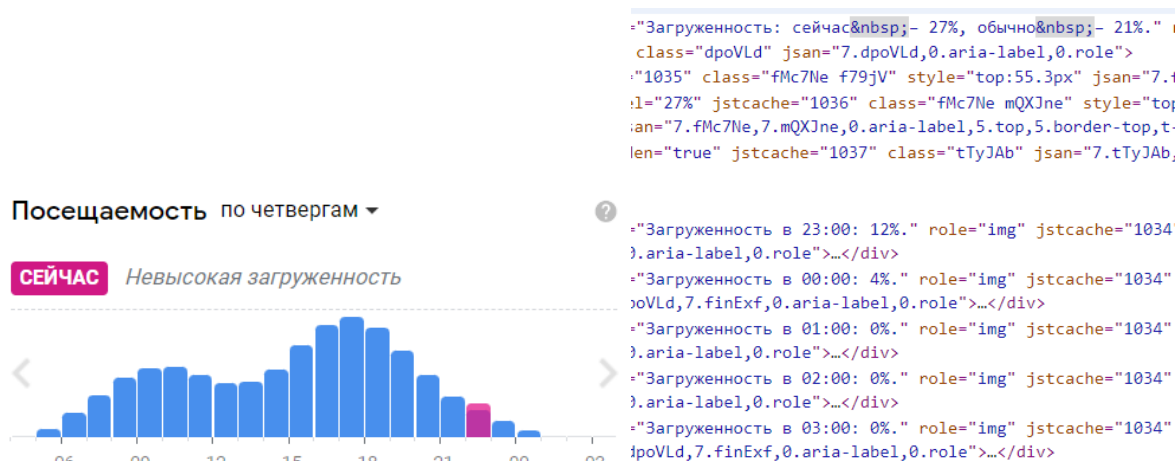


Рис. 2. Пример просмотра посещаемости станции метро «Василеостровская» в Google maps

количество человек на вход и выход. Эти значения можно использовать для более подробной экстраполяции для каждого остановочного пункта с учетом посещаемости мест согласно геолокации мобильных устройств. Учитывая тот факт, что пассажиры, пользующиеся метрополитеном, скорее всего не имеют личного автомобиля или не прибегают к нему при перемещении по городу, количество человек, посетивших станцию метро, становится потенциальным количеством пассажиров для ближайших маршрутов общественного транспорта.

Для определения прогнозного значения пассажиропотока в определенное время и в определенном месте можно применить метод интерполяции (при котором требуется прогноз пассажиропотока в промежуточный от времени замера реальных абсолютных значений момент) или экстраполяции (при котором требуется прогноз пассажиропотока в прошлый или будущий от времени замера реальных абсолютных значений момент). Общий алгоритм будет следующим. Производим путем приведения абсолютных значений пассажиропотока, полученных натурным методом, по относительной величине посещаемости пассажирообразующих пунктов. Далее осуществляем перевод приведенной величины к относительной величине посещаемости, получая, тем самым, абсолютное прогнозируемое значение пассажиропотока в определенное время. Данный подход представим в виде формулы

$$Q_{s+i,t+j,d+n} = \frac{Q_{s,t,d}}{k_{s,t,d}} k_{s+i,t+j,d+n}, \quad (1)$$

где  $Q_{s+i,t+j,d+n}$  – абсолютное прогнозируемое значение пассажиропотока с учетом посещаемости пассажирообразующих пунктов, пасс.;  $Q_{s,t,d}$  – абсолютное реальное значение пассажиропотока, полученное натурным методом, пасс.;  $k_{s,t,d}$  – коэффициент посещаемости пассажирообразующего пункта относительно общей недельной интенсивности потока в месте в момент определения пассажиропотока, полученного из открытой информации ГИС (см. рис. 2);  $k_{s+i,t+j,d+n}$  – коэффициент посещаемости пассажирообразующего пункта относительно общей недельной интенсивности потока в месте в желаемый момент времени для производимой экстраполяции пассажиропотока\*;  $s$ ,  $t$  и  $d$  – остановочный пункт, время и день недели соответственно;  $i$ ,  $j$  и  $n$  – соответствующие инкременты и (или)

декременты, позволяющие выбрать желаемые для прогнозирования пассажиропотока остановочный пункт, время и дату.

Рассматриваемый алгоритм хорош тем, что способен учитывать популярность того или иного маршрута в общем объеме перевозок, так как экстраполируются и интерполируются не глобальные значения пассажиропотока в исследуемой области, а именно реальные данные о перевозках на выбранном маршруте с учетом спроса на перевозки в указанной области.

Зная расписание для выбранного маршрута и посещаемость пассажирообразующих пунктов, связанных с ним, можно определить абсолютные прогнозные значения пассажиропотоков на вход, выход и общее количество человек в салоне для каждой остановки в расписании (табл. 3).

Стоит заметить, что каждое значение пассажиропотока в салоне, на выход и на вход, считается независимо друг от друга с учетом интенсивности потока и экспериментальных значений, поэтому иногда суммарные значения могут иметь небольшие расхождения (рис. 3).

Полученные прогнозные значения пассажиропотока являются весьма перспективными. Например, с их помощью можно находить среднюю дальность ездки пассажиров.

Для определения средней дальности ездки пассажиров нужно вывести относительный показатель – *коэффициент уникальной сменяемости пассажиров*. Этот коэффициент является показателем количества новых индивидов, присоединившихся к рассматриваемому потоку пассажиров. Его применение рассматривается далее.

Среди технико-эксплуатационных показателей для пассажирского транспорта существует коэффициент сменяемости  $\eta_{см}$ , который определяется как отношение количества перевезенных за рейс пассажиров к номинальной пассажировместимости АТС и показывает условную среднерейсовую наполняемость подвижного состава, но не отражает сменяемость индивидов в конкретный момент времени. Ниже приведен авторский метод получения коэффициента уникальной сменяемости пассажиров, ключевой особенностью которого является привязка к маршруту, проходящему через анализируемый остановочный пункт в конкретный момент времени.

\* Также получаем из открытой информации ГИС. Как показано на рис. 2 (справа), информация

о посещаемости тех или иных мест уже представлена в виде процентного значения.



Таблица 3

**Прогнозные абсолютные значения количества пассажиров в салоне, прямое направление  
(понедельник, первые два рейса)**

Остановочный пункт	Рейс 1	Рейс 2
Ул. Кораблестроителей	2	2
Ул. Кораблестроителей, 35	3	3
Капитанская ул.	7	7
Новосмоленская наб., уг. ул. Кораблестроителей	7	7
Магазин «Строитель»	7	7
Ст. метро «Приморская»	8	8
Новосмоленская наб.	7	7
Ул. Нахимова	8	8
Малый пр. В. О., уг. Наличной ул.	6	8
Ул. Шевченко	6	8
24–25-я линии В. О.	9	12
18–19-я линии В. О.	9	12
12–13-я линии В. О.	10	14
8–9-я линии В. О., уг. Малого пр. В. О.	7	9
Наб. Макарова	5	7
1-я и Кадетская линии В. О.	7	10
1-я и Кадетская линии, уг. Среднего пр.	6	8
1-я линия В. О., уг. Большого пр. В. О.	4	5
Университетская наб., уг. 1-й и Кадетской линий В. О.	4	5
Университет	5	5

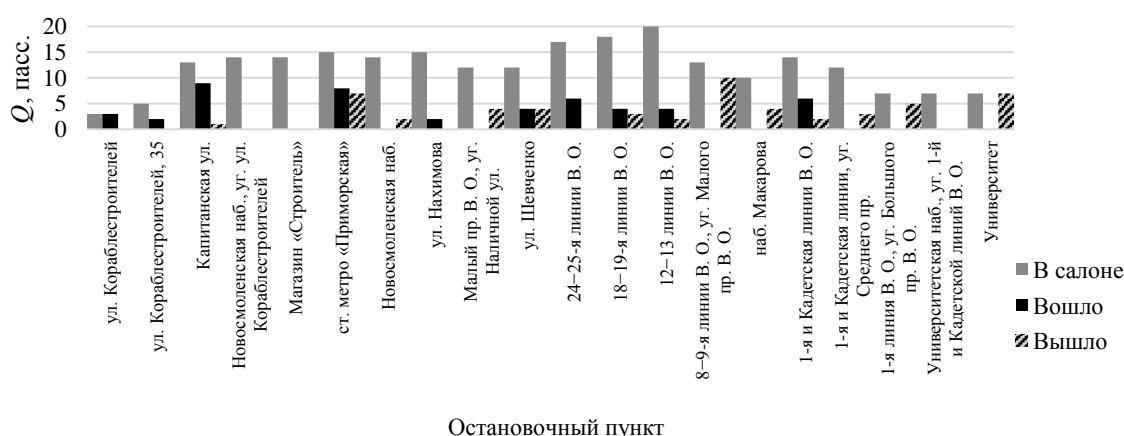


Рис. 3. Эпюра пассажиропотока на маршруте 47 в прямом направлении, вечерний час пик

Значение коэффициента уникальной сменяемости пассажиров можно рассмотреть как абсолютное значение разницы количества человек на вход и выход в определенный момент времени (без учета количества человек в салоне) к общему количеству человек в салоне с учетом произошедшей смены пассажиров. Полученное отношение представляет собой коэффициент уникальной сменяемости пассажиров:

$$k_{\text{уник}} = \frac{|Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}}|}{Q_{\text{салон}}}, \quad (2)$$

где  $k_{\text{уник}}$  – коэффициент уникальной сменяемости пассажиров на остановочных пунктах;  $Q_{\text{вх}}$  и  $Q_{\text{вых}}$  – количество вошедших и вышедших человек соответственно, пасс.;  $Q_{\text{салон}}$  – количе-

ство человек в салоне с учетом только что вошедших и вышедших, пасс.

Ниже приведены расчетные значения коэффициента  $k_{\text{уник}}$  для одного дня (табл. 4).

Далее, умножая коэффициент уникальной сменяемости пассажиров на длину маршрута, получаем среднюю длину ездки пассажира, км:

$$l_{\text{е.п}} = k_{\text{уник}} l_{\text{м}}, \quad (3)$$

где  $l_{\text{е.п}}$  – средняя дальность ездки пассажира, км;  $l_{\text{м}}$  – длина маршрута, км.

Следует сделать оговорку, что коэффициент уникальной сменяемости пассажиров всегда принимает значение, равное единице на начальном и конечном остановочном пункте (за исключением маршрутов с перекрывным тарифом). В этих местах происходит первая

посадка и последняя высадка, количество вошедших или вышедших пассажиров будет равно количеству пассажиров в салоне соответственно. На данном этапе мы находимся в состоянии неопределенности по отношению к намерениям пассажира проехать определенную часть маршрута. Чтобы исключить не-

определенность, для коэффициента уникальной сменяемости пассажиров требуется как минимум один акт смены, поэтому рассчитывать среднюю дальность ездки пассажира следует без учета коэффициентов на конечных пунктах, но с учетом полной длины маршрута (табл. 5).

Таблица 4

**Коэффициент уникальной сменяемости пассажиров, прямое направление  
(понедельник, первые два рейса)**

Остановочный пункт	Рейс 1	Рейс 2
Ул. Кораблестроителей	1,000	1,000
Ул. Кораблестроителей, 35	0,667	0,667
Капитанская ул.	0,571	0,571
Новосмоленская наб., уг. ул. Кораблестроителей	0,000	0,000
Магазин «Строитель»	0,000	0,000
Ст. метро «Приморская»	0,000	0,000
Новосмоленская наб.	0,143	0,143
Ул. Нахимова	0,125	0,125
Малый пр. В. О., уг. Наличной ул.	0,333	0,375
Ул. Шевченко	0,000	0,000
24–25-я линии В. О.	0,333	0,333
18–19-я линии В. О.	0,000	0,083
12–13-я линии В. О.	0,100	0,143
8–9-я линии В. О., уг. Малого пр. В. О.	0,714	0,778
Наб. Макарова	0,400	0,429
1-я и Кадетская линии В. О.	0,286	0,300
1-я и Кадетская линии, уг. Среднего пр.	0,333	0,250
1-я линия В. О., уг. Большого пр. В. О.	0,750	0,800
Университетская наб., уг. 1-й и Кадетской линий В. О.	0,000	0,000
Университет	1,000	1,000

Таблица 5

**Расчетное значение длины ездки для уникального пассажира, прямое направление  
(понедельник, первые два рейса)**

Остановочный пункт	Рейс 1	Рейс 2
Ул. Кораблестроителей	8,480	8,480
Ул. Кораблестроителей, 35	5,653	5,653
Капитанская ул.	4,846	4,846
Новосмоленская наб., уг. ул. Кораблестроителей	0,000	0,000
Магазин «Строитель»	0,000	0,000
Ст. метро «Приморская»	0,000	0,000
Новосмоленская наб.	1,211	1,211
Ул. Нахимова	1,060	1,060
Малый пр. В. О., уг. Наличной ул.	2,827	3,180
Ул. Шевченко	0,000	0,000
24–25-я линии В. О.	2,827	2,827
18–19-я линии В. О.	0,000	0,707
12–13-я линии В. О.	0,848	1,211
8–9-я линии В. О., уг. Малого пр. В. О.	6,057	6,596
Наб. Макарова	3,392	3,634
1-я и Кадетская линии В. О.	2,423	2,544
1-я и Кадетская линии, уг. Среднего пр.	2,827	2,120
1-я линия В. О., уг. Большого пр. В. О.	6,360	6,784
Университетская наб., уг. 1-й и Кадетской линий В. О.	0,000	0,000
Университет	8,480	8,480

## Выводы

Полученные значения экстраполяции пассажиропотоков дают возможность дальнейшего определения расчетных величин требуемого подвижного состава, средней дальности ездки пассажира, запаса провозной способности, внесения изменений в существующие маршруты. Это, в свою очередь, способствует повышению социального эффекта городских пассажирских перевозок, обеспечению дополнительного контроля оплаты проезда и др.

Данные методы позволяют уточнять результаты экстраполяции за счет большего использования статистических данных, получаемых натурным или машинным способами. Учитывая простоту, скорость расчетов, данный метод может найти применение при анализе существующих и проектировании новых городских маршрутов общественного транспорта без дорогостоящего оборудования и программного обеспечения [20].

## Список источников

1. Копылова Е. В. Адаптация метода организации пассажиропотоков для крупных агломераций // Наука и техника транспорта. 2021. № 2. С. 81–86.
2. Вакуленко С. П., Евреенова Н. Ю. Закономерности передвижений пассажиропотоков в транспортно-пересадочных узлах // Федор Петрович Кочнев – выдающийся организатор транспортного образования и науки в России : материалы Международной научно-практической конференции. Москва, 2021. С. 272–275.
3. Копылова Е. В. Пассажиропотоки городских агломераций // Транспорт: наука, техника, управление : научный информационный сборник. 2021. № 5. С. 50–57.
4. Саломзода Р. С., Бобоев М. М. Анализ пассажиропотоков, обслуживаемых автобусными маршрутами Худжанда // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 3. С. 67–73.
5. Боева П. А., Богданов М. В. Метод перераспределения маршрутной сети обслуживаемой СПб ГУП «Пассажиравтотранс» при открытии нового автобусного парка // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. Т. 8, № 1. С. 16–27.
6. Ланьшина Т. А., Логинова А. Д., Стоянов Д. Е. Переход крупнейших экономик мира к углеродной нейтральности: сферы потенциального сотрудничества с Россией // Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика. 2021. Т. 16, № 4. С. 98–125.
7. Показатели комфортности транспортного обслуживания в городских автобусах / Т. П. Менухова, М. С. Высоцкая, С. А. Коковина, Ю. В. Бородин // Транспортное дело России. 2019. № 1. С. 237–241.
8. Михайлов М. В., Белянчикова Н. В. Обследование пассажиропотоков на городских автобусных маршрутах // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства : материалы III Международной научно-практической конференции. Чебоксары, 2021. С. 439–444.
9. Особенности моделирования пассажиропотока объектов транспортной инфраструктуры / С. П. Вакуленко, Н. Ю. Евреенова, О. И. Коровкина, К. В. Алексеева // Экономика железных дорог. 2021. № 7. С. 41–47.
10. Просяник Р. В. Информационная база прогнозирования транспортных услуг в сфере пассажирских перевозок // Труды 80-й студенческой научно-практической конференции Ростовского государственного университета путей сообщения. Воронеж, 2021. С. 102–104.
11. Оценка пропускной способности инфраструктуры транспортно-пересадочных узлов московского центрального кольца / А. Е. Чекмарев, С. А. Васильев, А. Н. Кузнецова, А. В. Подорожкина // Наука и техника транспорта. 2022. № 3. С. 14–20.
12. Евреенова Н. Ю. Организация пассажиропотоков на объектах транспортной инфраструктуры // Вопросы устойчивого развития общества. 2021. № 12. С. 781–789.
13. Вакуленко С. П., Роменский Д. Ю., Калинин К. А. Метод прогнозирования пассажиропотоков при организации высокоскоростных перевозок // Транспорт Российской Федерации. 2021. № 1/2. С. 34–39.
14. Вакуленко С. П., Евреенова Н. Ю. Формирование транспортно-пересадочных узлов в зонах тяготения пассажиропотоков пригородных зон // Транспорт: проблемы, цели, перспективы (Transport 2021) : материалы II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (Пермь, 12 февраля 2021 г.) / под редакцией Е. В. Чабановой. Пермь : Пермский филиал Волжского государственного университета водного транспорта, 2021. С. 549–552.
15. Алексеев Н. Ю., Зюзин П. В. Оценка применимости Wi-Fi-аналитики в исследованиях пассажиропотоков городского общественного транспорта на примере Москвы // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 3. С. 54–66.

16. Чистяков А. С. Гравитационная модель пассажиропотоков направления Красноярск – Ачинск // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах : труды V Международной научно-практической конференции. Новокузнецк, 2021. С. 112–117.
17. Аненко С. А. Имитационное моделирование распределения пассажиропотоков средствами Anylogic // Информационный бюллетень Омского научно-образовательного центра ОмГТУ и ИМ СО РАН в области математики и информатики : материалы XI Международной молодежной научно-практической конференции с элементами научной школы (Омск, 22–29 апреля 2021 г.) / ответственный редактор А. В. Зыкина. Омск : Омский государственный технический университет, 2021. Т. 5, № 1. С. 77.
18. Маханкин А. В., Намиот Д. Е. Визуальный анализ данных пассажиропотоков московского метрополитена // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10, № 6. С. 133–140.
19. Иванов Н. В. Имитационное моделирование как инструмент исследования пассажиропотоков // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии : сборник докладов Второй Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 2021. С. 100–102.
20. Матвеев А. Г. Определение времени ездки и технико-эксплуатационных показателей работы автомобилей на междугородных маршрутах при помощи MS Excel в образовательном процессе // Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки. 2021. № 8. С. 11–17.

## References

1. Kopylova E. V. Adaptation of the organizing passenger traffic method for large agglomerations. *Science and Technology of Transport*. 2021;(2):81–86. (In Russ.).
2. Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu. Patterns of the passenger traffic movement in transport hubs. *Fedor Petrovich Kochnev is an outstanding organizer of transport education and science in Russia. Proceedings of the International Scientific Practical Conference*. Moscow; 2021. P. 272–275. (In Russ.).
3. Kopylova E. V. Passenger flows of urban agglomerations. *Transport: science, technology, management. Scientific information collection*. 2021;(5):50–57. (In Russ.).
4. Salomzoda R. S., Boboev M. M. Analysis of passenger traffic served by bus routes of Khujand. *World of Transport*. 2021;19(3):67–73. (In Russ.).
5. Boeva P. A., Bogdanov M. V. The method of the route network redistribution served by St. Petersburg State Unitary Enterprise “Passazhiravtotrans” when opening a new bus fleet. *Innovative transport systems and technologies*. 2022;8(1):16–27. (In Russ.).
6. Lanshina T. A., Loginova A. D., Stoyanov D. E. The transition of the world's largest economies to carbon neutrality: areas of potential cooperation with Russia. *International Organizations Research Journal: education, science, new economy*. 2021;16(4):98–125. (In Russ.).
7. Menukhova T. P., Vysotskaya M. S., Kokovina S. A., Borodina Yu. V. Indicators of transport service comfort in urban buses. *Transport business of Russia*. 2019;(1):237–241. (In Russ.).
8. Mikhailov M. V., Belyanchikova N. V. Survey of passenger traffic on urban bus routes. *Prospects for the development of mechanization, electrification and automation of agricultural production. Proceedings of the III International scientific-practical conference*. Cheboksary; 2021. P. 439–444. (In Russ.).
9. Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu., Korovkina O. I., Alekseeva K. V. Peculiarities of modeling the passenger flow of transport infrastructure facilities. *The Railway Economics*. 2021;(7):41–47. (In Russ.).
10. Prosyaniuk R. V. Information base for forecasting transport services in the field of passenger transportation. *Proceedings of the 80th student scientific and practical conference of Rostov State Transport University*. Voronezh; 2021. P. 102–104. (In Russ.).
11. Chekmarev A. E., Vasiliev S. A., Kuznetsova A. N., Podorozhkina A. V. Evaluation of the infrastructure carrying capacity of transport interchange nodes of the Moscow Central Ring. *Science and technology of transport*. 2022;(3):14–20. (In Russ.).
12. Evreenova N. Yu. Organization of passenger flows at the transportation facilities. *Issues of sustainable development of society*. 2021;(12):781–789. (In Russ.).
13. Vakulenko S. P., Romensky D. Yu., Kalinin K. A. Passenger traffic forecasting method for organizing high-speed transportation. *Transport of the Russian Federation*. 2021;(1/2):34–39. (In Russ.).
14. Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu. Formation of transport hubs in the gravity zones of suburban passenger flows. *Transport: problems, goals, prospects (Transport 2021). Proceedings of the II All-Russian scientific and technical conference with international participation (Perm, February 12, 2021)*. Edited by E. V. Chabanova. Perm: Perm branch of the Volga State University of Water Transport; 2021. P. 549–552. (In Russ.).

15. Alekseev N. Yu., Zyuzin P. V. Evaluation of the Wi-Fi analytics applicability in the study of passenger traffic in urban public transport on the example of Moscow. *World of transport*. 2021;19(3):54–66. (In Russ.).
16. Chistyakov A. S. Gravitational model of passenger traffic in the Krasnoyarsk-Achinsk direction. *Modeling and science-intensive information technologies in technical and socio-economic systems. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. Novokuznetsk; 2021. P. 112–117. (In Russ.).
17. Anenko S. A. Simulation modeling of the distribution of passenger flows by means of Anylogic. *Newsletter of the Omsk Scientific and Educational Center of the Omsk State Technical University and the Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in the field of mathematics and computer science. Proceedings of the XI International Youth Scientific and Practical Conference with elements of a scientific school (Omsk, April 22–29, 2021)*. Executive editor A. V. Zykina. Omsk: Omsk State Technical University; 2021. P. 77. (In Russ.).
18. Makhankin A. V., Namiot D. E. Visual analysis of passenger traffic data of the Moscow metro. *International Journal of Open Information Technologies*. 2022;10(6):133–140. (In Russ.).
19. Ivanov N. V. Simulation modeling as a tool for studying passenger flows. *Aerospace Instrumentation and Operational Technologies. Proceedings of the Second International scientific conference*. Saint Petersburg; 2021. P. 100–102. (In Russ.).
20. Matveev A. G. Determination of driving time and technical and operational indicators of car operation on long-distance routes using MS Excel in the educational process. *Eurasian Union of Scientists. Series: technical and physical and mathematical sciences*. 2021;(8):11–17. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

**А. Г. Матвеев** – студент IV курса механико-машиностроительного факультета Санкт-Петербургского горного университета.

**Т. А. Менухова** – доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин Санкт-Петербургского горного университета, кандидат технических наук.

### **Information about the authors**

**A. G. Matveev** – Senior Student of the Mechanical Engineering Faculty, Saint Petersburg Mining University.

**T. A. Menukhova** – Associate Professor of the Transport Technological Processes and Machines Department, Saint Petersburg Mining University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 21.02.2023; одобрена после рецензирования 24.03.2023; принята к публикации 26.04.2023.

The article was submitted 21.02.2023; approved after reviewing 24.03.2023; accepted for publication 26.04.2023.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 40–47.  
The Siberian Transport University Bulletin. 2023. No. 2 (65). P. 40–47.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья  
УДК 629.084  
doi 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_40

### Обоснование параметров катка для повышения эффективности уплотнения земляных насыпей в транспортном строительстве

Сергей Валерьевич Савельев<sup>1✉</sup>, Анастасия Александровна Юрченко<sup>2</sup>,  
Роман Евгеньевич Литовченко<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

<sup>1</sup> saveliev\_sergval@mail.ru✉

<sup>2</sup> anastasia.yurch2003@gmail.com

<sup>3</sup> rljob@bk.ru

**Аннотация.** Развитие транспортной инфраструктуры – это приоритетная задача для нашей страны с ее огромными, до конца не освоенными территориями. Транспортное строительство требует применения передовых технологий и самой современной, высокопроизводительной строительной техники. В статье обосновывается актуальность и важность процесса уплотнения дорожных материалов при строительстве грунтовых насыпей автомобильных дорог. Именно земляное полотно является несущим инженерным сооружением для дорогостоящих верхних слоев дорожного основания и покрытия. Если грунты земляного полотна будут уплотнены некачественно, это приведет к разрушению не только самой грунтовой насыпи, но и расположенных на ней верхних технологических слоев, а это недопустимые убытки. Дорожные самоходные катки – это основные машины, которые выполняют уплотнение технологических слоев дороги, обеспечивая их прочность и долговечность. Различные конструкции и типы дорожных катков появились вследствие многообразия уплотняемых материалов и их свойств. Для обеспечения эффективного процесса уплотнения необходимо правильно выбирать не только тип уплотняющей машины, но и режимы ее работы. Рассматривается новый рабочий орган дорожного катка, способный регулировать контактные давления в расширенном диапазоне. Представлен экспериментальный образец и расчетная схема для определения основных параметров. В статье приводится разработанная методика обоснования параметров дорожного катка с новым рабочим органом для строительства транспортной инфраструктуры. Использование катка новой конструкции и правильно подобранные параметры его работы позволят повысить эффективность строительства и уменьшить затраты на технологическую операцию уплотнения слоев земляного полотна.

**Ключевые слова:** строительство, уплотнение, дорожные катки, эффективность, параметры, конструкция

**Финансирование:** исследование проведено при поддержке Российского научного фонда и правительства Омской области, научный грант № 23-29-10010 «Разработка дорожных катков для повышения эффективности транспортного строительства с учетом региональных условий Омской области».

**Для цитирования:** Савельев С. В., Юрченко А. А., Литовченко Р. Е. Обоснование параметров катка для повышения эффективности уплотнения земляных насыпей в транспортном строительстве // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 40–47. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_40.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

### Road roller parameters substantiation to improve the efficiency of compacting in transport construction

Sergey V. Savelyev<sup>1✉</sup>, Anastasia A. Yurchenko<sup>2</sup>, Roman E. Litovchenko<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

<sup>1</sup> saveliev\_sergval@mail.ru✉

<sup>2</sup> anastasia.yurch2003@gmail.com

<sup>3</sup> rljob@bk.ru



**Abstract.** The development of transport infrastructure is a priority task for our country with its vast and not fully developed territories. Transport construction requires the use of advanced technologies and the most modern and high-performance construction equipment. The article substantiates the relevance and importance of the process of compaction of road materials in the construction of earth embankments of highways. It is the subgrade that is the supporting engineering structure for the expensive upper layers of the road base and pavement. If the subgrade soils are poorly compacted, this will lead not only to the destruction of the earth embankment itself, but also to the destruction of the upper technological layers located on it, and these are unacceptable losses. Self-propelled road rollers are the main machines that compact the technological layers of the road, ensuring their strength and durability. Various designs and types of road rollers have appeared due to the variety of compacted materials and their properties. To ensure an efficient compaction process, it is necessary to correctly select not only the type of compacting machine, but also its operating modes. A new working body of a road roller capable of regulating contact pressures in an extended range is considered. An experimental sample and a calculation scheme for determining the main parameters are presented. The article provides a developed methodology for substantiating the parameters of a road roller with a new working body for the construction of transport infrastructure. The use of a new design roller and properly selected parameters of its operation will increase the efficiency of construction and reduce the cost of the technological operation of compacting the subgrade layers.

**Keywords:** construction, compaction, road rollers, efficiency, parameters, design

**Financial Support:** the study is supported by the Russian Science Foundation and the Government of the Omsk Region, scientific grant no. 23-29-10010 *The development of road rollers to improve the efficiency of transport construction, taking into account the regional conditions of the Omsk Region.*

**For citation:** Savelyev S. V., Yurchenko A. A., Litovchenko R. E. Road roller parameters substantiation to improve the efficiency of compacting in transport construction. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2023;(65):40–47. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_40.

## Введение

Уплотнение земляного полотна – это основная операция, обеспечивающая требуемую плотность, прочность и работоспособность инженерных насыпей для автомобильных дорог, оснований железных дорог и других инженерно-технических сооружений [1–3]. Основными машинами, выполняющими эту операцию, являются дорожные катки с различными типами рабочих органов. Данные машины, вследствие физического воздействия, деформируют обрабатываемый материал, тем самым повышая его прочностные характеристики.

Большое количество строительных материалов и их физико-механических свойств заставляет разрабатывать различные конструкции и типы уплотняющих машин, реализующие разные способы деформирования уплотняемых грунтов земляного полотна [2, 3]. Наиболее эффективны вибрационные машины, которые интенсифицируют процесс обработки грунтов, в отличие от статических дорожных катков. При этом существует глобальная проблема эффективного уплотнения грунтов для всех типоразмеров и конструкций дорожных катков, которая заключается в том, что в процессе приложения уплотняющих усилий грунт деформируется при каждом циклическом приложении нагрузки. При этом на каждом новом проходе катка грунт набирает плотность и постоянно изменяет свои физико-механические свойства. Поэтому нормативные документы рекомендуют использо-

вать различные по массе типоразмеры катков [1]. Так, при устройстве земляного полотна автомобильной дороги необходимо применять дорожные катки двух типов – средней и тяжелой массы.

Существуют дорожные катки, которые в определенной степени способны регулировать контактные давления, подстраиваясь под изменяемые физико-механические свойства уплотняемого материала, например кулачковые катки. Рабочие органы таких катков имеют на своей поверхности кулачки, и, когда материал рыхлый, такой валец проваливается в материал и контактирует с ним всей поверхностью, от основания кулачка до его опорной части. По мере уплотнения материал становится плотнее и прочнее, кулачки уже не проваливаются и валец контактирует с материалом лишь частью своей поверхности, т. е. контактная площадь уменьшается, а контактные давления увеличиваются. Тем не менее диапазона саморегулирования контактных давлений у таких дорожных катков недостаточно для достижения требуемой плотности обрабатываемой среды, приходится дополнительно применять более тяжелые типы катков.

Использование двух разных машин на одной технологической операции уменьшает производительность работы и увеличивает ее энергоемкость. Поэтому необходимо не только правильно выбирать уплотняющую машину, но и обеспечивать эффективные режимы ее работы.

### Материалы и методы исследования

Описание эффективных процессов деформирования различных материалов, одним из которых является процесс уплотнения грунтовых сред, – это важная научная задача. Она должна учитывать изменение напряжений и деформаций в грунтах, их физико-механических характеристик при воздействии на них рабочих органов катков в течение всего процесса уплотнения. Одним из методов решения этой задачи является выбор уплотняющей машины и ее параметров, которые обеспечивают выполнение всей технологической операции, от начала до конца, одной уплотняющей строительной машиной.

В статье рассматривается возможность обоснования параметров катка с новой конструкцией рабочего органа (рис. 1) [4], предложенного в СибАДИ. Рабочий орган катка состоит из двух металлических обечайек, которые расположены одна внутри другой. Обечайки имеют соосные отверстия, перекрытием которых регулируются контактные давления от катка на уплотняемый слой земляного полотна.

Основные параметры представленного рабочего органа катка, влияющие на процесс уплотнения, – это общепринятые параметры: диаметр и ширина вальца, а также новые: угол поворота внешней обечайки и отношение площади поверхности вальца к площади отверстий.

Оригинальные технические решения всегда требуют разработки нового подхода к обоснова-

нию режимных и конструктивных параметров строительной машины. Отличительной особенностью данной конструкции рабочего органа катка является расширенный диапазон контактных давлений. Именно эта особенность позволяет рассматриваемому катку более эффективно уплотнять грунтовые среды по сравнению с серийными дорожными катками.

Рассмотрим расчетную схему работы представленного рабочего органа катка при уплотнении слоев земляного полотна (рис. 2).

Контактные давления катка определяются выражением (1), установленным профессором В. Б. Пермяковым [5]:

$$\sigma_t(t) < \sigma_k(t) \leq |\sigma_{пр}(t)|, \quad (1)$$

где  $\sigma_t$  – предел текучести уплотняемого материала;  $\sigma_k$  – контактные давления;  $\sigma_{пр}$  – предел прочности уплотняемого материала.

Значение достигаемых контактных давлений определяется параметрами дорожного катка и физико-механическими свойствами грунтовой среды. Описать их можно формулой (2), полученной профессором Н. Я. Хархутой [6]:

$$\sigma_k = \sqrt{q_l \frac{E}{R}}, \quad (2)$$

где  $q_l$  – линейное давление на грунт, которое зависит от веса катка и ширины рабочего органа;  $E$  – модуль деформации грунта;  $R$  – радиус вальца.

В нашем случае имеем новый рабочий орган катка. Необходимо определить площадь пятна

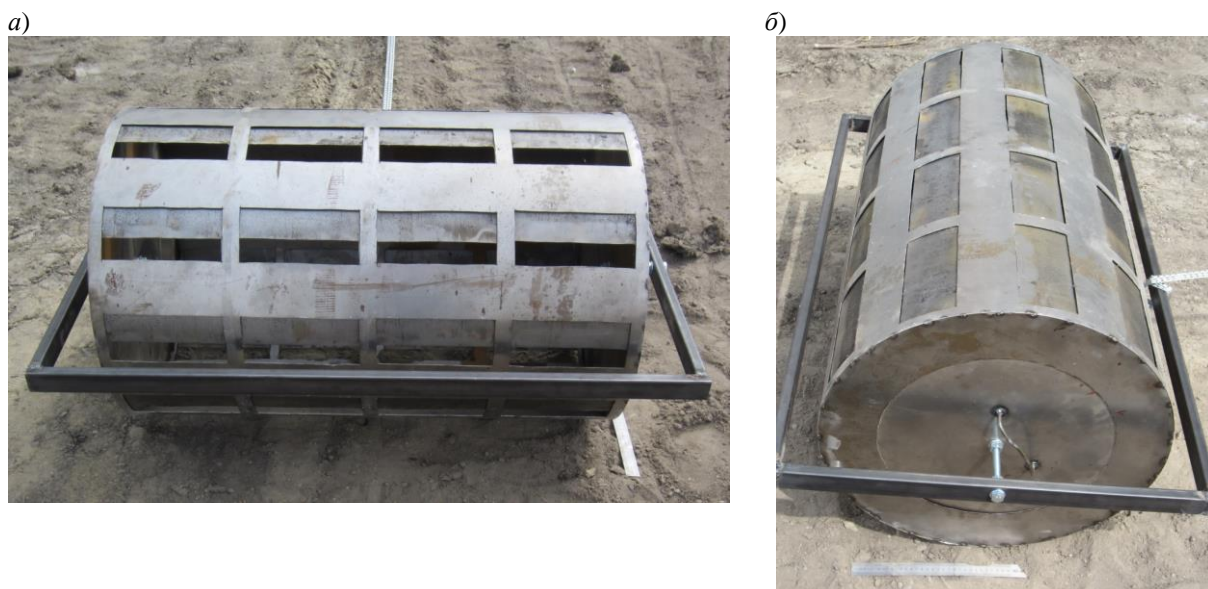


Рис. 1. Рабочий орган дорожного катка с расширенным диапазоном контактных давлений:  
а – фронтальный вид; б – вид сбоку

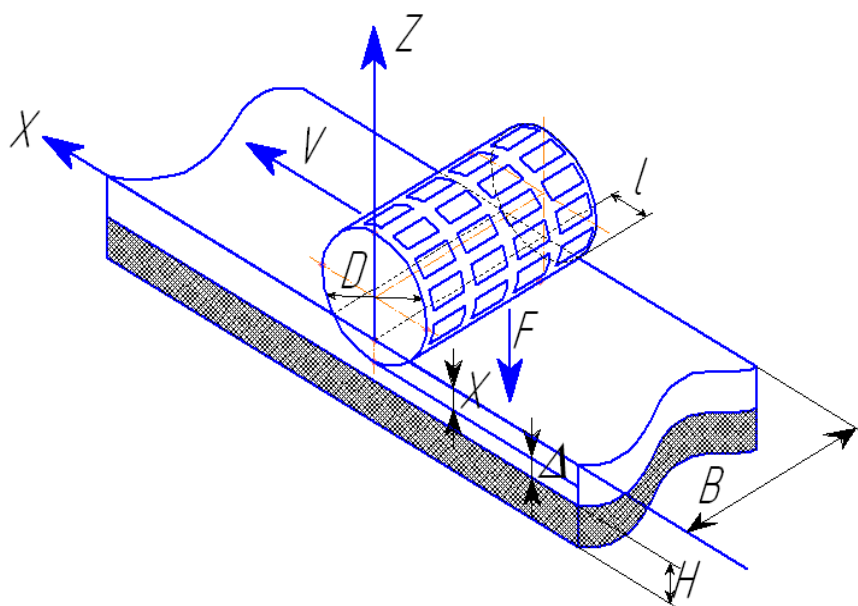


Рис. 2. Расчетная схема рабочего органа катка при уплотнении слоев земляного полотна

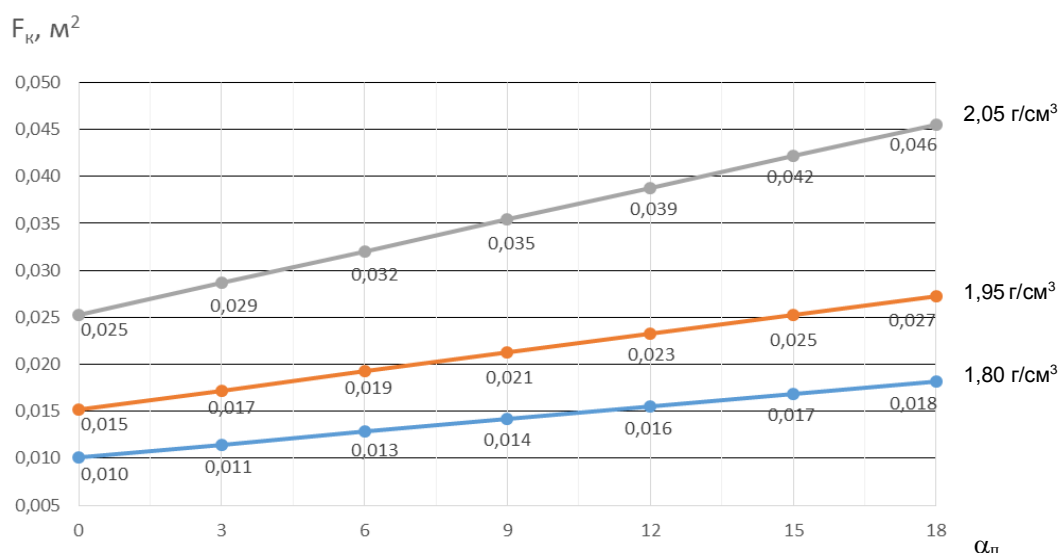


Рис. 3. Зависимость площади пятна контакта  $F_k$  от угла поворота  $\alpha_n$  внешней обечайки относительно внутренней

контакта  $F_k$ , зависящую от относительной площади поверхности вальца  $S_{отв}/S_B$  и угла поворота обечайки  $\alpha_n$  (рис. 3). Установлено, что отверстия в начальном положении должны быть закрыты и внешняя поверхность вальца должна быть сплошной. Площадь контакта в этом случае максимальная и контактные давления на начальном этапе процесса уплотнения минимальны. В процессе уплотнения плотность грунтовой среды увеличивается. Контактные давления нужно тоже увеличивать. При провороте одной обечайки относительно другой в

вальце проявятся отверстия. Площадь поверхности вальца уменьшится, а контактные давления увеличатся. В конце процесса уплотнения отверстия должны обеспечить минимальную контактную площадь вальца (рабочий орган является решетчатым вальцом), при этом достигаются максимальные контактные давления.

Величина относительной ширины вальца  $B$  зависит от угла поворота обечайки и площади поверхности вальца:

$$B = f\left(\alpha_n, \frac{S_{отв}}{S_B}\right), \quad (3)$$

где  $\alpha_n$  – угол поворота внешней обечайки;  $S_{отв}$  – площадь отверстий;  $S_v$  – площадь вальца.

Значения, входящие в зависимость (3), были определены в результате экспериментальных исследований [7, 8]. Они характеризуют способность нового вальца изменять контактные давления в расширенном диапазоне. Разработанный экспериментальный образец катка (см. рис. 1) подтвердил эту способность.

Проведенный анализ исследований в области уплотнения грунтовых сред [3, 5–10] показал, что для повышения интенсивности протекания процесса уплотнения необходимо применять вибрацию. Создаваемые дорожным катком линейные контактные давления при этом должны учитывать вибрационную составляющую, что можно учесть следующей формулой [9]:

$$q_l = \frac{k_{пр}(P + Q)}{B}, \quad (4)$$

где  $k_{пр}$  – коэффициент;  $P$  – вынуждающая сила вибровозбудителя;  $Q$  – вес, приходящийся на валец;  $B$  – ширина вальца.

Коэффициент  $k_{пр}$  характеризует увеличение контактного давления с учетом динамики колебаний вальца от воздействия гармонической силы, создаваемой вибровозбудителем [9]. Возбуждение механических колебаний происходит вследствие вращательного движения несбалансированных масс вибровозбудителя, как правило расположенного на оси вальца вибрационного катка.

Вынуждающая сила определяется уравнением

$$P = m_g r \omega^2, \quad (5)$$

где  $m_g$  – масса дебаланса;  $r$  – эксцентриситет дебаланса;  $\omega$  – угловая частота колебаний.

Толщина прорабатываемого слоя грунта определится по зависимости, полученной Н. Я. Хархутой [9]:

$$H_{опт} = \frac{A_\omega}{A_o} \sqrt{qR}, \quad (6)$$

где  $A_\omega$  – текущая влажность грунта;  $A_o$  – оптимальная влажность грунта,  $q$  – удельное давление;  $R$  – радиус вальца.

Грунты инженерных насыпей необходимо уплотнять при значениях влажности, близких к оптимальной [9–11]. Значит,  $A_\omega/A_o = 1$ .

Особенностью нового рабочего органа катка является вероятность, что при открытых отверстиях не будет перекрываться какая-то часть

контактирующей с ним поверхности грунта. Это значит, что не все точки пятна контакта будут подвергнуты силовому воздействию. Необходимо учитывать этот факт при описании взаимодействия представленного рабочего органа с уплотняемым слоем. Эту проблему можно решить путем увеличения количества проходов катка по одному следу с учетом поступательной скорости движения катка. Поскольку каток, изменяя площадь контакта, может работать в режимах легкого или тяжелого катка, необходимо определить время его работы в этих режимах. Время прохода катка в разных режимах определим, учитывая скорость движения катка и длину технологической захватки [10]:

$$t_{лег} = \frac{L_3}{V_{лег}}, \quad (7)$$

$$t_{тяж} = \frac{L_3}{V_{тяж}}, \quad (8)$$

где  $L_3$  – длина захватки;  $V_{лег}$ ,  $V_{тяж}$  – скорость движения в режиме легкого и тяжелого катка соответственно.

Нужно учитывать, что грунт под катком не все время пребывает под нагрузкой. Поэтому среднее время под нагрузкой за один проход должно равняться:

$$\langle t \rangle = \theta t_{лег}, \quad (9)$$

где  $\theta$  – вероятность того, что точка попала под действие рабочего органа за один проход.

При этом должно соблюдаться условие

$$\langle t \rangle \geq t_{тяж}. \quad (10)$$

В таком случае количество проходов в режиме легкого катка  $n_{лег}$  будет больше количества проходов в режиме тяжелого катка  $n_{тяж}$  или равно ему:

$$\langle t \rangle = n \theta t_{лег} \geq n_{тяж} t_{тяж}, \quad (11)$$

$$t_{лег} = \frac{n_{тяж} t_{тяж} \theta}{n}. \quad (12)$$

Используя вероятностный подход, определим вероятность попадания точки уплотняемой поверхности под действие рабочего органа в течение времени его контактирования с деформируемым грунтом:

$$\theta = S_{отв} / S_v. \quad (13)$$

Учитывая, что при движении катка по одному следу существует вероятность того, что при открытых отверстиях не всегда будет перекрываться какая-то часть поверхности грунта, то не все точки пятна контакта подвергнутся силовому воздействию требуемой интенсивности.

Вероятность того, что точка не попала под действие рабочего органа за один проход, определяется формулой

$$\gamma = 1 - \theta = 1 - \frac{S_{\text{отв}}}{S_{\text{в}}}. \quad (14)$$

Используем схему Бернулли с вероятностью успешного испытания и вероятностью неудачи:

$$P_n^m = C_n^m \theta^m \gamma^{n-m}, \quad (15)$$

где  $P_n^m$  – вероятность того, что заданная точка пятна контакта попадет под уплотняющее воздействие;  $C_n^m$  – число сочетаний из  $n$  по  $m$ .

$C_n^m$  определим по формуле

$$C_n^m = \frac{n!}{(n-m)!m!}. \quad (16)$$

Соответственно,  $C_n^m$  – это значение числа сочетаний для каждой точки пятна контакта на уплотняемой поверхности грунтового слоя. Полное время всей укатки участка определяется по СНиПу [11]:

$$T_{\text{лег}} = n_{\text{лег}} t_{\text{лег}}, \quad (17)$$

где  $T_{\text{лег}}$  – полное время укатки в режиме легкого катка, с.

В то же время должно выполняться условие

$$T_{\text{лег}} \geq T_{\text{тяж}}. \quad (18)$$

В режиме тяжелого катка среднее время будет рассчитываться из выражения

$$T = n_{\text{тяж}} t_{\text{тяж}}. \quad (19)$$

Количество проходов в режиме легкого катка может быть больше количества проходов в режиме тяжелого катка или равно ему:

$$n < t > \geq n_{\text{тяж}} t_{\text{тяж}}. \quad (20)$$

На основании представленной формулы определяем требуемое количество проходов для дорожного катка с адаптивным рабочим органом (с двойной обечайкой):

$$n > \frac{n_{\text{тяж}} t_{\text{тяж}}}{< t >} = \frac{n_{\text{тяж}} t_{\text{тяж}}}{\theta t_{\text{лег}}}. \quad (21)$$

Для использования формулы (21) сравним эффективность работы в режимах легкого и тяжелого катка.

В режиме тяжелого катка

$$A_{\text{тяж}} = W_{\text{тяж}} n_{\text{тяж}} t_{\text{тяж}}, \quad (22)$$

где  $A_{\text{тяж}}$  – работа в режиме тяжелого катка;  $W_{\text{тяж}}$  – мощность в режиме тяжелого катка.

Тогда как в режиме легкого катка используется формула

$$A_{\text{лег}} = W_{\text{лег}} n_{\text{лег}} t_{\text{лег}}. \quad (23)$$

При этом должно использоваться неравенство:

$$A_{\text{лег}} < A_{\text{тяж}}, \quad (24)$$

$$W_{\text{лег}} = W_{\text{тяж}}. \quad (25)$$

Переменные в формулах (24), (25) функционально зависят от скорости движения катка. Скорость катка в легком и тяжелом режимах определяется следующим образом:

$$V_{\text{лег}} = \frac{L_3}{t_{\text{лег}} n_{\text{лег}}}, \quad (26)$$

$$V_{\text{тяж}} = \frac{L_3}{t_{\text{тяж}} n_{\text{тяж}}}, \quad (27)$$

где  $V_{\text{лег}}$ ,  $V_{\text{тяж}}$  – скорость в режиме легкого и тяжелого катка;  $L_3$  – длина захватки (задается технологически, для катков составляет от 100 до 250 м).

Среднее количество проходов катка по одному следу и его производительность составят:

$$N = \left[ \frac{T_{\text{СНИП}} V_i}{\theta_i a_i} + 1 \right], \quad (28)$$

$$П = \frac{L_3 (B - A_{\text{пер}}) H_{\text{опт}} k_{\text{в}}}{L_3 V_{\text{ср}} n_{\text{СНИП}}}, \quad (29)$$

где  $N$  – среднее количество проходов;  $T_{\text{СНИП}}$  – время, рекомендуемое для работы катка на одной захватке в нормативной документации;  $V_i$  – скорость катка на  $i$ -м проходе;  $\theta_i$  – вероятность того, что точка уплотняемой поверхности грунта попала под действие рабочего органа на  $i$ -м проходе;  $a_i$  – средняя длина пятна контакта;  $П$  – производительность;  $A_{\text{пер}}$  – величина перекрытия проходов;  $H_{\text{опт}}$  – оптимальная толщина уплотняемого слоя грунта;  $k_{\text{в}}$  – коэффициент использования рабочего времени;  $V_{\text{ср}}$  – средняя скорость катка за все проходы по одному следу;  $n_{\text{СНИП}}$  – количество проходов, требуемое по СНиПу.

#### Результаты исследования

Рассмотрена новая конструкция рабочего органа дорожного катка, включающая в себя основную и дополнительную металлические обечайки с асимметричными отверстиями. Обоснована объемная расчетная схема рабочего органа, обладающая элементами научной новизны. Разработана методика определения параметров дорожного катка, оснащенного новым рабочим органом для повышения эффективности операции уплотнения грунтовых сред. Предлагаемая конструкция позволяет значительно расширить диапазон контактных давлений, создаваемых

строительной машиной при уплотнении дорожных материалов. Использование предлагаемого дорожного катка повышает эффективность и производительность технологических процессов и снижает себестоимость строительных работ.

### **Выводы**

1. Основной сложностью при работе дорожных катков является регулирование диапазона контактных давлений для эффективного уплотнения материала в течение всей технологической операции.

2. Применение новой конструкции дорожного катка, способного в расширенном диапазоне регулировать контактные давления, потребовало разработать методику обоснования его параметров.

3. Использование нового дорожного катка и выбор его рациональных конструктивных и режимных параметров позволит повысить эффективность строительства и снизить себестоимость работ по уплотнению строительных материалов.

### **Список источников**

1. Строительство земляного полотна автомобильных дорог. Часть 1. Механизация земляных работ при сооружении земляного полотна автомобильных дорог : стандарт организации : СТО НОСТРОЙ 2.25.23–2011 : введен 05.12.2011. Москва : МАДИ-плюс : БСТ, 2012. 66 с. (Автомобильные дороги).
2. Кустарев Г. В., Жуков С. И. Результаты экспериментальных исследований по созданию перспективных инженерно-дорожных машин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2019. № 4 (59). С. 46–55.
3. Шорохов Д. А., Тюремнов И. С. Прогнозирование технологических возможностей вибрационных катков при уплотнении грунтов // Семьдесят четвертая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием : сборник материалов конференции. Ярославль : Ярославский государственный технический университет, 2021. С. 331–334.
4. Патент № 162483 на полезную модель Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Дорожный каток : № 2015157015 : заявлено 29.12.2015 : опубликовано 24.05.2016 / Савельев С. В., Михеев В. В., Потеряев И. К., Белодед А. С. ; заявитель и патентообладатель ОмГТУ. 8 с.
5. Пермяков В. Б. Совершенствование теории, методов расчета и конструкций машин для уплотнения асфальтобетонных смесей : специальность 05.05.04 «Дорожные и строительные машины» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пермяков Владислав Борисович ; Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет. Омск, 1992. 485 с.
6. Хархута Н. Я., Васильев Ю. М., Охраненко Р. К. Уплотнение грунтов дорожных насыпей. Москва : Автотрансиздат, 1958. 144 с.
7. Савельев С. В., Потеряев И. К., Белодед А. С. Перспективные дорожные катки для уплотнения грунтовых насыпей при строительстве транспортных объектов Сибири // Транспорт и логистика Якутской Арктики / Торгово-промышленная палата Республики Саха (Якутия). Якутск : Цумори Пресс, 2016. С. 159–164.
8. Савельев С. В., Белодед А. С. Повышение эффективности уплотнения земляного полотна дорожными катками // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет. Омск : СибАДИ, 2017. С. 228–230.
9. Хархута Н. Я., Васильев Ю. М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. Москва : Транспорт, 1975. 285 с.
10. Форсблад Л. Вибрационное уплотнение грунтов и оснований / пер. с англ. И. В. Гагариной. Москва : Транспорт, 1987. 188 с.
11. СП 34.13330.2021. Свод правил. Автомобильные дороги. СНиП 2.05.02–85\* : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 9 февраля 2021 г. № 53/пр. Москва : Кодекс, 2021. 94 с.

### **References**

1. Construction of the subgrade roads. Part 1. Mechanization of earthworks during the construction of subgrade roads: organization standard: STO NOSTROY 2.25.23-2011 introduced on 05.12.2011. Moscow: MADI-plus: BST; 2012. 66 p. (Car roads) (In Russ.).



2. Kustarev G. V., Zhukov S. I. The results of experimental research on the creation of promising road engineering vehicles. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*. 2019;(59):46–55. (In Russ.).
3. Shorokhov D. A., Tyuremnov I. S. Forecasting of technological capabilities of vibrating rollers during soil compaction. *The Seventy-fourth All-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates and postgraduates of higher educational institutions with international participation. Collection of conference materials*. Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University; 2021. P. 331–334. (In Russ.).
4. Saveliev S. V., Mikheev V. V., Poteryaev I. K., Beloded A. S.; applicant and patent holder of Omsk State Transport University. Patent No. 162483 for utility model Russian Federation, IPC: E01C19/28. Road roller. application No. 2015157015; application No. 29.12.2015; published 24.05.2016. (In Russ.).
5. Permyakov V. B. Improving the theory, calculation methods and designs of machines for compacting asphalt concrete mixtures. Speciality 05.05.04 Road and Construction Machines. Dissertation for the Degree of Doctor of Engineering. Permyakov Vladislav Borisovich; Siberian State Automobile and Highway University. Omsk; 1990. 485 p. (In Russ.).
6. Kharkhuta N. Ya., Vasiliev Yu. M., Okhramenko R. K. Compaction of road embankments. Moscow: Avtotransizdat; 1958. 144 p. (In Russ.).
7. Saveliev S. V., Poteryaev I. K., Beloded A. S. Promising road rollers for compaction of soil embankments during the construction of transport facilities in Siberia. *Proceedings of the interregional conference. Transport and logistics of the Yakut Arctic*. Chamber of Commerce and Industry of the Republic of Sakha (Yakutia). Yakutsk: Tsumori Press; 2016. P. 159–164. (In Russ.).
8. Saveliev S. V., Beloded A. S. Improving the efficiency of compaction of the roadbed with road rollers. *Fundamental and applied research of young scientists: Materials of the International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists*. Siberian State Automobile and Highway University. Omsk; 2017. P. 228–230. (In Russ.).
9. Kharkhuta N. Ya., Vasiliev Yu. M. Strength, stability and compaction of the roadbed. Moscow: Transport; 1975. 285 p. (In Russ.).
10. Forsblad L. Vibrational compaction of soils and foundations. Translated from the English by I. V. Gagarina. Moscow: Transport; 1987. 188 p. (In Russ.).
11. SP 34.13330.2021 Highways. Set of rules: approved and put into effect by the Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated February 9, 2021 No. 53/pr. Moscow: Kodeks; 2021. 94 p. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

**С. В. Савельев** – профессор кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, доктор технических наук.

**А. А. Юрченко** – студент института «Автомобильный транспорт, нефтегазовая и строительная техника» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета.

**Р. Е. Литовченко** – студент института «Автомобильный транспорт, нефтегазовая и строительная техника» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета.

### **Information about the authors**

**S. V. Savelyev** – Professor of the Operation of Oil and Gas and Construction Equipment Department, Siberian State Automobile and Highway University, Doctor of Engineering.

**A. A. Yurchenko** – Student of the Motor Transport, Oil and Gas and Construction Equipment Institute, Siberian State Automobile and Highway University.

**R. E. Litovchenko** – Student of the Motor Transport, Oil and Gas and Construction Equipment Institute, Siberian State Automobile and Highway University.

Статья поступила в редакцию 06.03.2023; одобрена после рецензирования 27.03.2023; принята к публикации 14.04.2023.

The article was submitted 06.03.2023; approved after reviewing 27.03.2023; accepted for publication 14.04.2023.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 69.07

doi 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_48

### Расчет сборно-монолитного изгибаемого элемента по деформациям и трещиностойкости

Александр Александрович Коянкин<sup>1✉</sup>, Валерий Михайлович Митасов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

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

<sup>1</sup> KoyankinAA@mail.ru✉

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

**Аннотация.** Важной конструктивной особенностью сборно-монолитных конструкций является то, что они состоят из сборной и монолитной частей, представленных в свою очередь бетонами разного возраста, а также порой разных видов и классов. В конечном итоге такие конструкции состоят из бетонов, обладающих разными прочностными, деформационными и другими физико-механическими свойствами. Кроме того, возможно также разно- и одновременное вовлечение в процесс деформирования сборного и монолитного бетонов. Таким образом, становится очевидным, что как характер формирования напряженно-деформированного состояния, так и расчеты сборно-монолитных конструкций по первой и второй группам предельных состояний являются гораздо более сложными, нежели для железобетонных конструкций, состоящих из бетонов одного вида. Перечисленные выше конструктивные особенности должны найти свое отражение в нормативных методиках по расчету сборно-монолитных конструкций.

В рамках настоящей статьи предложены определенные уточнения в отношении существующих методик расчета сборно-монолитных конструкций по второй группе предельных состояний. Данные уточнения были выполнены на основании изучения свойственных сборно-монолитным изгибаемым элементам конструктивных особенностей и определения особенностей формирования их напряженно-деформированного состояния. Кроме того, были рассмотрены нормативные методики расчета сборно-монолитных конструкций по второй группе предельных состояний, а также другие методики, рекомендованные разными учеными и инженерами строительной области. Представленная авторами методика расчета сборно-монолитных конструкций по второй группе предельных состояний позволяет учесть особенности таких конструкций, включая разность деформационных и прочностных свойств этих бетонов.

Удовлетворительная сходимость достигнута при сопоставлении результатов теоретических расчетов с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, сборно-монолитные конструкции, изгибы, прогибы, трещины, теоретические исследования

**Для цитирования:** Коянкин А. А., Митасов В. М. Расчет сборно-монолитного изгибаемого элемента по деформациям и трещиностойкости // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 48–54. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_48.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

### Calculation of a prefabricated monolithic at the same time deformable bent element according to the second group of limit states

Alexander A. Koyankin<sup>1✉</sup>, Valery M. Mitassov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

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

<sup>1</sup> KoyankinAA@mail.ru✉

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

**Abstract.** An important design feature of prefabricated monolithic structures is that they consist of prefabricated and monolithic parts, represented in turn by concrete of different ages, as well as, sometimes, of different types and classes. In the end, prefabricated monolithic structures consist of concretes with different strength, deformation and other physical and mechanical properties. In addition, it is also possible to involve precast and monolithic concrete

in the deformation process at different times and simultaneously. Thus, it becomes obvious that both the nature of the formation of the stress-strain state and the calculations of prefabricated monolithic structures for the first and second groups of limit states are much more complex than for reinforced concrete structures consisting of concretes of the same type. The design features listed above should be reflected in the regulatory methods for the calculation of prefabricated monolithic structures.

Within the framework of this article, certain refinements are proposed in relation to existing methods for calculating prefabricated monolithic structures for the second group of limit states. These refinements were determined on the basis of studying the structural features inherent in prefabricated-monolithic bent elements and determining the features of the formation of their stress-strain state. In addition, normative methods for calculating prefabricated monolithic structures for the second group of limit states, as well as other methods recommended by various scientists and engineers of the construction field, were considered. The methodology presented by the authors for calculating prefabricated monolithic structures for the second group of limit states allows us to take into account the features of such structures, including the difference in the deformation and strength properties of these concretes.

Satisfactory convergence was obtained by comparing the results of theoretical calculations with the data obtained during experimental studies.

**Keywords:** stress-strain state, prefabricated monolithic structures, bending, deflections, cracks, theoretical studies

**For citation:** Koyankin A. A., Mitsov V. M. Calculation of a prefabricated monolithic at the same time deformable bent element according to the second group of limit states. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(65):48–54. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_48.

### Введение

Сборно-монолитные конструкции широко распространены в жилищно-гражданском и промышленном строительстве в России и за ее пределами [1–10]. Однако данные конструкции являются более сложными в сравнении с железобетонными конструкциями, состоящими из бетона одного вида. Причина такого усложнения заключается в одновременном присутствии сборного и монолитного бетонов, обладающих разными прочностными, деформационными и другими физико-механическими свойствами. Кроме того, возможно также разно- и одновременное вовлечение в процесс деформирования сборного и монолитного бетонов. Эти факторы приводят к тому, что как характер формирования напряженно-деформированного состояния (НДС), так и расчеты сборно-монолитных конструкций по первой и второй группам предельных состояний являются гораздо более сложными, чем для железобетонных конструкций, состоящих из бетона одного вида.

При этом сборно-монолитным железобетонным конструкциям свойственно такое важное отличие, как поэтапное вовлечение в процесс восприятия внешней нагрузки сборной и монолитной частей. Результаты исследований в этом направлении представлены в работах [11–14]. Кроме того, СП 337.1325800.2017 определяет: «Сборно-монолитные конструкции следует рассчитывать по прочности, образованию и раскрытию трещин и по деформациям для двух стадий работы конструкций:

для первой стадии – до приобретения бетоном, уложенным на месте применения конструкции (бетоном омоноличивания), заданной прочности – на воздействие массы этого бетона и других нагрузок, действующих на этапе возведения конструкции;

для второй стадии – после приобретения бетоном, уложенным на месте применения конструкции (бетоном омоноличивания), заданной прочности – на эксплуатационные нагрузки.

Расчет выполняют с учетом начальных напряжений и деформаций, проявившихся в сборных элементах до приобретения бетоном омоноличивания заданной прочности».

Однако в случае если в процессе выполнения строительно-монтажных работ (СМР) по возведению здания применяются монтажные устройства, позволяющие исключить возникновение начальных напряжений и деформаций в сборной части (монтажные стойки, кондуктора и т. д.), то можно не рассматривать работу сборно-монолитной конструкции как двухстадийную. При этом принимается, что процесс деформирования происходит в одну стадию, т. е. сборная и монолитная части начинают воспринимать внешнюю нагрузку одновременно.

В продолжение работ [14, 15], в которых рассмотрены вопросы формирования НДС и оценки прочности сборно-монолитных конструкций, в настоящей статье предложена методика расчета сборно-монолитных конструкций по второй группе предельных состояний.

### Материалы и методы исследования

Определение величины прогиба на первой стадии происходит в результате условного разделения изгибаемого элемента по длине на «зоны качественно единообразного деформирования» (рис. 1), границы которых определяются по структуре диаграмм сборного и монолитного бетонов:

1) зона целостного сечения, определяемая на основании НДС растянутой зоны сборной части, т. е.  $0 < \varepsilon_{bt} \leq \varepsilon_{bt}^*$  и соответствующий этому диапазон усилий  $0 < M \leq M_{crc}$ ;

2) зона образования трещин в растянутой зоне сборной части и упруго-пластического деформирования сжатого бетона монолитной части, т. е.  $\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{bt}^*$ ,  $\varepsilon_b^M \leq \varepsilon_b^{Mv}$  и  $M_{crc} < M \leq M_v$ ;

3) зона пластических деформаций сжатого бетона, т. е.  $\varepsilon_b^{Mv} < \varepsilon_b^M \leq \varepsilon_{bR}^M$  и  $M_v < M \leq M_{bR}$ ;

4) зона предразрушения, т. е.  $\varepsilon_{bR}^M < \varepsilon_b^M \leq \varepsilon_{bu}^M$  и  $M_{bR} < M \leq M_u$ .

Здесь  $\varepsilon_{bt}$  – относительные деформации в фибровом растянутом волокне сборного бетона;  $\varepsilon_{bt}^*$  и  $\varepsilon_{bu}^M$  – предельные относительные деформации на растяжение в сборном бетоне и сжатие в монолитном бетоне соответственно;  $\varepsilon_b^M$  – отно-

сительные деформации в фибровом сжатом волокне монолитного бетона;  $\varepsilon_b^{Mv}$  – верхняя граница микротрещинообразования монолитного бетона;  $\varepsilon_{bR}^M$  – относительные деформации, соответствующие предельному сопротивлению бетона на сжатие  $R_b$  в монолитном бетоне;  $M$  – изгибающий момент;  $M_{crc}$  – момент образования трещин;  $M_v$ ,  $M_{bR}$  – изгибающий момент в сечении при достижении  $\varepsilon_b^{Mv}$  и  $\varepsilon_{bR}^M$  в фибровых сжатых волокнах монолитного бетона соответственно;  $M_u$  – предельный изгибающий момент.

В связи с тем что при достижении предельных значений деформаций  $\varepsilon_{bu}^M$  происходит разрушение монолитного бетона, дальнейшее существование конструкции невозможно.

Определение прогиба осуществляется на основании интеграла Мора:

$$f = \sum_{i=1}^n \int_{z_i}^{z_{i+1}} \bar{M}(z) \left( \frac{1}{\rho} \right)_{cp} dz, \quad (1)$$

где  $n$  – количество зон единообразного деформирования;  $z_i$ ,  $z_{i+1}$  – координаты границ зон единообразного деформирования, определяемые параметрическими точками диаграммы

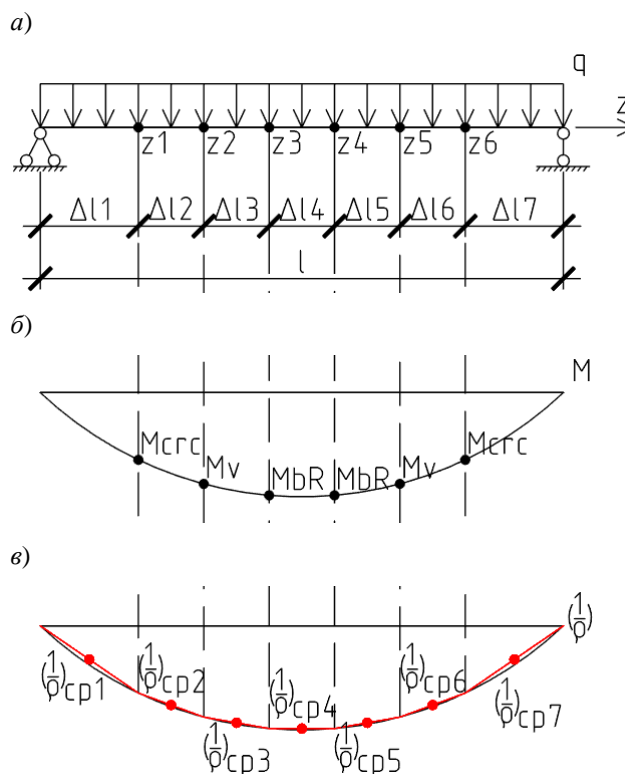


Рис. 1. Схема сборно-монолитного изгибаемого элемента для расчета по второй группе предельных состояний:

а – расчетная схема; б – эпюра моментов с разделением на зоны единообразного деформирования; в – эпюра кривизны с обозначением точек средних значений кривизны

деформирования бетона;  $\bar{M}(z)$  – функция единичного изгибающего момента от единичной силы  $\bar{P} = 1$ , приложенной в точке определения прогиба балки;  $\left(\frac{1}{\rho}\right)_{cp} = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{1}{\rho}\right)_i + \left(\frac{1}{\rho}\right)_{i+1} \right]$  – среднее значение кривизны изгибаемого элемента в рамках одной зоны единообразного деформирования между точками с координатами  $z_i$  и  $z_{i+1}$ .

Значение кривизны  $\left(\frac{1}{\rho}\right)_i$  в точке границы с координатой  $z_i$  будет определяться на основании известной зависимости:

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)_i = -\frac{\varepsilon_{bmi}}{x_i}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{bmi}$  – средние значения относительных деформаций сжатого бетона в фибровых волокнах в точках границ зон единообразного деформирования с координатами  $z_i$ , определяемые по формуле  $\varepsilon_{bmi} = \psi_b \varepsilon_{bi}$  ( $\psi_b$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций крайнего сжатого волокна по длине участка с трещинами;  $\varepsilon_{bi}$  – максимальные значения относительных деформаций сжатого бетона в фибровых волокнах в точках границ зон единообразного деформирования с координатами  $z_i$ );  $x_i$  – высота сжатой зоны в точке границы с координатой  $z_i$ .

Значения величин относительных деформаций и высоты сжатой зоны для каждого характерного сечения определяется на основании систем уравнений, представленных в работе [15].

Расчет по трещиностойкости конструкции включает в себя две стадии:

1) определение момента образования трещин  $M_{crc}$  на основании представленных в работе [15] систем уравнений, где критерием возникновения трещины является достижение предельных относительных деформаций бетона сборной части на растяжение  $\varepsilon_{bt}^*$ , т. е.  $\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{bt}^*$ ;

2) определение ширины раскрытия трещин по нижеприведенной методике и сопоставление с предельно допустимыми значениями, указанными в нормативных документах.

Ширина раскрытия вычисляется согласно СП 63.13330 «Бетонные и железобетонные конструкции» по формуле  $a = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \frac{\sigma_s}{E_s} l_s$ , но с той разницей, что напряжения в арматуре  $\sigma_s$  определяются на основании принятого закона деформирования  $\sigma_s(\varepsilon)$  с учетом значе-

ний относительных деформаций в арматуре  $\varepsilon_s$ , получаемых из систем уравнений, приведенных в работе [15].

### Результаты исследования

Ранее авторами статьи были выполнены экспериментальные исследования по изучению особенностей процесса деформирования сборно-монолитного изгибаемого элемента, результаты представлены в статье [11]. Кроме того, в работе [15] приведена методика оценки НДС и расчета несущей способности сборно-монолитного изгибаемого элемента. В рамках настоящей статьи выполнены расчеты прогибов и дана оценка трещиностойкости, проведено сопоставление с результатами экспериментальных исследований.

Экспериментальные модели сборно-монолитных балок (рис. 2) включают:

– сборные части опытных образцов (размеры  $1700 \times 80 \times 80$  (h) мм, тяжелый бетон кл. В25, продольная арматура 1Ø10A240, поперечная арматура на опоре Ø4B500 с шагом 50 мм), изготовленные на заводе ЖБИ;

– монолитный бетон (керамзитобетон кл. В12,5, высота 100 мм), укладка которого происходила в лаборатории испытания строительных конструкций Сибирского федерального университета.

После набора монолитным бетоном требуемой прочности проводились экспериментальные исследования с доведением образцов до разрушения.

Сопоставление результатов теоретического расчета и экспериментальных исследований по прогибам (рис. 3) показало удовлетворительную сходимость.

Фиксирующееся расхождение на первых этапах загрузки объясняется отсутствием части растянутого бетона и оголением арматуры экспериментальных образцов, что было сделано с целью обеспечения возможности установки тензометрических датчиков. Однако оголение арматуры уменьшило начальную жесткость элемента. После образования трещины и исключения части растянутого бетона из процесса деформирования в центре балки фиксируется скачок прогибов и выравнивание экспериментальных и теоретических значений прогибов, а также характера графика их роста, что обеспечило разницу между тео-

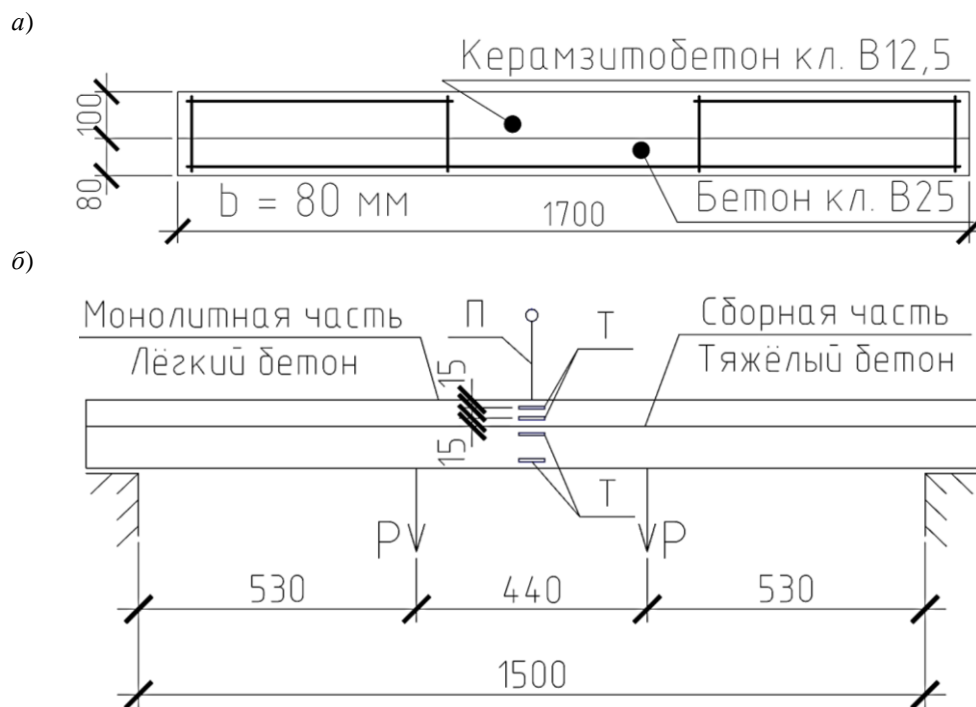


Рис. 2. Схемы экспериментальных образцов:  
а – армирования; б – загрузки (сила  $P$ ) и расположения измерительных приборов  
(Т – тензометрические датчики; П – прогибомер)

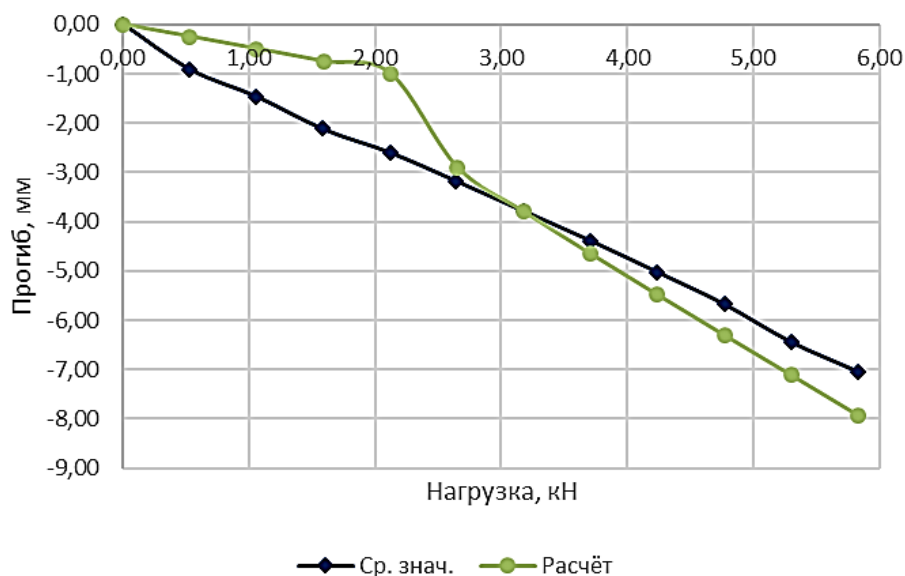


Рис. 3. Прогибы (экспериментальные и теоретические)

ретическими и экспериментальными данными не более 9 % (на последних этапах загрузки не более 13 %).

Образование первой трещины при теоретическом расчете фиксируется при значении момента  $M_{crc} = 1,26$  кН·м, что удовлетворительно соотносится с экспериментальным значением изгибающего момента, равным 1,40 кН·м (разница составляет 10 %).

### Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная методика расчета позволяет выполнять расчет сборно-монолитных изгибаемых элементов по второй группе предельных состояний.
2. Присущие сборно-монолитным изгибаемым элементам конструктивные особенности, включая разные прочностные и деформативные



свойства сборного и монолитного бетонов учитываются в предложенной методике расчета.

3. С учетом ранее выполненных авторами работ возможно в ходе выполнения расчета учитывать реальные диаграммы деформиро-

вания материалов (арматуры, сборного и монолитного бетонов).

4. Результаты расчетов показали удовлетворительную сходимость с данными экспериментальных исследований.

### Список источников

1. Каинов Е. А. Анализ и оценка потребительских свойств объектов со сборно-монолитным каркасом с использованием метода экспертных оценок // Вестник современных исследований. 2019. № 1.8 (28). С. 83–88.
2. Кожамбек Б. Р., Жусупов Т. В., Бейсекеева С. З. Сборно-монолитные перекрытия на основе системы несъемной опалубки // Вестник современных исследований. 2019. № 2.3 (29). С. 18–21.
3. Зотеева Е. Э., Фомин Н. И. Новые технологические и конструктивные решения по устройству монолитных и сборно-монолитных перекрытий гражданских зданий // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 2. С. 336–341.
4. Simplified reliability analysis of punching in reinforced concrete flat slab buildings under accidental actions / P. Olmati, J. Sagaseta, D. Cormie, A. E. K. Jones // Engineering Structures. 2017. Vol. 130. P. 83–98.
5. Qian K., Li B. Resilience of Flat Slab Structures in Different Phases of Progressive Collapse // ACI Structural Journal. 2016. Vol. 113. P. 537–548.
6. Drakatos I. S., Muttoni A., Beyer K. Internal slab-column connections under monotonic and cyclic imposed rotations // Engineering Structures. 2016. Vol. 123. P. 501–516.
7. Fire Resistance of Prefabricated Monolithic Reinforced Concrete Slabs of «Marko» Technology / E. Nedviga, N. Beresneva, M. Gravit, A. Blagodatskaya // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017 : conference proceedings. Cham : Springer, 2018. P. 739–749. (Advances in Intelligent Systems and Computing ; vol. 692).
8. Reinforced ultra-lightweight cement composite flat slabs: Experiments and analysis / J. B. Yan, J. Y. Wang, J. Y. R. Liew [et al.] // Materials and Design. 2016. No. 95. P. 148–158.
9. К определению фактического напряженного состояния элементов плоских сборно-монолитных перекрытий / Д. М. Зезюков, Н. Н. Махинько, Е. Л. Буцкая, Н. А. Котов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2019. № 2 (251/252). С. 63–70.
10. Полоз М. А., Яссер Г. С., Шевченко А. В. Применение шагово-итерационного метода при расчете изгибаемых предварительно напряженных сборно-монолитных элементов с учетом физической нелинейности // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2, № 3. С. 12–27.
11. Koyankin A. A., Mitsov V. M. Stress-strain state of the precast monolithic bent element // Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 97 (5). P. 9706.
12. Семенюк С. Д., Москалькова Ю. Г. Прочность и деформативность изгибаемых элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом малоцикловом нагружении. Могилев : Белорусско-Российский университет, 2017. 274 с.
13. Лазовский Д. Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. Новополоцк : Полоцкий государственный университет, 1998. 240 с.
14. Коянкин А. А., Митасов В. М. Напряженно-деформированное состояние сборно-монолитного элемента с учетом загрузки сборной части // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23, № 3. С. 129–142.
15. Коянкин А. А., Митасов В. М. Напряженно-деформированное состояние сборно-монолитного изгибаемого элемента // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 3. С. 101–107.

### References

1. Kainov E. A. Analysis and evaluation of consumer properties of objects with a composite monolithic frame using the method of expert assessments. *Bulletin of Modern Research*. 2019;1.8(28):83–88. (In Russ.).
2. Kozhambek B. R., Zhushupov T. V., Beisekeeva S. Z. Prefabricated monolithic structures based on a fixed formwork system. *Bulletin of Modern Research*. 2019;2.3(29):18–21. (In Russ.).
3. Zoteeva E. E., Fomin N. I. New technological and constructive solutions for the construction of monolithic and prefabricated monolithic floors of civil buildings. *Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2018;2:336–341. (In Russ.).

4. Olmati P., Sagaseta J., Cormie D., Jones A. E. K. Simplified reliability analysis of punching in reinforced concrete flat slab buildings under accidental actions. *Engineering Structures*. 2017;130:83–98.
5. Qian K., Li B. Resilience of Flat Slab Structures in Different Phases of Progressive Collapse. *ACI Structural Journal*. 2016;113:537–548.
6. Drakatos I. S., Muttoni A., Beyer K. Internal slab-column connections under monotonic and cyclic imposed rotations. *Engineering Structures*. 2016;123:501–516.
7. Nedviga E., Beresneva N., Gravit M., Blagodatskaya A. Fire Resistance of Prefabricated Monolithic Reinforced Concrete Slabs of Marko Technology. *International scientific conference energy management of municipal transportation facilities and transport EMMFT 2017 : conference proceedings*. Cham: Springer; 2018. P. 739–749. (Advances in Intelligent Systems and Computing; vol. 692).
8. Yan J. B., Wang J. Y., Liew J. Y. R., Qian X. D., Zhang W. Reinforced ultra-lightweight cement composite flat slabs: Experiments and analysis. *Materials and Design*. 2016;(95):148–158.
9. Zezyukov D. M., Makhinko N. N., Butskaya E. L., Kotov N. A. To the determination of the actual stress state of the elements of flat prefabricated monolithic floors. *Visnik Pridniprovs'koi derzhavnoi akademii budivnitstva ta architekturi*. 2019;2(251/252):63–70. (In Russ.).
10. Poloz M. A., Yasser G. S., Shevchenko A. V. Application of the step-iterative method in the calculation of bent prestressed prefabricated monolithic elements taking into account physical nonlinearity. *Building Materials and Products*. 2019;2(3):12–27. (In Russ.).
11. Koyankin A. A., Mitsov V. M. Stress-strain state of the precast monolithic bent element [Stress-strain state of the prefabricated monolithic bending element]. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;97(5):9706. (In Russ.).
12. Semenyuk S. D., Moskalkova Yu. G. Strength and deformability of bending elements reinforced by the expansion of the compressed zone under static low-cycle loads. Mogilev: Belarusian-Russian University; 2017. 274 p. (In Russ.).
13. Lazovsky D. N. Reinforcement of reinforced concrete structures of operated construction structures. Novopolotsk: Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk; 1998. 240 p. (In Russ.).
14. Koyankin A. A., Mitsov V. M. The stress-strain state of a prefabricated monolithic element taking into account the loading of the prefabricated part. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2021;23(3):129–142. (In Russ.).
15. Koyankin A. A., Mitsov V. M., Klindukh N. Yu. The stress-strain state of a prefabricated monolithic bending element. *Academia. Architecture in Construction*. 2021;(3):101–107. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

**А. А. Коянкин** – доцент кафедры «Строительные конструкции и управляемые системы» Сибирского федерального университета, кандидат технических наук.

**В. М. Митсов** – профессор кафедры «Железобетонные конструкции» Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета, доктор технических наук.

### **Information about the authors**

**A. A. Koyankin** – Associate Professor, Building Structures and Control Systems Department, Siberian Federal University, Candidate of Engineering.

**V. M. Mitsov** – Professor, Department of Reinforced Concrete Structures Department, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Doctor of Engineering.

Статья поступила в редакцию 20.02.2023; одобрена после рецензирования 31.03.2023; принята к публикации 18.04.2023.

The article was submitted 20.02.2023; approved after reviewing 31.03.2023; accepted for publication 18.04.2023.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья  
УДК 622.331:631-8  
doi 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_55

### Получение искусственных почвогрунтов для системы биологической защиты откосов железных и автомобильных дорог

Сергей Александрович Шахов

Сибирский государственный университет путей сообщений, Новосибирск, Россия, sashakhov@mail.ru

**Аннотация.** Почвогрунт является важной составляющей в системе биологической защиты откосной части дорожной конструкции. Методом биотестирования с использованием сельскохозяйственных растений оценивали адаптационную способность растений и биологическую активность почвогрунтов на основе торфа, песка и осадка бытовых сточных вод. Установлено, что применение осадков бытовых сточных вод не приводит к существенному повышению накопления тяжелых металлов в зеленой массе растений. Предложен вариант технологической схемы подготовки почвогрунта в полевых условиях, предусматривающий интенсивное перемешивание осадков с торфом и песком, дезагрегацию, усреднение и временное хранение с целью фиторемедиации полученного почвогрунта. Применение вновь разработанной технологии позволит получать искусственные почвогрунты, соответствующие санитарным нормам по патогенным микроорганизмам, содержанию солей тяжелых металлов и органических экотоксикантов, а также удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к почвогрунтам для биологической защиты откосов железных и автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** искусственный почвогрунт, осадки сточных вод, торф, песок, рекультивация, откосы железных и автомобильных дорог

**Для цитирования:** Шахов С. А. Получение искусственных почвогрунтов для системы биологической защиты откосов железных и автомобильных дорог // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 55–63. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_55.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

### Obtaining artificial soils for the biological protection system of railway and highway slopes

Sergey A. Shakhov

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

**Abstract.** Soil is an important component in the system of biological protection of the road structure sloping part. The adaptive capacity of plants and the biological activity of soils based on peat, sand and sewage sludge were evaluated by biotesting using agricultural plants. It has been established that the use of sewage sludge does not lead to a significant increase in the accumulation of nitrates and heavy metals in the green mass of agricultural plants. Therefore, such sediments can be used as soil-improving additives in anthropogenically disturbed areas, mixed with fillers that create porosity and ensure water movement while minimizing leaching of ingredients. A variant of the technological scheme for preparing soil in the field is proposed, which provides for intensive mixing of sewage sludge with peat and sand, thermal shearing effect on the mixture, transportation, unloading and temporary storage for the purpose of the resulting soil phytoremediation. The use of the newly developed technology will make it possible to obtain artificial soils that meet sanitary standards for pathogenic microorganisms, the content of heavy metal salts and organic ecotoxicants, and also meet the requirements for soils for the biological protection of railway and highway slopes.

**Keywords:** artificial soil, sewage sludge, peat, sand, reclamation, railway and highway slopes

**For citation:** Shakhov S. A. Obtaining artificial soils for the biological protection system of railway and highway slopes. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(65):55–63. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_55.

## Введение

В процессе эксплуатации железных и автомобильных дорог откосные части дорожной конструкции являются одним из самых уязвимых элементов, что предопределяет необходимость использования специальных технологий для их укрепления и восстановления [1–3]. В общей структуре таких работ биологическая защита откосов представлена как один из способов их укрепления. В рамках технологии биологической защиты дорожные откосы принято рассматривать как природно-техническую систему (ПТС), состоящую из двух различных по своей природе компонентов: биологического и строительного. Биологическая составляющая ПТС включает почвогрунт и посадочный материал. В условиях недостатка плодородной земли в большинстве районов Сибири и Дальнего Востока актуальным является использование для рекультивации земель, нарушаемых при строительстве и эксплуатации автомобильных и железных дорог, искусственных почвенных грунтов. Последние представляют собой готовые к применению сыпучие питательные смеси, обогащенные всеми необходимыми элементами питания растений [4]. Из многочисленных искусственных почвенных грунтов наиболее распространенными являются составы на основе торфа. Анализ сведений по свойствам таких грунтов показывает перспективность повышения их плодородия за счет использования различных почвоулучшающих добавок [5, 6], к числу которых относятся осадки бытовых сточных вод.

Осадки бытовых сточных вод (ОБСВ), являющиеся одним из побочных продуктов антропогенной деятельности человека, представляют собой продукт очистки коммунальных стоков, содержащий частицы органического и неорганического характера различной дисперсности.

Известно, что ОБСВ обладают достаточно высоким удобряющим эффектом [7–10]. Однако введение осадков бытовых сточных вод в почву не только повышает урожайность различных культур, но и существенно улучшает агрохимические характеристики почвы за счет повышения интенсивности поглощения, уменьшения кислотности, увеличения содержания азота, фосфора и необходимых для роста и развития растений микроэлементов [11–15].

Вместе с тем при общем положительном эффекте от использования ОБСВ необходимо учитывать, что при их использовании в почве могут накапливаться тяжелые металлы (ТМ), которые могут находиться в виде свободных ионов, растворимых органоминеральных комплексов малорастворимых соединений с фосфатами и гидроксидами, а также непосредственно входить в состав твердой фазы. Накопление содержащихся в осадке ТМ повышает токсический потенциал почвы и может привести к неблагоприятным условиям для обитания флоры и фауны [16, 17].

В настоящее время МУП г. Новосибирска «Горводоканал» проведены сертификационные испытания ОБСВ, хранящихся последние 10–15 лет на иловых площадках. Результаты испытаний показали, что большая часть осадков по агрохимическим показателям и даже содержанию отдельных тяжелых металлов соответствует требованиям нормативных документов. Однако, поскольку в применяемых технологических схемах обработки осадков на большинстве объектов Новосибирска отсутствуют сооружения для их обеззараживания, то многие пробы ОБСВ по санитарным показателям не соответствуют нормативным требованиям. Поэтому создание комплексной научно обоснованной технологии обезвреживания осадков, которая позволяет решить проблемы утилизации их в сельском хозяйстве, строительстве и ЖКХ, сократить площадь иловых карт, снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, остается одной из актуальных задач.

**Целью работы** является выбор рационального состава грунта из торфа и осадков водоотведения на основе анализа его агрохимической ценности.

Для достижения цели исследования потребовалось решение следующих задач:

- 1) исследование в лабораторных условиях особенностей роста и развития растений на почвогрунтах, приготовленных на основе торфа и осадка бытовых сточных вод;
- 2) разработка технологической схемы подготовки почвогрунтов для последующего использования при рекультивации урбанизированных территорий и биологического укрепления дорожных откосов.

### Материалы и методы исследования

Для приготовления почвогрунтов в работе использовали:

– осадки сточных вод с городской станции очистки сточных вод г. Новосибирска с карт депонирования № 8 (осадок без добавления ила и флокулянта ПАА) и № 39 (осадок с добавлением активного ила, механическим обезвоживанием с применением флокулянта ПАА);

– торф низинных месторождений Томской области со средней зольностью, малоразложившийся;

– песок с песколовок городской станции очистки сточных вод г. Новосибирска.

Исследования проводили на почвогрунтах нескольких составов, перечисленных в табл. 1.

Анализ почвогрунтов проводили с использованием методов, рекомендованных:

– ГОСТ 26213–91 «Почвы. Методы определения органического вещества»;

– ПНД Ф 16.1:2.2:2.3.36–2002 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений валового содержания меди, кадмия, цинка, свинца, никеля и марганца в почвах, донных отложениях и осадках сточных вод методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии»;

– ГОСТ 26483–85 «Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО»;

– ГОСТ 5180–84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».

В ходе экспериментов методом биотестирования оценивали адаптационную способность растений и биологическую активность почвогрунтов. Для этого осуществляли ряд действий:

1) смесь почвогрунта помещали в торфяные горшочки и высевали тестовую культуру;

2) контролировали время появления всходов, их количество, длину надземной части;

3) по окончании опыта у растений измеряли длину надземной части растения и длину корней;

4) определяли массы надземных и подземных частей растений;

5) анализировали содержание ТМ в растительных образцах.

### Результаты исследования и их обсуждение

По физическому состоянию почвогрунты всех составов представляют собой твердую землистую массу. Смешивание торфа, песка и осадков приводит к изменению водно-физических свойств. Об этом, в частности, свидетельствует изменение величины гигроскопической влажности (табл. 2), что, по-видимому, связано с изменением фракционного состава и содержания органических веществ.

Таблица 1

Составы почвогрунтов

Карта	Номер состава	Состав почвогрунта
№ 8	1	№ 8 СО (30 мас. %) + Т-П (70 мас. %)**
	2	№ 8 СО (50 мас. %) + Т-П (50 мас. %)
	3	№ 8 СО (70 мас. %) + Т-П (30 мас. %)
№ 39	4	№ 39 СО (30 мас. %) + Т-П (70 мас. %)
	5	№ 39 СО (50 мас. %) + Т-П (50 мас. %)
	6	№ 39 СО (70 мас. %) + Т-П (30 мас. %)
Контроль	7	Т-П***

\* 30 мас. % осадка сточных вод с карты депонирования № 8.

\*\* 70 мас. % смеси торфа и песка, взятых в соотношении 70 % торфа и 30 % песка.

\*\*\* Смесь торфа и песка, взятых в соотношении 70 % торфа и 30 % песка.

Таблица 2

Гигроскопическая влажность опытных почвогрунтов, %

Номер состава	Гигроскопическая влажность
1	7,9
2	8,8
3	3,0
4	7,4
5	8,5
6	6,7
7	8,0

Характер изменения гигроскопичности позволяет сделать вывод, что при содержании осадков в пределах 30–50 % смешивание песка, торфа и осадков сточных вод ведет к изменению водно-физических свойств в субстрате в направлении, близкому к почвам [18].

В результате взаимодействия торфа с кислой средой и осадков со щелочной средой происходит реакция нейтрализации, что благоприятно сказывается на pH почвогрунта (pH 6,25).

Агрохимические характеристики почвогрунтов на основе осадков с разных карт депонирования свидетельствуют об их потенциальной удобрительной ценности, сравнимой с традиционными органическими удобрениями, например с навозом (табл. 3).

Фактором, ограничивающим использование ОБСВ в почвогрунтах, является их возможное токсикологическое влияние вследствие наличия в их составе ионов тяжелых металлов. Однако при разбавлении структуромодифицирующими компонентами валовые концентрации ТМ (свинца, кадмия, цинка, меди, железа) в почвогрунте уменьшаются в несколько раз (табл. 4).

Вместе с тем по отдельным металлам (Zn, Fe, Cd) за счет разбавления осадка торфом и песком не удалось достигнуть снижения до вели-

чин меньше предельно допустимой концентрации (ПДК). Известно, что тяжелые металлы, несмотря на токсичность, при определенных концентрациях могут являться микроэлементами, необходимыми для нормального роста и развития растений [19]. Для проверки этого предположения в процессе биотестирования оценивали всхожесть и рост тестовой культуры (салата) на фоновой незагрязненной почве и почвогрунтах, полученных на основе ОБСВ.

В табл. 5, 6 и на рис. 1, 2 представлены данные по урожайности тестовых культур, выращенных на почвогрунтах с различным содержанием осадка.

Как видно из данных, представленных в табл. 5, 6, при смешивании осадка с торфопесчаной смесью более высокие показатели всхожести и роста растений наблюдаются на почвогрунтах с карты № 39. Это объясняется, по-видимому, наличием в этом осадке активного ила. Однако по мере увеличения в почвогрунтах содержания осадка всхожесть растений ухудшается. Вероятно, это связано со структурно-механическими свойствами почвогрунта, так как с добавлением такого количества осадка он становится «цементированным», а значит, и невлагоемким, что является неблагоприятной средой для растений.

Таблица 3

**Агрохимические характеристики осадков сточных вод**

Показатель	Почвогрунт с 50 мас. % осадка с разных карт	
	№ 8	№ 39
Показатель pH	6,6	6,6
Массовая доля азота общего, %	1 743,0	2 067,0
Массовая доля фосфора общего (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), %	1 457,0	891,5
Массовая доля калия общего (K <sub>2</sub> O), %	7 400,0	9 700,0
Массовая доля органического вещества на сухое вещество, %	46,5	49,8

Таблица 4

**Содержание тяжелых металлов в опытных почвогрунтах, мг/кг**

Карта	Номер состава	Pb	Cd	Zn	Cu	Fe
№ 8	1	11,50	2,65	422,50	122,45	3 910,40
	2	15,45	3,31	454,10	155,00	4 143,00
	3	19,20	4,15	756,20	—	4 895,10
№ 39	4	6,57	2,18	260,50	54,70	3 472,90
	5	10,60	3,45	690,10	175,00	4 252,80
	6	13,60	4,36	1 348,60	241,60	5 379,50
Контроль	7	5,54	<0,05	183,70	17,10	2 655,30
ПДК		20,00	2,00	100,00	55,00	—



Таблица 5

## Результаты всхожести салата на разных почвогрунтах (11-й день после посадки)

Карта	Номер состава	Кол-во всходов, шт.	Средняя длина всходов, см
№ 8	1	20	20
		25	29
		24	34
	2	30	30
		25	35
		20	30
	3	25	25
		30	29
		23	36
№ 39	4	15	39
		17	44
		15	35
	5	10	40
		15	45
		10	35
	6	15	35
		7	34
		14	35
Контроль	7	7	29
		10	25
		15	35

Таблица 6

## Данные по продуктивности салата на опытных почвогрунтах

Карта	Номер пробы	Масса надземной части, г	Масса подземной части, г	Отношение надземной и подземной частей
№ 8	1	36,8	2,0	18,4
	2	55,1	2,8	19,7
	3	28,9	3,1	9,3
№ 39	4	88,5	5,0	17,7
	5	62,4	2,5	24,9
	6	17,5	0,5	35,0
Контроль	7	11,1	1,4	7,9



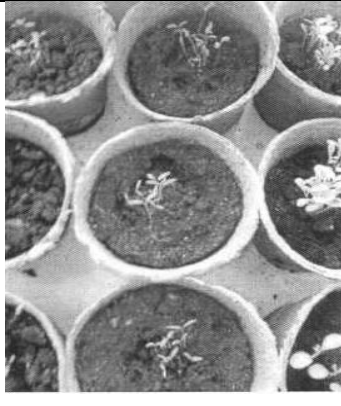
Карта № 8			Карта № 39			Контроль
						
30 % CO	50 % CO	70 % CO	30 % CO	50 % CO	70 % CO	T-II

Рис. 1. Результаты всхожести салата на разных почвогрунтах







Состав почвогрунта	СО (30 %) + Т-П (70 %)	СО (50 %) + Т-П (50 %)	СО (70 %) + Т-П (30 %)
Масса надземной части салата с применением осадка без ила как удобрения, г (карта № 8)	 36,8	 55,1	 28,9
Масса надземной части салата с применением осадка с илом как удобрения, г (карта № 39)	 88,5	 62,4	 17,5

Рис. 2. Данные по продуктивности салата на разных почвогрунтах

Результаты наблюдений (см. рис. 1, 2) также свидетельствуют, что наиболее густая и сочная зелень надземной части характерна для растений, выросших на почвогрунте с добавлением осадка с карты № 8 в количестве 50 % и на почвогрунте с добавлением осадка с карты № 39 в количестве 30 %. Менее густая надземная часть наблюдается у растений, выросших на контроле. Надземная часть растений на почвогрунте с добавлением осадка и ила в соотношении 70 мас. % СО и 30 мас. % Т-П была наименее густой и насыщенной. В то же время их корневая часть, напротив, была наиболее развита по сравнению с другими пробами.

Анализ содержания тяжелых металлов в растительных образцах показал, что при данных нормах использования осадков сточных вод в составе почвогрунтов практически не происходило накопления ТМ в продукции (табл. 7).

Таким образом, результаты проведенных экспериментов позволяют сделать вывод, что оптимальное содержание осадка в почвогрунте составляет 50 % для осадка с карты депонирования № 8 (осадок без добавления ила и флокулянта ПАА) и 30 % для осадка с карты № 39 (осадок с добавлением активного

ила, механическим обезвоживанием с применением флокулянта ПАА).

Для возможности получения и использования при укреплении дорожных откосов и рекультивации большого объема техногенно загрязненных грунтов разработан вариант технологической схемы подготовки почвогрунта в полевых условиях (рис. 3), предусматривающий интенсивное перемешивание осадков с торфом и песком, дезагрегацию, усреднение, транспортирование, выгрузку и временное хранение с целью фиторемедиации полученного почвогрунта.

Технологический процесс получения почвогрунта включает следующие операции. На открытой площадке с помощью погрузчика компоненты смеси (осадок, торф, песок) загружаются в дозатор, формирующий штабель, в котором компоненты располагаются послойно. После окончания укладки роторный перегружатель перемешивает смесь и формирует штабель окончательной подготовки, где смесь компостируется в течение пяти-шести месяцев. Смесь в штабеле с помощью оснащенного вилами погрузчика время от времени переворачивают посредством перемещения

Таблица 7

Содержание тяжелых металлов в салате, мг/кг

Вариант почвогрунта	Zn	Cu	Pb	Cd	Cr	Ni
Контроль (Т-П)	1,040	0,720	0,029	0,012	0,120	0,100
№ 8 СО (50 мас. %) + Т-П (50 мас. %)	2,310	0,726	0,040	0,025	0,002	0,007
№ 39 СО (30 мас. %) + Т-П (70 мас. %)	1,024	0,433	0,035	0,012	0,160	0,085
ПДК	100,000	30,000	5,000	0,300	0,050	3,000

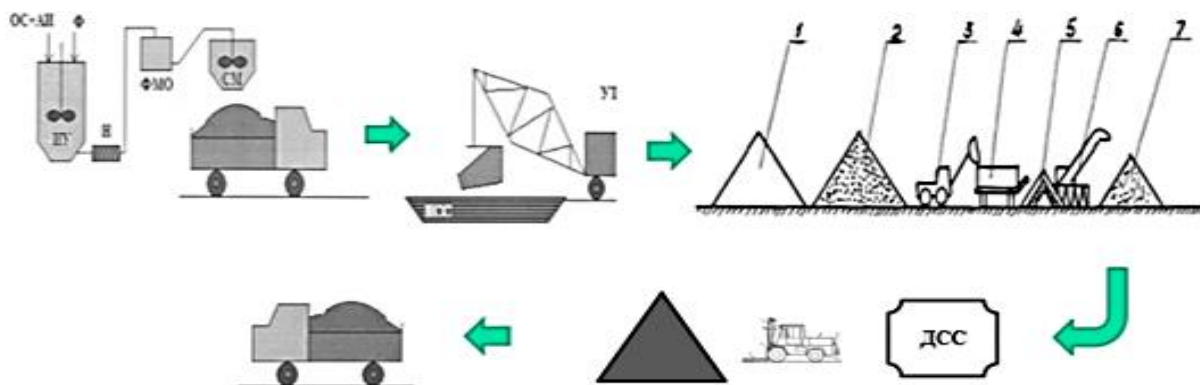


Рис. 3. Технологическая схема приготовления почвогрунта в полевых условиях:

1, 2 – штабели исходных компонентов; 3 – погрузчик; 4 – передвижной дозатор; 5 – формирующий штабель; 6 – шнекороторный перегружатель; 7 – штабель окончательной доводки; ОС+АИ – смесь осадка и избыточного активного ила; Ф – флокулянты; ИУ – илоуплотнитель; Н – насос; ФМО – фильтр механического обезвоживания; СМ – смеситель обезвоженных осадков; ПСС – площади складирования обезвоженных осадков; ДСС – дозирочно-смесительная станция

наружных частей штабеля в его середину. Учитывая отечественный и зарубежный опыт по складированию осадков, операция по переворачиванию смеси включена:

– для более глубокого обезвоживания осадка, меняющего его тиксотропные и пластичные свойства с улучшением механических и прочностных свойств, а также снижающего количество дренажных вод и позволяющего при складировании осадков использовать тяжелую технику;

– для более глубокой стабилизации (минерализации) осадка с целью предотвращения развития анаэробных микробиологических процессов разложения органического вещества с выделением биогаза (состоящего из метана, двуокиси углерода и др.).

После окончания детоксикации с помощью дозирочно-смесительной станции проводят перемешивание и измельчение смеси до размеров частиц не более 2,5 мм. При этом смесь дополнительно усредняется и обогащается кислородом воздуха. После этого оформляется штабель готовой продукции, из которого почвогрунт навалом отгружается потребителю.

Применение вновь разработанной технологии позволит получать искусственные почвогрунты, соответствующие санитарным нормам по патогенным микроорганизмам, содержанию солей тяжелых металлов и органических экотоксикантов, а также удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к почвогрунтам для

биологической защиты и укрепления откосов железных и автомобильных дорог.

Наряду с укреплением откосов железных и автомобильных дорог, почвогрунты, полученные по вновь разработанной технологии, могут успешно применяться:

- в ландшафтно-планировочных работах для благоустройства городских территорий;
- в качестве укрывного материала на полигонах твердых бытовых отходов, золоотвалах ТЭЦ и территориях свалок строительного мусора.

### Выводы

1. Результаты проведенных исследований показывают перспективность использования осадков бытовых сточных вод в качестве почвоулучшающей добавки.

2. Структурно-механические свойства осадков с обследованных карт не позволяют использовать их в качестве почв под посадку растений. В качестве структурно-модифицирующих компонентов для формирования почвогрунтов на основе осадков могут быть использованы торф и песок.

3. Валовые концентрации тяжелых металлов (свинца, цинка, меди, железа) за счет разбавления торфом и песком уменьшаются в почвогрунте в несколько раз. Оптимальное содержание осадка в почвогрунте составляет 30–50 %. Внесение в почвогрунт осадка в таком количестве не приводит к накоплению тяжелых металлов в растениях.

4. Для использования в биологической технологии укрепления дорожных откосов и рекультивации большого объема техногенно загрязненных грунтов предложена технологическая схема получения почвогрунта в полевых условиях, предусматривающая интенсивное перемешивание осадков с торфом и песком, дезагрегацию, усреднение, транспортирование, выгрузку и временное хранение с целью фиторемедиации полученного почвогрунта.

5. Использование вновь полученных почвогрунтов позволит проводить укрепление дорожных откосов, рекультивацию техногенно деградированных земель без использования естественных плодородных почв, улучшит приживаемость и сохранность зеленых насаждений урбанизированных территорий, промышленных и санитарно-защитных зон, обеспечит перевод отдельных видов городских отходов из категории загрязнителей окружающей среды в нетоксичный или даже плодородный почвогрунт.

### Список источников

1. Львович Ю. М., Мотылев Ю. Л. Укрепление откосов земляного полотна автомобильных дорог. Москва : Транспорт, 1979. 320 с.
2. Перевозников Б. Ф. Защита автомобильных дорог от опасных гидрометеорологических процессов и явлений // Автомобильные дороги: обзорная информация / Информавтодор. Москва, 1993. Вып. 1. 32 с.
3. Перевозников Б. Ф. Откосно-прибрежные укрепления автомобильных дорог // Автомобильные дороги: обзорная информация / Информавтодор. Москва, 1993. Вып. 5. 68 с.
4. Кузнецова Л. М., Михайлов А. В., Селеннов В. Г. Искусственные почвенные грунты // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2009. Вып. 3 (81). С. 145–149.
5. Духихина Н. В., Курганова Е. В. Биологическая активность почв при применении осадков сточных вод // Бюллетень ВИУА. 2001. № 115. С. 25.
6. Жукова Л. А., Пехлецкая А. Ф., Сулима А. Ф. Осадки сточных вод в качестве удобрения // Химизация сельского хозяйства. 1998. № 10. С. 35–39.
7. Научные основы применения осадков городских сточных вод в качестве удобрения / Л. Н. Михайлов, И. В. Пужайкин, М. П. Марковская, Г. К. Марковская. Самара : Книжное издательство, 1998. 160 с.
8. Шахов С. А., Ключникова Н. С., Кожемяченко А. С. Состав и технологические свойства осадков водоотведения и зол, образующихся при их сжигании // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 11 (671). С. 103–113.
9. Шуравилин А. В., Сурикова Н. В. Опыт удобрения почв осадком сточных вод в Московской области // Агрохимический вестник. 2006. № 1. С. 24–27.
10. Heavy metal retention in cattle tissues from ingestion of sewage sludge / J. C. Baxter, B. Barry, D. E. Johnson, E. W. Kienholz // Journal of Environmental Quality. 1982. Vol. 11, no. 4. P. 616–620.
11. Czekalo Jacek. Osady Sciewe zrodlem materii organicznej i skladnikow poka rmowych // Folia Univ. adr. Stetin, Agr. 1999. No. 77. P. 33–38.
12. Effects of 12 years of liquid digested sludge application on the soil phosphorus level / A. E. Peterson, P. E. Speth, R. B. Corey [et. al.] // Amer. Soc. Agron. Annu. Meet. Mineapolis, 1992. P. 53.
13. Zinc and lead uptake by three crops planted on different soils treated by sewage sludge / P. Tlustos, J. Balik, P. Dvorak, J. Szakova // Rostlinna Vyroba. 2001. Vol. 47, no. 3. P. 129–134.
14. Результаты утилизации осадков сточных вод во Владимирской области / Т. Н. Большеева, А. Р. Валитова, П. П. Кижапкин, В. А. Касатиков // Агрохимический вестник. 2006. № 1. С. 28–29.
15. Куликова А. Х., Захаров Н. Г., Починова Т. В. Применение осадков сточных вод в качестве удобрения в сельском хозяйстве Ульяновской области // Агрохимический вестник. 2010. № 5. С. 32–35.
16. Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе «почва – растение». Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1991. 151 с.
17. Касатиков В. А. Критерии загрязненности почвы и растений микроэлементами, тяжелыми металлами при использовании в качестве удобрения осадков городских сточных вод // Агрохимия. 1991. № 11. С. 78–83.
18. Бакланов В. И., Бобров О. Г., Барановская Н. Ф. Использование осадков биологической очистки промышленных сточных вод в народном хозяйстве. Москва : Научно-исследовательский институт технико-экономических исследований в химической и нефтехимической промышленности, 1990. 26 с.
19. Байдина Н. Л. Инактивация тяжелых металлов гумусом и цеолитами в техногенно загрязненной почве // Почвоведение. 1994. № 9. С. 121–125.

## References

1. Lvovich Yu. M., Motylev Yu. L. Strengthening the slopes of the highway subgrade. Moscow: Transport; 1979. 320 p. (In Russ.).
2. Perevoznikov B. F. Protection of highways from dangerous hydro meteorological processes and phenomena. *Automobile roads: Overview information*. Informavtodor. Moscow; 1993. Issue 1. 32 p. (In Russ.).
3. Perevoznikov B. F. Slope-coastal fortifications of highways. *Automobile roads: Overview information*. Informavtodor. Moscow; 1993. Issue 5. 68 p. (In Russ.).
4. Kuznetsova L. M., Mikhailov A. V., Selenov V. G. Artificial soils. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2009;3(81):145–149. (In Russ.).
5. Durikhina N. V., Kurganova E. V. Biological activity of soils in the application of sewage sludge. *All-Russian Scientific Research Institute of Fertilizers and Agrosoil Science Bulletin*. 2001;(115):25. (In Russ.).
6. Zhukova L. A., Pekhletskaia A. F., Sulima A. F. Sewage sludge as a fertilizer. *Chemicalization of agriculture*. 1998;(10):35–39. (In Russ.).
7. Mikhailov L. N., Puzhaikin I. V., Markovskaya M. P., Markovskaya G. K. Scientific basis for the use of urban sewage sludge as a fertilizer. Samara: Book Publishing House; 1998. 160 p. (In Russ.).
8. Shakhov S. A., Klyuchnikova N. S., Kozhemyachenko A. S. Composition and technological properties of sewerage sludge and ashes formed during their combustion. *Proceedings of higher educational institutions. Construction*. 2014;11(671):103–113. (In Russ.).
9. Shuravilin A. V., Surikova N. V. Experience of soil fertilization with sewage sludge in the Moscow region. *Agrochemical Bulletin*. 2006;(1):24–27. (In Russ.).
10. Baxter J. C., Barry B., Johnson D. E., Kienholz E. W. Heavy metal retention in cattle tissues from ingestion of sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*. 1982;11(4):616–620.
11. Czekalo Jacek. Osady Sciewe zrodlem materii organicznej i skladnikow poka rmowych. *Folia Univ. adr. Stetin, Agr*. 1999;(77):33–38.
12. Peterson A. E., Speth P. E., Corey R. B. [et al.]. Effects of 12 years of liquid digested sludge application on the soil phosphorus level. *American society. Agronom Annual Meeting*. Mineapolis; 1992. P. 53.
13. Tlustos P., Balik J., Szakova J., Dvorak P. Zinc and lead uptake by three crops planted an different soils treated by sewage sludge. *Rostlinna Vyroba*. 2001;47(3):129–134.
14. Bolysheva T. N., Valitova A. R., Kizhapkin P. P., Kasatnikov V. A. Results of sewage sludge disposal in the Vladimir region. *Agrochemical Bulletin*. 2006;(1):28–29. (In Russ.).
15. Kulikova A. Kh., Zakharov N. G., Pochinova T. V. The use of sewage sludge as a fertilizer in the agriculture of the Ulyanovsk region. *Agrochemical Bulletin*. 2010;(5):32–35. (In Russ.).
16. Ilyin V. B. Heavy metals in the soil – plant system. Novosibirsk: Science. Siberian Branch; 1991. 151 p. (In Russ.).
17. Kasatnikov V. A. Criteria for contamination of soil and plants with microelements, heavy metals when using urban sewage sludge as fertilizer. *Agrochemistry*. 1991;(11):78–83. (In Russ.).
18. Baklanov V. I., Bobrov O. G., Baranovskaya N. F. The use of sediments of biological treatment of industrial wastewater in the national economy. Moscow: Research Institute for Technical and Economic Research in the Chemical and Petrochemical Industries; 1990. 26 p. (In Russ.).
19. Baydina N. L. Inactivation of heavy metals by humus and zeollites in technogenically polluted soil. *Soil Science*. 1994;(9):121–125. (In Russ.).

## Информация об авторе

С. А. Шахов – профессор кафедры «Гидравлика, водоснабжение, химия» Сибирского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук.

## Information about the author

S. A. Shakhov – Professor of the Hydraulics, Water Supply, Chemistry Department, Siberian Transport University, Doctor of Engineering,

Статья поступила в редакцию 04.04.2023; одобрена после рецензирования 21.04.2023; принята к публикации 26.04.2023.

The article was submitted 04.04.2023; approved after reviewing 21.04.2023; accepted for publication 26.04.2023.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья  
УДК 624.21  
doi 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_64

### Влияние автомобилей на диссипативные свойства пролетных строений автодорожных мостов

Никита Викторович Семейко<sup>1✉</sup>, Андрей Игоревич Савенко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ОАО «Институт Гипростроймост», Москва, Россия

<sup>1</sup> semeyko@giprosm.ru✉

<sup>2</sup> savenko@giprosm.ru

**Аннотация.** Ветровые воздействия приводят к колебаниям мостов. Для подтверждения аэроупругой устойчивости пролетных строений выполняют физические аэродинамические исследования, в том числе с учетом влияния автотранспорта. Как правило, амплитуды колебаний пролетного строения в данной конфигурации значительно больше, чем без указанного влияния. При этом жесткостные и диссипативные характеристики автомобилей не моделируются, что могло бы привести к снижению получаемых амплитуд колебаний.

Целью данной работы является определение влияния автотранспорта на диссипативные свойства пролетного строения моста. Для решения системы уравнений движения, из которой определялись вертикальные колебания системы «пролетное строение – автомобили», был реализован неявный метод Ньюмарка. Демпфирование системы «пролетное строение – автомобили» определялось величиной логарифмического декремента колебаний, полученного в результате моделирования свободных затухающих и вынужденных резонансных колебаний.

Расчеты выполнялись при различном числе полос движения, занятых автотранспортом. Кроме того, варьировались параметры жесткости и демпфирования подвесок автомобилей. В результате было получено, что для подвесок, обладающих хорошими диссипативными свойствами, величина декремента системы «пролетное строение – автомобили» в разы больше по сравнению с пролетным строением без автомобилей. При удовлетворительном состоянии подвесок влияние автотранспорта можно оценить в 20 %.

Полученные результаты могут позволить увеличивать декремент колебаний модели пролетного строения моста при физических аэродинамических исследованиях с учетом влияния автотранспорта. Однако для этого необходимо выполнение работы по определению наиболее часто встречаемых в действительности параметров подвесок автомобилей.

**Ключевые слова:** автодорожный мост, аэродинамика, демпфирование, математическое моделирование, система «пролетное строение – автомобили»

**Для цитирования:** Семейко Н. В., Савенко А. И. Влияние автомобилей на диссипативные свойства пролетных строений автодорожных мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 64–73. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_64.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

### Vehicle influence on road bridge superstructure damping

Nikita V. Semeyko<sup>1✉</sup>, Andrey I. Savenko<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Institute Giprostroymost JSC, Moscow, Russia

<sup>1</sup> semeyko@giprosm.ru✉

<sup>2</sup> savenko@giprosm.ru

**Abstract.** Wind loads lead to bridge oscillations. To verify aeroelastic stability of superstructures physical aerodynamic investigations are performed with vehicles taken into consideration. Usually oscillation amplitudes in this configuration are much bigger than without vehicles. At the same time, stiffness and damping of the vehicles are not modeled as that could decrease oscillation amplitudes.

The main goal of this work is to determine vehicle influence on bridge superstructure damping. To solve the system of equations of motion from which vertical oscillations of vehicle – structure system were determined implicit

Newmark method was implemented. Vehicle – structure system damping was assessed by logarithmic oscillations decrement, obtained from the results of free decay and forced resonance vibrations.

Calculations were performed with different number of traffic lanes used by vehicles. Furthermore, suspension stiffness and damping also varied. As a result, it was obtained that for suspension with good damping characteristics vehicle – structure damping system was several times bigger than for superstructure without vehicles. With a satisfactory condition of the suspensions, the influence of vehicles can be estimated at 20 %.

The obtained results can allow increasing the decrement of superstructure model in physical aerodynamic investigations with consideration of vehicles. However, it is necessary to carry out some research on determination of most frequently used vehicles' suspensions.

**Keywords:** road bridge, aerodynamics, damping, mathematical modelling, vehicle – structure system

**For citation:** Semeyko N. V., Savenko A. I. Vehicle influence on road bridge superstructure damping. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(65):64–73. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_64.

## Введение

Мост является динамической системой. Воздействие на сооружение подвижных, ветровых, сейсмических воздействий вызывает колебания. Амплитуды колебаний зависят среди прочего и от возможности системы рассеивать энергию – демпфирования. Демпфирование может выражаться различными параметрами. Наиболее распространенный способ – через логарифмический декремент колебаний [1]. Диссипация энергии играет особую роль в случае резонанса, когда период изменения во времени внешней нагрузки совпадает с собственной частотой колебаний системы. Именно наличие в системе демпфирования ограничивает амплитуды колебаний в случае резонанса.

Тот факт, что ветер воздействует на мосты, вызывая их колебания, стал особенно широко известен после разрушения Такомского моста в 1940 г. и колебаний Волгоградского моста в 2010 г., впоследствии получившего название «танцующий мост». Эти и другие случаи колебаний мостов, вызванных ветровыми воздействиями, стали одним из поводов для разработки ГОСТа по правилам расчета и подтверждения аэроупругой устойчивости мостов, вступившего в силу в 2022 г. [2]. К наиболее распространенным видам аэроупругой неустойчивости мостов относится явление вихревого возбуждения [3], при котором происходят колебания сооружения поперек потока в узком диапазоне скоростей ветра, возникающие при совпадении одной из собственных частот колебаний сооружения с частотой схода вихрей дорожки Кармана. Одним из способов подтверждения аэроупругой устойчивости мостов является проведение физических аэродинамических исследований, в том числе с учетом автотранспорта, находящегося на пролетном строении. При такой конфигурации сечения пролетного строения при испытаниях имеют место значительные

амплитуды колебаний, вызванные явлением вихревого возбуждения. Однако при моделировании автотранспорта не учитываются их жесткостные и демпфирующие характеристики, которые могли бы значительно снизить получаемые амплитуды колебаний.

Данная статья отражает результаты численных исследований влияния автотранспорта на диссипативные свойства моста.

## Материалы и методы исследования

В модели системы «пролетное строение – автомобили» пролетное строение представляет собой плоскую балку, автомобили – массы на пружинах с демпферами (осцилляторы), расставленные по всей ее длине. Таким образом моделируется пробка (рис. 1).

Вертикальные колебания системы «пролетное строение – автомобили», с использованием метода главных координат [4] и с учетом только первой формы колебаний пролетного строения, определяются из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} M\ddot{q} + M\frac{\delta}{\pi}\omega_0\dot{q} + M\omega_0^2q = \sum_{i=1}^n m_i\ddot{y}_i\varphi_i + P(t)\varphi_P, \\ m_1\ddot{y}_1 + c_1(\dot{y}_1 - \dot{q}\varphi_1) + k_1(y_1 - q\varphi_1) = 0, \\ m_i\ddot{y}_i + c_i(\dot{y}_i - \dot{q}\varphi_i) + k_i(y_i - q\varphi_i) = 0, \\ m_n\ddot{y}_n + c_n(\dot{y}_n - \dot{q}\varphi_n) + k_n(y_n - q\varphi_n) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $M$  – обобщенная масса пролетного строения, кг;  $q$  – главная координата, соответствующая вертикальным колебаниям пролетного строения;  $\delta$  – декремент колебаний пролетного строения;  $\omega_0$  – частота колебаний пролетного строения (без автомобилей), рад/с;  $m$  – масса автомобиля, кг;  $y_i$  – вертикальные перемещения  $i$ -го автомобиля;  $\varphi_i$  – ордината функции формы в сечении, в котором расположен автомобиль;  $P(t)$  – внешняя сила, Н;  $\varphi_P$  – ордината функции формы в сечении, в котором приложена сила  $P(t)$ ;  $c$  – демпфирование рессор автомобиля, Н·с/м;  $k$  – жесткость рессор автомобиля, Н/м.



Для интегрирования системы уравнений (1) был реализован неявный метод Нью-Марка [5]. Для верификации реализованной программы был выполнен расчет модели в Femap (рис. 2).

Задача заключалась в определении свободных затухающих колебаний при задании начального отклонения балки. Исходные данные приведены в табл. 1.

На рис. 3 представлены графики затухающих колебаний балки в середине пролета. Графики практически накладываются друг на друга, что говорит о корректности реализованной математической модели.

Для исследования влияния автомобилей на обобщенный декремент системы «пролетное строение – автомобили» была использована модель пролетного строения с трехполосным дви-

жением и схемой Волгоградского моста. Массовые, жесткостные и диссипативные свойства были взяты из открытых источников и могут отличаться от действительных. Построенная модель имеет параметры, близкие к реальному сооружению, так как частота колебаний по первой форме практически совпадает с частотой натурального пролетного строения. На рис. 4 показана первая форма колебаний.

В табл. 2 приведены параметры модели пролетного строения. В монографии [6] определены интервалы частот и коэффициентов демпфирования для легковых и грузовых автомобилей с удовлетворительным состоянием стандартной подвески и гидропневматической (более совершенной) подвеской (табл. 3).

Для расчетов были выбраны средние значения частот и коэффициентов демпфирования

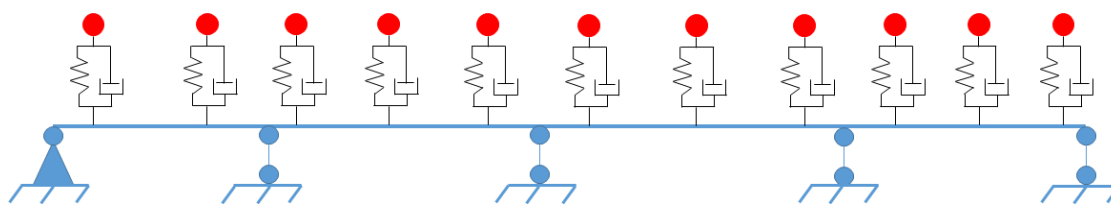


Рис. 1. Схема модели «пролетное строение – автомобили»

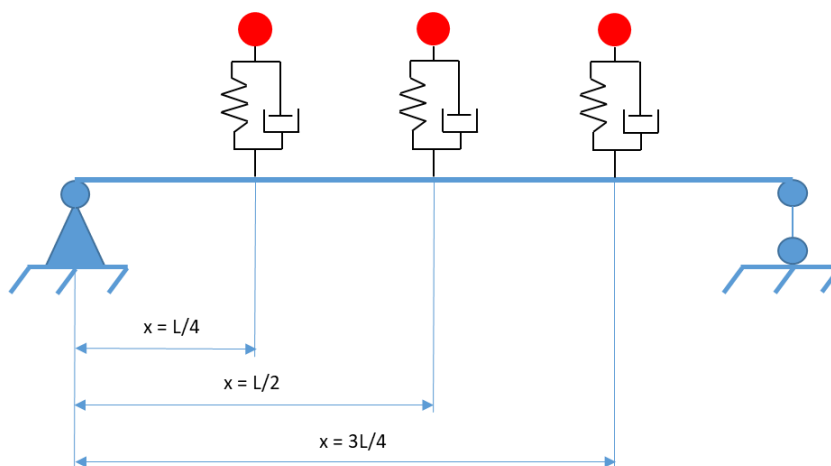


Рис. 2. Схема модели для верификации

Таблица 1

**Исходные данные для верификации**

Параметр	Значение
Длина балки $L$ , м	32
Погонная масса балки $m_0$ , кг/м	28 600
Частота колебаний балки $f$ , Гц	9,53
Декремент балки $\delta$	0
Масса автомобиля $m$ , кг	20 000
Жесткость подвески $k$ , Н/м	$1,01 \cdot 10^7$
Коэффициент демпфирования подвески $\xi$	0,848

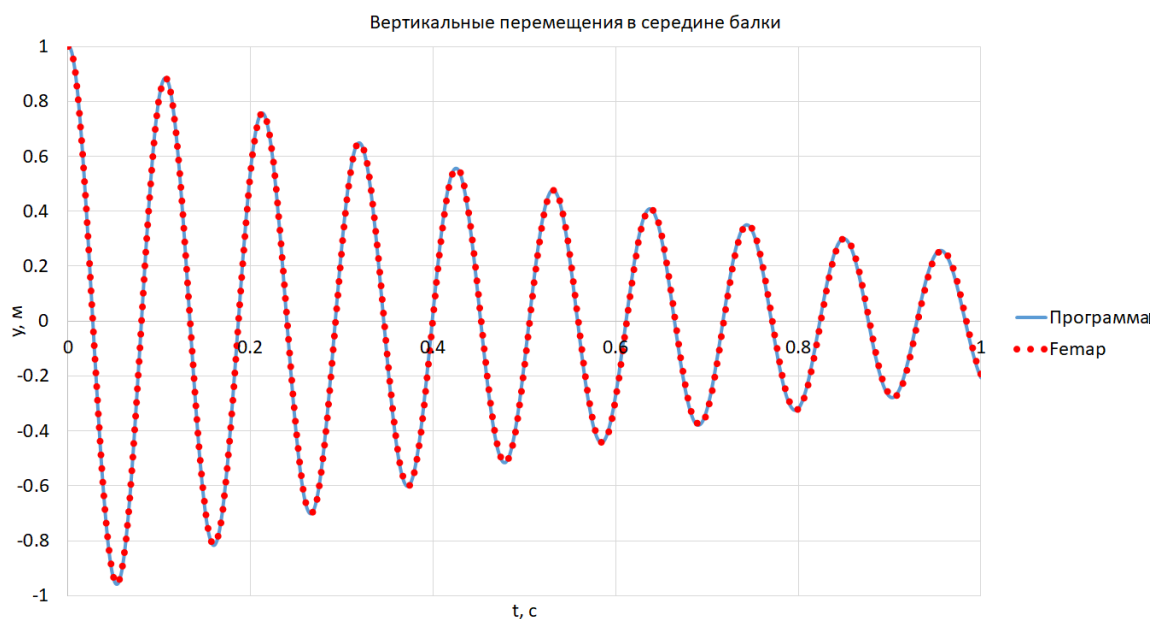


Рис. 3. Вертикальные перемещения в середине балки

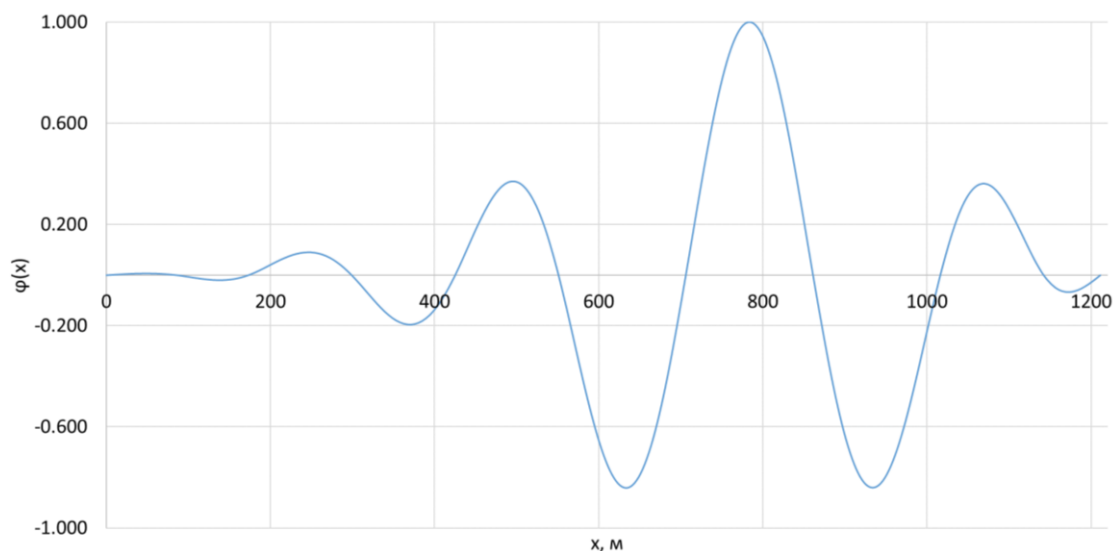


Рис. 4. Первая форма колебаний модели пролетного строения

Таблица 2

**Параметры модели пролетного строения**

Параметр	Значение
Максимальная длина пролета $L_{\max}$ , м	155
Обобщенная масса $M$ , кг	3 123 280
Частота колебаний по первой форме $f$ , Гц	0,412
Декремент $\delta$	0,02

Таблица 3

**Параметры автомобилей**

Тип автомобиля	Частота колебаний, Гц	Коэффициент демпфирования
<i>Со стандартной подвеской в удовлетворительном состоянии</i>		
Легковые	0,8–1,3	0,15–0,25
Грузовые	1,2–1,8	0,15–0,25
<i>С гидропневматической подвеской</i>		
Легковые	0,5–0,8	0,4–0,6
Грузовые	0,8–1,2	0,4–0,6

для двух типов подвесок. Масса и габариты автомобилей были определены в соответствии с ГОСТ 59625–2022. Рассмотренные конфигурации трафика и положения транспорта на пролетном строении приведены в табл. 4.

Декремент колебаний пролетного строения с автомобилями определялся при двух типах воздействий:

- 1) начальные условия (заданы перемещения в начальный момент времени,  $t = 0$  с);
- 2) гармоническое возбуждение.

В первом случае декремент определялся по графику свободных затухающих колебаний следующим образом:

$$\delta = \ln(A_k/A_{k+1}), \quad (2)$$

где  $A_k$ ,  $A_{k+1}$  – амплитуды колебаний, разделенные одним периодом, м.

Амплитуды рассматривались при первом периоде колебаний и спустя продолжительное время – через 100 с.

При гармоническом возбуждении декремент определялся так:

$$\delta = \pi \frac{A_{ст}}{A_{рез}}, \quad (3)$$

где  $A_{ст}$  – статический прогиб, м;  $A_{рез}$  – амплитуда установившихся резонансных колебаний, м.

При гармоническом возбуждении к модели «пролетное строение – автомобили» в середине пролета максимальной длины прикладывалась сила:

$$P(t) = P_0 \sin 2\pi f_0 t, \quad (4)$$

где  $P_0$  – амплитуда силы, Н;  $f_0$  – частота собственных колебаний системы «пролетное строение – автомобили»;  $t$  – время.

Для определения частоты собственных колебаний пролетного строения с автомобилями в различных конфигурациях решалась проблема собственных значений:

$$KV = \omega^2 MV = \lambda MV, \quad (5)$$

где  $K$  – матрица жесткости системы;  $V$  – собственный вектор;  $M$  – матрица масс системы;  $\lambda$  – собственное число.

Для этого в программном комплексе Mathcad определялись собственные числа матрицы:

$$A = M^{-1}K. \quad (6)$$

Собственные частоты системы «пролетное строение – автомобили» находились с использованием выражения

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi}. \quad (7)$$

Задача решалась для двух групп параметров автомобилей, указанных в табл. 5.

В табл. 6 представлены первые частоты колебаний системы «пролетное строение – автомобили» для групп I, II и четырех конфигураций автотранспорта (см. табл. 4).

Частота колебаний пролетного строения без автомобилей составляет 0,412 Гц. Увеличение количества автомобилей на пролетном строении приводит к увеличению массы си-

Таблица 4

Параметры трафика

Конфигурация	Расстановка автотранспорта по полосам
I	Еврофуры
II	Еврофуры – легковой транспорт
III	Еврофуры – легковой транспорт – легковой транспорт
IV	Еврофуры – легковой транспорт – еврофуры

Таблица 5

Группы параметров автомобилей

Группа	Тип автомобиля	Частота колебаний, Гц	Коэффициент демпфирования, %
I	Еврофура	1,50	20
	Легковой транспорт	1,05	
II	Еврофура	1,00	50
	Легковой транспорт	0,65	

Таблица 6

Собственные частоты колебаний системы «пролетное строение – автомобили»

Группа	Частота колебаний, Гц, при конфигурации автотранспорта			
	I	II	III	IV
I	0,388	0,384	0,379	0,364
II	0,386	0,380	0,375	0,361

стемы, а следовательно, к уменьшению частоты колебаний.

### Результаты исследования

В данном разделе приводятся величины декремента колебаний системы «пролетное строение – автомобили», полученные двумя методами:

- 1) гармонического возбуждения;
- 2) начальных условий (начальные перемещения балки в момент времени  $t = 0$  с).

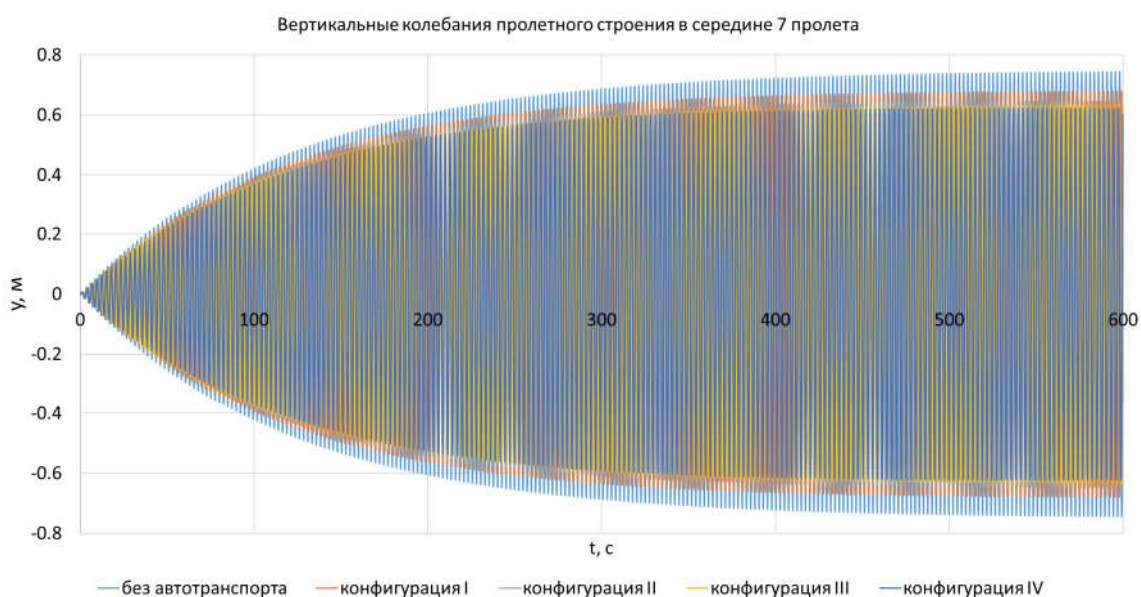
Приведенные в табл. 6 частоты использовались для задания гармонической силы и по-

лучения резонансных колебаний с установившейся амплитудой (рис. 5).

В табл. 7 приведены амплитуды установившихся резонансных колебаний без и с учетом автотранспорта для групп I, II и четырех рассмотренных конфигураций.

В табл. 8 указаны величины декремента колебаний системы «пролетное строение – автомобили». На рис. 6 приведены графики зависимости декремента системы «пролетное строение – автомобили» от конфигурации и параметров жесткости и демпфирования подвесок

а)



б)

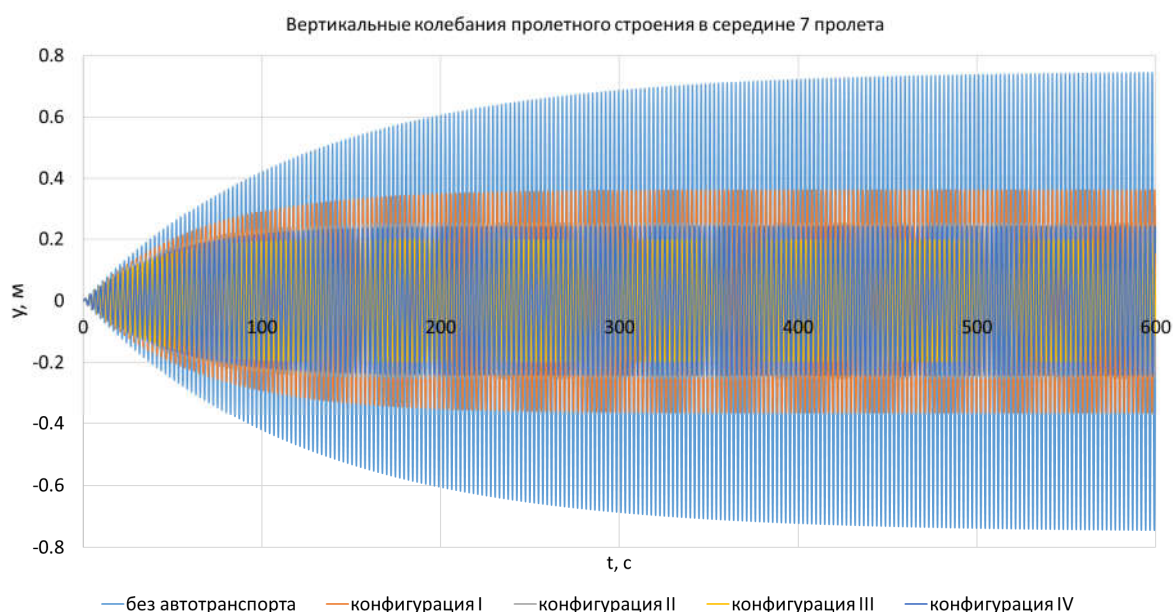


Рис. 5. Резонансные колебания без и с учетом автотранспорта:  
а – с параметрами группы I; б – с параметрами группы II

Таблица 7

## Амплитуды резонансных колебаний, м

Группа	Конфигурация автотранспорта				Без автотранспорта
	I	II	III	IV	
I	0,678	0,644	0,632	0,622	0,744
II	0,362	0,251	0,198	0,241	

Таблица 8

## Декременты колебаний пролетного строения с учетом автомобилей

Группа	Конфигурация автотранспорта			
	I	II	III	IV
I	0,022	0,023	0,024	0,024
II	0,041	0,059	0,075	0,062

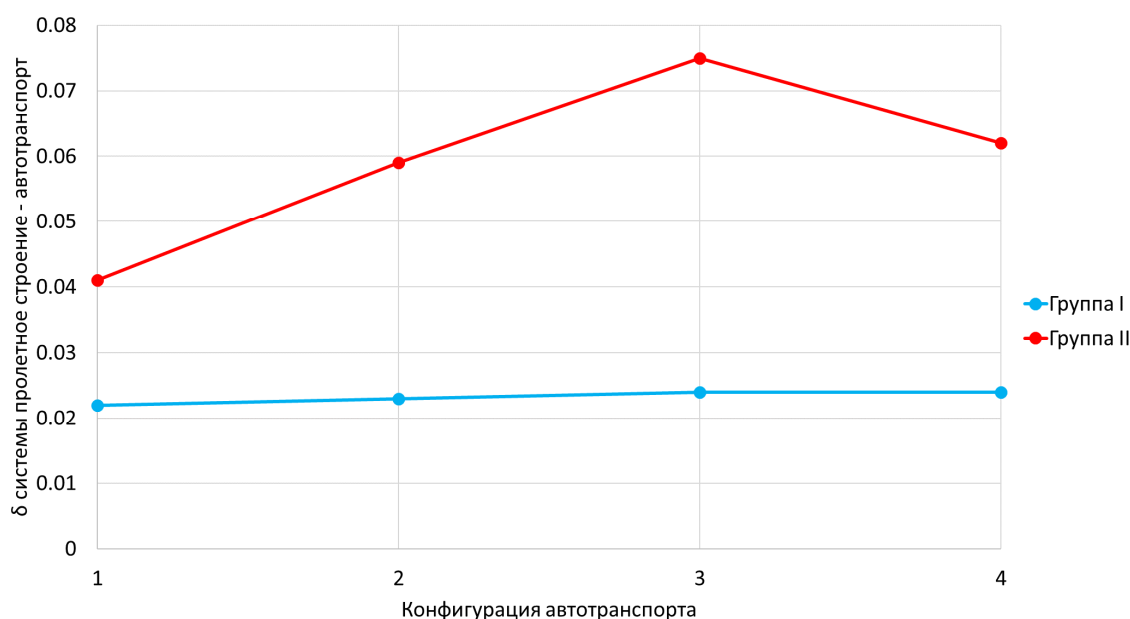


Рис. 6. Декремент системы «пролетное строение – автомобили» в зависимости от конфигурации автотранспорта

автотранспорта. Графики показывают, что до определенного момента общее демпфирование системы «пролетное строение – автомобили» возрастает с увеличением количества автомобилей, однако далее графики имеют различный характер для параметров автотранспорта, соответствующих группам I и II. Для группы I величина декремента системы становится практически постоянной, тогда как график группы II имеет ярко выраженный экстремум. Такой же эффект описывается в статье [7] зарубежных авторов: отмечается экстремальное значение декремента системы «пролетное строение – автомобили» при определенном уровне демпфирования подвесок автомобилей, после чего происходит его уменьшение.

Данные результаты показывают, что автомобили влияют на диссипативные свойства системы «пролетное строение – автомобили». Но это влияние может находиться в очень широких пределах. Для группы I (жесткая подвеска с пониженным демпфированием) это влияние невелико (10–20 %). Для группы II (мягкая подвеска с повышенным демпфированием) декремент системы может увеличиваться в разы, что значительно уменьшает амплитуду колебаний.

Рассмотрим результаты, полученные при задании начальных перемещений балки в момент времени  $t = 0$  с. На рис. 7 приведен график вертикальных свободных затухающих колебаний в середине 7-го пролета с автотранс-

портом конфигурации I (одна полоса еврофур) с параметрами группы II.

В табл. 9 приведены амплитуды и величины декремента колебаний на первом цикле и спустя 100 с. При первом цикле колебаний происходит значительное рассеивание энергии в элементах, моделирующих рессоры автомобилей. В дальнейшем величина декремента уменьшается и стремится к значению, полученному при рассмотрении резонансных колебаний (см. табл. 8). В табл. 10 указаны величины декрементов на первом цикле колебаний и спустя 100 с для всех рассмотренных комбинаций автотранспорта.

Приведенные результаты доказывают, что автомобили, образующие пробку на пролет-

ном строении, увеличивают декремент системы «пролетное строение – автомобили». При первом цикле колебаний автомобили могут значительно их демпфировать, на порядок увеличивая декремент сооружения. Это явно показывает, почему, например, при натурных испытаниях пролетных строений мостов [8] декремент колебаний конструкции нужно определять именно по участку свободных затухающих колебаний, т. е. уже после того, как подвижная нагрузка, возбудившая колебания, покинула пролетное строение. Иначе, как видно из данных табл. 10, в измерения может быть внесена значительная погрешность, не позволяющая адекватно определить диссипативные характеристики сооружения.

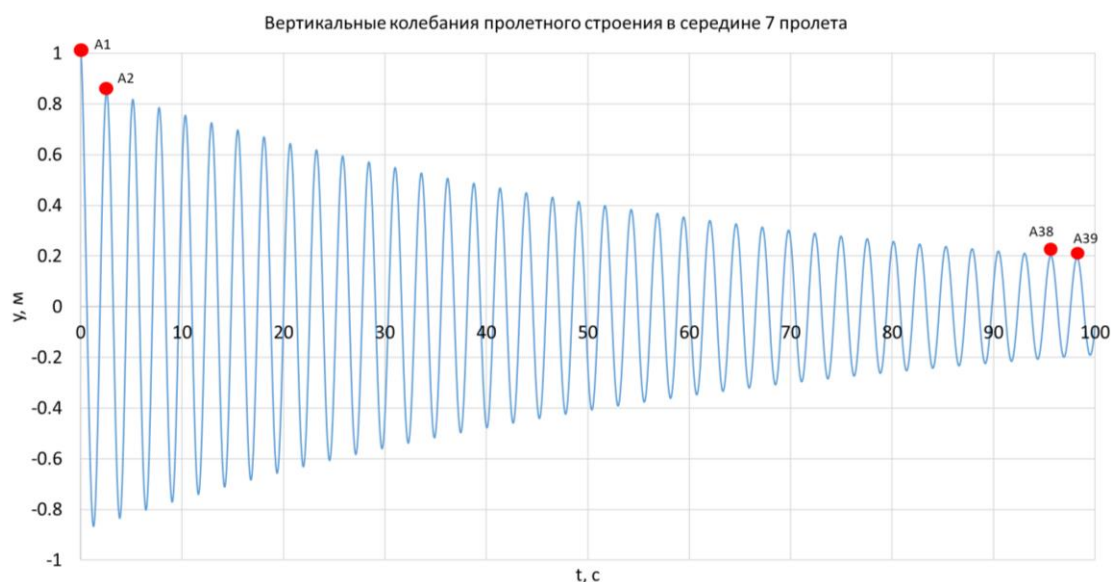


Рис. 7. Пример определения декремента колебаний системы «пролетное строение – автомобили» в случае одной полосы, занятой еврофурами

Таблица 9

#### Расчет декремента

Амплитуда	Величина, м	Декремент
A1	1,000	0,16
A2	0,851	
A38	0,203	0,04
A39	0,195	

Таблица 10

#### Декременты колебаний пролетного строения с учетом автомобилей. Расчет с начальными условиями

Группа	δ на первом цикле при конфигурации автотранспорта				δ спустя 100 с при конфигурации автотранспорта			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
I	0,147	0,174	0,199	0,280	0,021	0,022	0,023	0,023
II	0,161	0,196	0,230	0,300	0,04	0,055	0,068	0,060

### Выводы

Выполненная работа позволила прийти к следующим выводам:

1. При наиболее консервативно подобранных значениях жесткости и демпфирования подвесок автомобилей (жесткая подвеска с минимальным демпфированием) диссипативные свойства системы «пролетное строение – автомобили» меняются незначительно (в районе 10–20 %). При наименее консервативных параметрах (мягкая подвеска с максимальным демпфированием) обобщенный декремент системы растет в разы, что неизбежно приведет к уменьшению амплитуд колебаний в разы или полному их исчезновению (в случае аэроупругих колебаний типа вихревого возбуждения [9]). Усредненные, наиболее вероятные параметры подвесок автомобилей могут значительно влиять на амплитуды вынужденных колебаний, что имело бы смысл учитывать в аэродинамических исследованиях. Но для обоснования допусти-

мых параметров подвесок требуются соответствующие исследования и корректировка нормативной документации.

2. При возбуждении колебаний пролетного строения путем создания начальных условий или импульсным методом наличие на пролетном строении автотранспорта критически влияет на декремент системы, увеличивая его в разы. Поэтому при натурных испытаниях классическим методом (путем движения грузовых автомобилей через порожек [10]) необходимо производить измерения декремента строго после съезда автомобиля с пролета, т. е. в режиме свободных колебаний [11]. К сожалению, в ряде случаев, например для длинных много- и большепролетных мостов, это практически невозможно. С учетом того что именно для таких мостов наибольшее значение имеют диссипативные свойства, возникают резонные сомнения в правильности устоявшихся подходов к проведению испытаний.

### Список источников

1. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний. Москва : Высшая школа, 1980. 408 с.
2. ГОСТ 59625–2022. Мостовые сооружения. Правила расчета и подтверждения аэроупругой устойчивости : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 января 2022 г. № 10-ст : введен впервые. Москва : Российский институт стандартизации, 2022. 41 с.
3. Ruscheweyh H. Vortex excited vibrations // Wind-excited vibrations of structures. Wien : Springer-Verlag, 1994. P. 51–85.
4. Александров А. В., Потапов В. Д., Зылев В. Б. Строительная механика. Динамика и устойчивость упругих систем. Москва : Высшая школа, 2008. 384 с.
5. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. Москва : Стройиздат, 1982. 448 с.
6. Литвинов А. С., Фаробин Я. Е. Автомобиль, теория эксплуатационных свойств. Москва : Машиностроение, 1989. 240 с.
7. Bridge Damping Extraction Method from Vehicle-Bridge Interaction System Using Double-Beam Model / F. Gong, F. Han, Y. Wang, Y. Xia // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. P. 10304.
8. СП 79.13330.2012. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний : актуализированная редакция СНиП 3.06.07–86 : утверждены приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 30.06.2012 г. № 273 : дата введения 2013-01-01. Москва : Минрегион России, 2012. 80 с.
9. Саленко С. Д. Нестационарная аэродинамика плохообтекаемых многобалочных конструкций : специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Саленко Сергей Дмитриевич. Новосибирск, 2005. 332 с.
10. Сафронов В. С., Антипов А. В. Оценка динамических качеств металлического автодорожного моста по данным натурных испытаний и поверочных расчетов // Строительная механика и конструкции. 2020. Т. 1, № 24. С. 39–53.
11. Яшнов А. Н., Снежков И. И. Опыт диагностики искусственных сооружений методом малых воздействий // Транспортные сооружения. 2019. № 3. URL: <https://t-s.today/PDF/23SAT5319.pdf> (дата обращения: 20.03.2023).



## References

1. Biderman V. L. Theory of mechanical vibrations. Moscow: Vysshaya shkola; 1980. 408 p. (In Russ.).
2. GOST 59625–2022. Bridge structures. Rules for calculating and confirming aeroelastic stability. Approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated January 18, 2022 No. 10-st: introduced for the first time. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2022. 41 p. (In Russ.).
3. Ruscheweyh H. Vortex excited vibrations. *Wind-excited vibrations of structures*. Wien: Springer-Verlag; 1994. P. 51–85.
4. Aleksandrov A. V., Potapov V. D., Zilev V. B. Structural mechanics. Dynamics and stability of elastic systems. Moscow: Publishing House Higher School; 2008. 384 p. (In Russ.).
5. Bate K., Wilson E. Numerical methods in finite element analysis. Moscow: Stroyizdat; 1982. 448 p. (In Russ.).
6. Litvinov A. S., Farobin J. E. Automobile, theory of operating abilities. Moscow: Mashinostroenie; 1989. 240 p. (In Russ.).
7. Gong, F., Han, F., Wang, Y., Xia, Y. Bridge Damping Extraction Method from Vehicle–Bridge Interaction System Using Double-Beam Model. *Applied Sciences*. 2021;11:10304.
8. SP 79.13330.2012. Bridges and pipes. Rules of examination and tests. Updated version of SNiP 3.06.07–86. Approved by order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation dated June 30, 2012 No. 273. Introduction date 2013-01-01. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2012. 80 p. (In Russ.).
9. Salenko S. D. Unsteady aerodynamics of bluff multi-beam structures: specialty 01.02.05 Mechanics of liquid, gas and plasma. Dissertation for the degree of Doctor of Engineering. Salenko Sergey Dmitrievich. Novosibirsk; 2005. 332 p. (In Russ.).
10. Safronov V. S., Antipov A. V. Assessment of the dynamic qualities of a steel road bridge according to field tests and verification calculations. *Structural mechanics and constructions*. 2020;1(24):39–53. (In Russ.).
11. Yashnov A. N., Snezhkov I. I. Experience of engineering structures diagnostics by the method of small impacts. *Transport engineering*. 2019;(3). URL: <https://t-s.today/PDF/23SAT319.pdf>. (In Russ.).

## Информация об авторах

*Н. В. Семейко* – руководитель группы по вопросам динамики расчетного отдела ОАО «Институт Гипростроймост».

*А. И. Савенко* – начальник расчетного отдела ОАО «Институт Гипростроймост».

## Information about authors

*N. V. Semeyko* – Head of Dynamics Group of Bridges Stress Analysis Department, Institute Giprostroymost JSC.

*A. I. Savenko* – Chief of Bridges Stress Analysis Department, Institute Giprostroymost JSC.

Статья поступила в редакцию 28.03.2023; одобрена после рецензирования 08.04.2023; принята к публикации 27.04.2023.

The article was submitted 28.03.2023; approved after reviewing 08.04.2023; accepted for publication 27.04.2023.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья  
УДК 628.14.27.659  
doi 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_74

### Оценка погрешностей гидравлического расчета сетей водоотведения с внутренними отложениями

Олег Александрович Продоус<sup>1</sup>, Дмитрий Иванович Шлычков<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

<sup>1</sup> pro@enco.su

<sup>2</sup> SHlyichkovDI@mgsu.ru✉

**Аннотация.** Целью работы является оценка фактических погрешностей гидравлического расчета характеристик труб водоотведения с внутренними отложениями и сравнение их с характеристиками новых труб. В качестве метода исследования использован количественный метод оценки (сравнение) результатов вычисления значений гидравлических характеристик новых труб и труб с разной толщиной слоя осадка в их лотковой части. На конкретном примере проведено сравнение результатов гидравлического расчета новых труб и труб с разной толщиной отложений. Приведены графики зависимости расчетных характеристик труб от фактической толщины слоя внутренних отложений. С учетом относительной погрешности расчета значений гидравлических характеристик труб приведены графики зависимости фактических значений гидравлических характеристик труб сетей для условий приведенной задачи. Предложено количественно оценивать значения гидравлических характеристик труб водоотведения с учетом фактической толщины слоя отложений в их лотковой части. Рекомендовано устройство для проведения замеров фактической толщины слоя осадка. Предложено разработать специальное справочное пособие для проведения гидравлического расчета труб с конкретной толщиной слоя отложений в их лотковой части, а также методику обоснования необходимости проведения гидродинамической очистки самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб.

**Ключевые слова:** трубы водоотведения, внутренние отложения, толщина слоя, справочное пособие, замер слоя осадка

**Для цитирования:** Продоус О. А., Шлычков Д. И. Оценка погрешностей гидравлического расчета сетей водоотведения с внутренними отложениями // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 74–81. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_74.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

### Estimation of errors in the hydraulic calculation of sewerage networks with internal deposits

Oleg A. Prodous<sup>1</sup>, Dmitry I. Shlychkov<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

<sup>1</sup> pro@enco.su

<sup>2</sup> SHlyichkovDI@mgsu.ru✉

**Abstract.** The aim of the work is to evaluate the actual errors in the hydraulic calculation of the characteristics of drainage pipes with internal deposits and compare them with the characteristics of new pipes. As a research method, a quantitative method for evaluating (comparing) the results of calculating the values of the hydraulic characteristics of new pipes and pipes with different thicknesses of the sediment layer in their flume part was used. A specific example was used to compare the results of new pipes hydraulic calculation and pipes with different deposit thicknesses. Graphs of the pipes design characteristics dependence on the actual thickness of the internal deposits layer are given. Taking into account the relative error in calculating the values of the hydraulic characteristics of pipes, graphs of the actual values hydraulic characteristics networks pipes dependence for the conditions of the given problem are given. It is proposed to quantify the values of the hydraulic characteristics of drainage pipes, taking into account the actual thickness of the sediment layer in their flume. A device for measuring

the actual thickness of the sediment layer is recommended. It is proposed to develop a special reference manual for hydraulic calculation of pipes with a specific thickness of the deposits layer in their flume, as well as a method for substantiating the need for hydrodynamic cleaning of gravity sewage networks with deposits in their flume.

**Keywords:** drainage pipes, internal deposits, layer thickness, reference manual, sediment layer measurement

**For citation:** Prodous O. A., Shlychkov D. I. Estimation of errors in the hydraulic calculation of sewerage networks with internal deposits. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(65):74–81. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_74.

## Введение

Гидравлический расчет самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб производится по уточненной авторами формуле А. Шези, имеющей вид [1, 2]

$$i_{\text{пр}} = \frac{4 V_{\text{пр}}^2}{C_{\text{пр}}^2 d_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где  $i_{\text{пр}}$  – приведенный гидравлический уклон, м/м;  $V_{\text{пр}}$  – приведенная скорость в трубе со слоем отложений, м/с;  $C_{\text{пр}}$  – безразмерный приведенный коэффициент А. Шези;  $d_{\text{пр}}$  – приведенный диаметр труб, м.

Скорость  $V_{\text{пр}}$  определяется по формуле

$$V_{\text{пр}} = \frac{4 q}{\pi d_{\text{пр}}^2}. \quad (2)$$

Диаметр труб находится по формуле

$$d_{\text{пр}} = \sqrt{d_{\text{вн}}^2 - (d_{\text{вн}} - h_{\text{ф}})^2}, \quad (3)$$

где  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр для новых труб без слоя отложений (по ГОСТу), м;  $h_{\text{ф}}$  – фактическая толщина слоя осадка, м.

Так как фактический слой осадка  $h_{\text{ф}}$  в лотковой части труб изменяет площадь смоченной потоком внутренней поверхности трубы  $\omega_1$ , то изменившаяся (новая) площадь смоченного периметра  $\omega_2$  будет характеризоваться уже значением приведенного внутреннего

диаметра трубы  $d_{\text{пр}}$ , определяемого по формуле (3). Характеристики самотечного потока сточной жидкости представлены на рис. 1.

Безразмерный приведенный коэффициент А. Шези  $C_{\text{пр}}$  определяется по формуле [3]

$$C_{\text{пр}} = \frac{(R_{\text{пр}})^{0,167}}{n}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{пр}}$  – приведенный радиус, м,  $R_{\text{пр}} = \frac{d_{\text{пр}}}{4}$ ;  $n$  – коэффициент, характеризующий шероховатость внутренней поверхности труб.

Для практических расчетов принимают значение  $n$  в диапазоне от 0,012 до 0,014. Тогда формула (4) будет иметь вид

$$C_{\text{пр}} = \frac{(d_{\text{пр}}/4)^{0,167}}{0,013}. \quad (5)$$

Гидравлический расчет самотечных трубопроводов для определения гидравлического уклона  $i_{\text{ф}}$  при разной толщине слоя осадка  $h_{\text{ф}}$  производится по формулам (1)–(5) и дает разный результат [3]. Поэтому при подключении новых потребителей услуг по водоотведению у организаций, эксплуатирующих сети с осадком в лотковой части труб, появляется опасность возникновения ошибки при выдаче разрешения на подключение новых потребителей к сети водоотведения [4, 5].

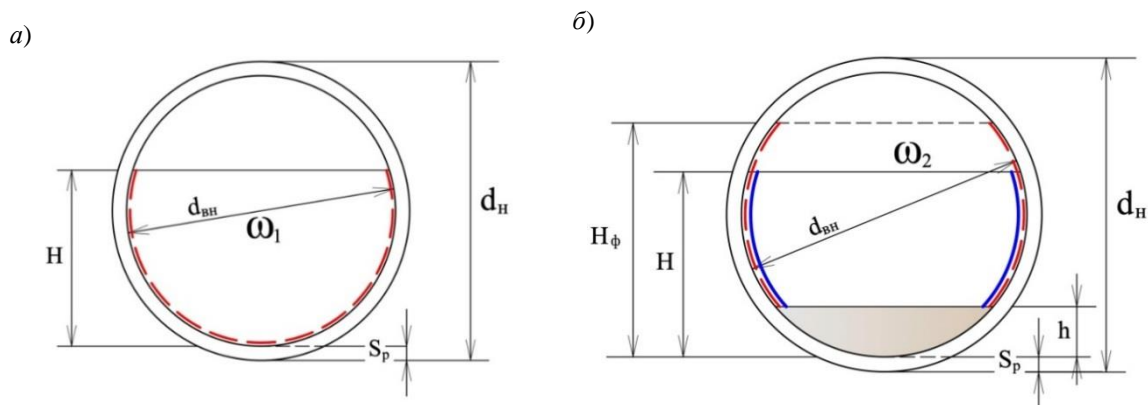


Рис. 1. Характеристики самотечного потока сточной жидкости в трубе, м<sup>2</sup>:  
а – без слоя отложений ( $\omega_1$ ); б – с толщиной слоя отложений  $h$  ( $\omega_2$ )

## Материалы и методы исследования

Необходимо оценить погрешность вычислений значений гидравлических характеристик труб [6], т. е. определить разность  $\delta$  (в процентах) между результатами вычисления фактических значений параметра  $i_\phi$  и расчетным значением  $i_p$  для новых труб:

$$\delta = (i_\phi - i_p) \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где  $\delta$  – погрешность определения значений  $i_\phi$  и  $i_p$ , %;  $i_\phi$  – фактическое значение гидравлического уклона для труб с конкретной толщиной слоя осадка  $h_\phi$ , м/м;  $i_p$  – расчетное значение гидравлического уклона новых труб, м/м.

Результаты вычислений фактических значений характеристик гидравлического потенциала труб  $d_{\text{вн}}^\phi$ ,  $V_\phi$ ,  $i_\phi$  при их гидравлическом расчете могут быть *завышенными*, если погрешность вычислений значений характеристик труб больше 0, т. е.  $\delta > 0$ , и *заниженными*, когда  $\delta < 0$ . Поэтому фактическую погрешность при расчете значений характеристик гидравлического потенциала труб следует характеризовать *относительной погрешностью* (в процентах), определяемой разностью между расчетным абсолютным значением характеристик для новой трубы и величиной ее приведенного значения для труб со слоем осадка  $h_\phi$ :

$$\delta_{d_{\text{вн}}}^\phi = (d_{\text{вн}}^\text{н} - d_{\text{пр}}) \cdot 100 \%; \quad (7)$$

$$\delta_V^\phi = (V_{\text{пр}} - V_{\text{н}}) \cdot 100 \%; \quad (8)$$

$$\delta_i^\phi = (i_{\text{пр}} - i_{\text{н}}) \cdot 100 \%. \quad (9)$$

С учетом фактической относительной погрешности  $\delta_\phi$  характеристик гидравлического потенциала труб их истинное значение будет больше или меньше на величину относительной погрешности  $\delta_\phi$ :

$$d_{\text{вн}}^\phi = d_{\text{пр}} \pm \delta_{d_{\text{вн}}}^\phi; \quad (10)$$

$$V_\phi = V_{\text{пр}} \pm \delta_V^\phi; \quad (11)$$

$$i_\phi = i_{\text{пр}} \pm \delta_i^\phi. \quad (12)$$

На конкретном примере покажем величины погрешностей расчета значений характеристик гидравлического потенциала труб с отложениями в их лотковой части и оценим величину фактически возникающих погрешностей  $\delta_\phi$  при их гидравлическом расчете [7, 8].

## Результаты исследования

**Условие задачи.** По трубопроводу из керамических труб диаметром 500 мм (0,5 м) перемещается расход сточной жидкости  $q = 250$  л/с (0,25 м³/с). Толщина слоя осадка в лотковой части труб  $h = 25$  мм (0,025 м). Рассчитать и сравнить погрешности расчета значений характеристик гидравлического потенциала новых труб  $d_{\text{вн}}$ ,  $V$  и  $i$  и значений тех же характеристик труб с толщиной слоя осадка в их лотковой части  $h_\phi = 25$  мм. Построить для сравнения графики функций  $d_{\text{вн}}^\phi = f(h_\phi)$ ,  $V_\phi = f(\sigma_\phi)$  и  $i_\phi = f(h_\phi)$  и показать процент расхождения значений  $i_p$  и  $i_\phi$ .

### Решение

1. По формуле (2) рассчитывают скорость потока  $V_p$  с учетом толщины слоя осадка  $h_\phi = 0,025$  м:

$$V_p = \frac{4q}{\pi d_{\text{вн}}^2} = \frac{4 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 0,5^2} = \frac{1}{0,785} = 1,27 \text{ м/с.}$$

По формуле (3) рассчитывают значение  $d_{\text{пр}}$ :

$$\begin{aligned} d_{\text{пр}} &= \sqrt{d_{\text{вн}}^2 - (d_{\text{вн}} - h)^2} = \\ &= \sqrt{0,5^2 - (0,5 - 0,025)^2} = \sqrt{0,25 - 0,226} = \\ &= \sqrt{0,024} = 0,156 \text{ м;} \end{aligned}$$

$$d_{\text{пр}}^\phi = d_{\text{вн}} - d_{\text{пр}} = 0,5 - 0,156 = 0,344 \text{ м.}$$

Далее вычисляют значения  $V_\phi$ :

$$\begin{aligned} V_{\text{пр}}^\phi &= \frac{4q}{\pi (d_{\text{пр}}^\phi)^2} = \frac{4 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 0,344^2} = \frac{1}{0,372} = \\ &= 2,69 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

2. По формуле (5) определяют расчетное  $C_p$  и приведенное  $C_{\text{пр}}$  значения коэффициента А. Шези:

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{(d_{\text{вн}}/4)^{0,167}}{0,013} = \frac{0,125^{0,167}}{0,013} = \frac{0,7066}{0,013} = \\ &= 54,35; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{пр}} &= \frac{(d_{\text{пр}}/4)^{0,167}}{0,013} = \frac{0,086^{0,167}}{0,013} = \frac{0,6638}{0,013} = \\ &= 51,06. \end{aligned}$$

3. По формуле (1) подсчитывают расчетное  $i_p$  и фактическое  $i_\phi$  значения гидравлического уклона:

$$\begin{aligned} i_p &= \frac{4V_p^2}{C_p^2 d_{\text{вн}}} = \frac{4 \cdot 1,27^2}{54,35^2 \cdot 0,5} = \frac{6,45}{1477} = \\ &= 0,00437 \text{ м/с;} \end{aligned}$$

$$i_{\text{пр}}^{\phi} = \frac{4(V_{\text{пр}}^{\phi})^2}{C_{\text{пр}}^2 d_{\text{пр}}} = \frac{4 \cdot 2,69^2}{51,06^2 \cdot 0,344} = \frac{28,94}{896,85} = 0,03227 \text{ м/м.}$$

4. По формулам (7)–(9) рассчитывают значения фактических погрешностей  $\delta$  расчета значений характеристик гидравлического потенциала труб со слоем осадка  $h = 0,025$  м:

$$\begin{aligned} \delta_{d_{\text{вн}}}^{\phi} &= (d_{\text{вн}}^{\text{н}} - d_{\text{пр}}) \cdot 100 \% = \\ &= (0,5 - 0,344) \cdot 100 \% = 15,6 \%; \\ \delta_V^{\phi} &= (V_{\phi} - V_p) \cdot 100 \% = \\ &= (2,69 - 1,27) \cdot 100 \% = 142,0 \%; \\ \delta_i^{\phi} &= (i_{\phi} - i_p) \cdot 100 \% = \\ &= (0,03227 - 0,00437) \cdot 100 \% = 2,79 \%. \end{aligned}$$

5. По формулам (10)–(12) определяют истинное (фактическое) значение характеристик гидравлического потенциала труб с осадком  $h_{\phi}$  в их лотковой части:

$$\begin{aligned} d_{\text{вн}}^{\phi} &= d_{\text{пр}} - \delta_{d_{\text{вн}}}^{\phi} = \\ &= 0,5 - 0,5 \cdot 15,6 \% / 100 \% = 0,422 \text{ м}; \\ V_{\phi} &= V_p + \delta_V^{\phi} = \\ &= 1,27 + 1,27 \cdot 142 \% / 100 \% = 3,07 \text{ м/с}; \\ i_{\phi} &= i_{\text{пр}} + \delta_i^{\phi} = 0,03227 + \\ &+ 0,03227 \cdot 2,79 \% / 100 \% = 0,03317 \text{ м/м.} \end{aligned}$$

6. Для построения графиков зависимостей  $d_{\text{вн}}^{\phi} = f(h_{\phi})$ ,  $i_p = f(V_p)$  и  $i_{\phi} = f(h_{\phi})$  в табл. 1 приведены значения расчетных и фактических величин характеристик гидравлического потенциала новых труб и труб с разной толщиной слоя отложений  $h_{\phi}$ .

По данным табл. 1 на рис. 2 построен график зависимости  $i_p = f(V_p)$ .

График на рис. 2 свидетельствует о том, что с увеличением расчетной скорости  $V_p$  увеличиваются потери напора на сопротивление по длине гидравлического уклона  $i_p$ .

Для рассмотренного примера в табл. 1 и 2 приведены истинные значения погрешности расчета характеристик гидравлического потенциала труб с осадком в лотковой части  $h_{\phi}$  для построения графиков зависимостей  $d_{\text{вн}}^{\phi} = f(h_{\phi})$ ,  $V_{\phi} = f(h_{\phi})$ ,  $i_{\phi} = f(h_{\phi})$ , представленных на рис. 3–5.

В табл. 3 приведены фактические значения характеристик гидравлического потенциала труб для приведенного примера при разной толщине слоя осадка  $h_{\phi}$ .

Таблица 1

Сравнение расчетных и фактических значений характеристик гидравлического потенциала труб

Характеристики гидравлического потенциала	Расчетная скорость движения сточной жидкости в новых трубах $V_p$ , м/с							
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$d_{\text{вн}}$ , м	0,428							
$C_p$	52,96							
$i_p$ , м/м	0,00083	0,00333	0,00749	0,01332	0,02081	0,02997	0,04079	0,05328

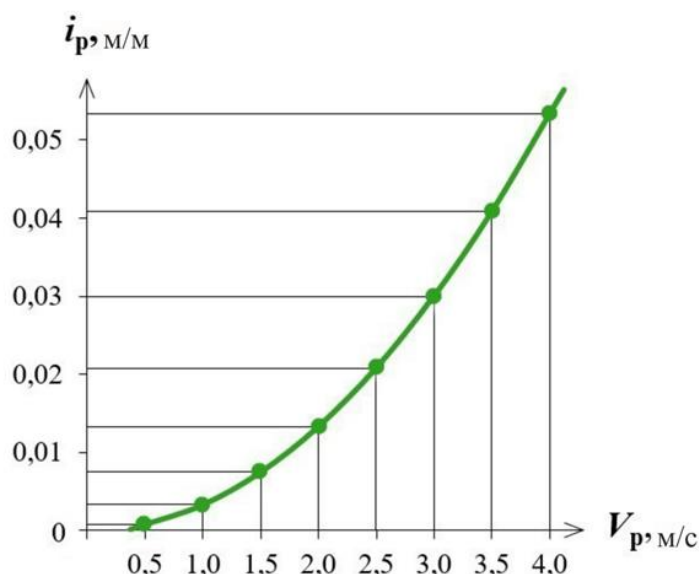


Рис. 2. График зависимости  $i_p = f(V_p)$

Фактические значения характеристик труб

Характеристики гидравлического потенциала труб	Фактическая толщина слоя отложений $h_{\phi}$ , мм							
	1,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0
	Фактическая скорость движения сточной жидкости $V_{\phi}$ , м/с							
	1,75	1,78	1,82	1,87	1,91	1,96	2,01	2,06
$d_{\text{вн}}^{\phi*}$ , м	0,427	0,423	0,418	0,413	0,408	0,403	0,398	0,393
$d_{\text{пр}}^{\phi**}$ , м	0,398	0,363	0,336	0,316	0,299	0,284	0,271	0,258
$C_{\phi}$	52,94	52,86	52,75	52,65	52,54	52,43	52,32	52,21
$i_{\phi}$ , м/м	0,01025	0,01250	0,014172	0,01598	0,01769	0,01969	0,02178	0,02410

$$* d_{\text{вн}}^{\phi} = (d_{\text{н}} - 2S_{\text{р}}) - h_{\phi}.$$

$$** d_{\text{пр}}^{\phi} = \sqrt{d_{\text{вн}}^2 - (d_{\text{вн}} - h_{\phi})^2}, d_{\text{пр}}^{\phi} = d_{\text{вн}} - d_{\text{пр}}.$$

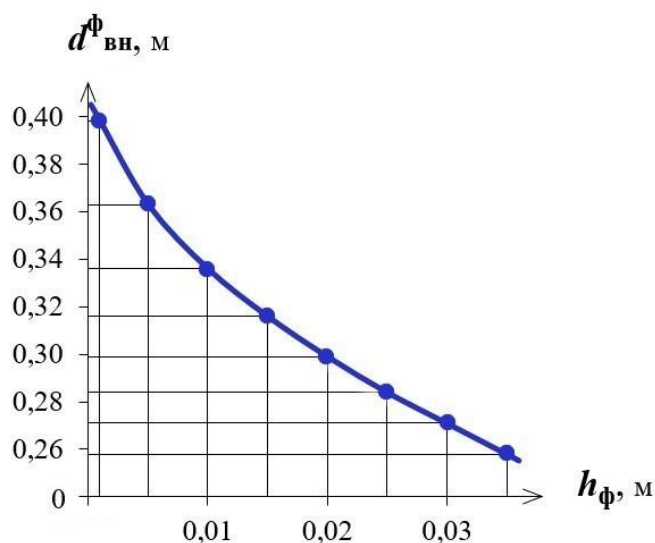
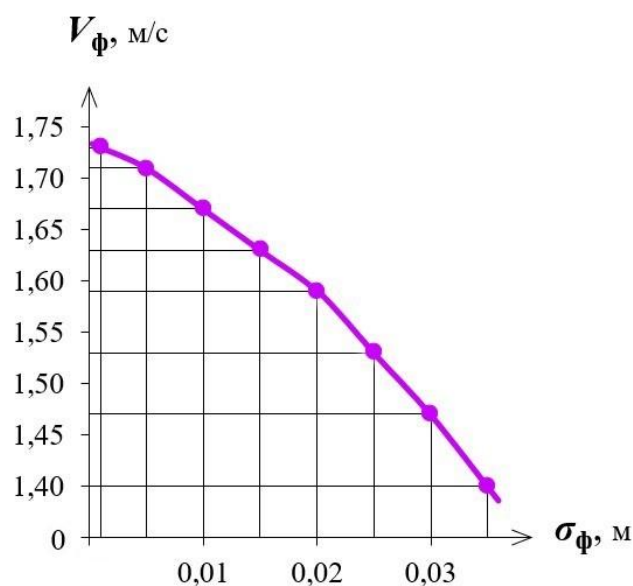
Рис. 3. График зависимости  $d_{\text{вн}}^{\phi} = f(h_{\phi})$ Рис. 4. График зависимости  $V_{\phi} = f(\sigma_{\phi})$ 

График на рис. 5 свидетельствует о том, что чем больше значение фактической тол-

щины слоя осадка  $h_{\phi}$ , тем больше значение фактического гидравлического уклона сети  $i_{\phi}$ .

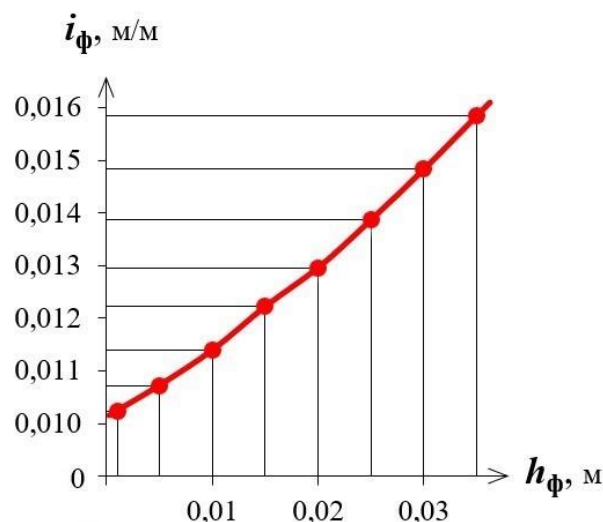


Рис. 5. График зависимости  $i_\phi = f(h_\phi)$

Таблица 3

**Фактические значения характеристик гидравлического потенциала труб**

Характеристики гидравлического потенциала труб	Фактическая толщина слоя осадка $h_\phi$ , мм							
	1,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0
	Фактическая погрешность расчета значений характеристик труб $\delta_\phi$ , %							
$d_{\text{вн}}$ , м	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$V$ , м/с	1,0	4,0	8,0	13,0	17,0	22,0	27,0	32,0
$i$ , м/м	0,02	0,06	0,13	0,21	0,29	0,38	0,47	0,57
Истинное значение характеристик гидравлического потенциала труб с учетом погрешности расчета								
$d_{\text{вн}}^*$ , м	0,4276	0,4209	0,4138	0,4068	0,3998	0,3929	0,3861	0,3792
$V_\phi^*$ , м/с	1,73	1,71	1,67	1,63	1,59	1,53	1,47	1,40
$i_\phi^*$ , м/м	0,01024	0,01071	0,01138	0,01219	0,01292	0,01382	0,01476	0,01576

### Выводы

Анализ значений погрешностей расчета величин  $d_{\text{вн}}^\phi$ ,  $V_\phi$  и  $i_\phi$  (см. табл. 3) показывает, что для заданных в примере условий при толщине слоя осадка  $h_\phi = 25$  мм значения фактических гидравлических характеристик составят:

$$\begin{aligned}
 d_{\text{вн}}^\phi &= d_p - \sigma_\phi = \\
 &= 0,428 - 0,428 \cdot 15,6 \% / 100 \% = \\
 &= 0,428 - 0,0667 = 0,361 \text{ м;} \\
 V_\phi &= V_p + \delta_\phi = \\
 &= 1,27 + 1,27 \cdot 142 \% / 100 \% = \\
 &= 1,27 + 1,80 = 3,07 \text{ м/с;} \\
 i_\phi &= i_p + \delta_\phi = \\
 &= 0,02410 + 0,02410 \cdot 2,79 \% / 100 \% = \\
 &= 0,02410 + 0,00067 = 0,02477 \text{ м/м.}
 \end{aligned}$$

Приведенные в табл. 2 и 3 данные, а также представленные на рис. 3–5 графики позволяют сделать следующие выводы:

1. Основное влияние на значения фактических характеристик труб  $d_{\text{вн}}^\phi$ ,  $V_\phi$  и  $i_\phi$  оказывает фактическая толщина слоя осадка  $h_\phi$ , изменяющаяся в процессе эксплуатации. Поэтому погрешности при гидравлическом расчете значений этих характеристик требуется всегда оценивать количественно для исключения необоснованных выводов при эксплуатации сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб [9, 10].

2. Необходимо нормативно закрепить обязанность за организациями с любой формой собственности проводить периодические замеры фактической толщины слоя осадка  $h_\phi$  в лотковой части труб любого диаметра и из любого вида материалов [11].

3. Следует разработать для практического использования шкалу допустимых значений фактической толщины слоя осадка  $h_\phi$  в трубах разного диаметра и из разного вида материалов.



4. Необходимо разработать специальное справочное пособие для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб. Использование такого справочного пособия позволит повысить точность гидравлических расчетов сетей водоотведения и на практике обосновывать возможность подключения новых потребителей услуг к

действующим сетям водоотведения с отложениями в их лотковой части [12, 13].

5. Требуется разработать методику обоснования необходимости проведения гидродинамической очистки самотечных сетей водоотведения из разных видов материалов труб в зависимости от толщины фактического слоя осадка в их лотковой части [14, 15].

### Список источников

1. Продоус О. А., Шлычков Д. И. Сравнительный анализ расчетных зависимостей для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11, № 3 (38). С. 462–469.
2. Продоус О. А., Шлычков Д. И. Уточненная формула А. Шези для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб // Интеллектуальный марафон в области водоснабжения и водоотведения : сборник докладов участников интеллектуального марафона в области водоснабжения и водоотведения среди молодых ученых, аспирантов и студентов (Москва, 9 сентября 2021 г.). Москва : Издательство МИСИ–МГСУ, 2021. С. 56–60.
3. Чупин В. Р., Мелихов Г. С., Чупин Р. В. Развитие методики гидравлических расчетов систем водоотведения // Вода и экология: проблемы и решения. 2010. № 1/2 (42/43). С. 48–58.
4. Чупин Р. В. Оптимизация развивающихся систем водоотведения : монография. Иркутск : Издательство Иркутского государственного технического университета, 2015. 418 с.
5. Продоус О. А., Шлычков Д. И. Гидравлический расчет сетей водоотведения с внутренними отложениями : монография. Москва : Издательство МИСИ–МГСУ, 2022. 120 с.
6. Продоус О. А. Допустимая погрешность значений расчетных параметров при гидравлическом расчете трубопроводов из полимерных материалов // Технологии очистки воды «ТЕХНОВОД–2021» : материалы XIII Международной научно-практической конференции (Сочи, Красная Поляна, 14–17 декабря 2021 г.). Новочеркасск : Лик, 2021. С. 95–100.
7. Ручкина О. И., Дьяков П. П., Россихин В. Ю. Оценка естественной тяги в коллекторе водоотводящей сети // Construction and Geotechnics. 2020. Т. 11, № 2. С. 78–87.
8. Фоминых А. В., Тельминов А. В., Ковшова Н. А. Зависимость коэффициента потерь на трение по длине трубы в гидравлических системах АПК // Вестник Курганской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 3 (27). С. 79–82.
9. Харькин В. А. Разработка системного подхода и оптимизации эксплуатации безнапорных водоотводящих сетей : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Харькин Владислав Альбертович. Москва, 2005. 156 с.
10. Оптимизация развивающихся систем водоотведения / В. Р. Чупин, И. В. Майзель, Р. В. Чупин, Т. А. Нгуен // Инновационные системы отведения и очистки поверхностного стока с урбанизированных территорий : материалы Международной научно-практической конференции (Петрозаводск, 13–14 ноября 2014 г.). Санкт-Петербург : Свое издательство, 2014. С. 105–126.
11. Эксплуатация систем водоснабжения и канализации: учебное пособие для вузов / М. И. Алексеев, В. Д. Дмитриев, Б. Г. Мишуков, Ю. С. Сергеев. Москва : Высшая школа, 1993. 272 с.
12. Яковлев С. В., Калицун В. И. Самоочищение канализационной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 1970. № 7. С. 4–7.
13. Иваненко И. И., Сеничева К. С. Изучение режима поступления городских сточных вод малых населенных пунктов в сухую погоду // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14, № 2 (125). С. 225–236.
14. Orlov V., Zotkin S. Influence of the temperature factor on the hydraulic resistance of pressure pipes // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Vol. 263. P. 04004.
15. Чупин Р. В. Обоснование области применения автомобильного транспорта в районных системах водоотведения // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12, № 2 (41). С. 232–239.

### References

1. Prodous O. A., Shlychkov D. I. Comparative analysis of design dependencies for hydraulic calculation of gravity sewerage networks. *Proceedings of universities. Investments. Construction. Real estate*. 2021;11(3):462–469. (In Russ.).

2. Prodous O. A., Shlychkov D. I. Refined formula A. Chezi for hydraulic calculation of gravity sewerage networks with deposits in the tray part of pipes. *Collection of reports of the participants of the intellectual marathon in the field of water supply and sanitation among young scientists, graduate students and students (Moscow, September 9, 2021)*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering Publishing House MISI – MGSU, 2021. 56–60. (In Russ.).
3. Chupin V. R., Melikhov G. S., Chupin R. V. Development of methods of hydraulic calculations of drainage systems. *Water and ecology: problems and solutions*. 2010;(42-43):48–58. (In Russ.).
4. Chupin R. V. Optimization of developing wastewater systems: monograph. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publishing House; 2015. 418 p. (In Russ.).
5. Prodous O. A., Shlychkov D. I. Hydraulic calculation of drainage networks with internal deposits: monograph. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering Publishing House MISI–MGSU; 2022. 120 p. (In Russ.).
6. Prodous O. A. Permissible error of the values of design parameters in the hydraulic calculation of pipelines made of polymer materials. *Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference Water purification technologies TECHNOVOD-2021 (Sochi, Krasnaya Polyana, December 14–17, 2021)*. Novocherkassk: Lik; 2021. P. 95–100. (In Russ.).
7. Ruchkinova O. I., Dyakov P. P., Rossikhin V. Yu. Evaluation of natural draft in the collector of the drainage network. *Construction and architecture*. 2020;11(2):78–87. (In Russ.).
8. Fominykh A. V., Tel'minov A. V., Kovshova N. A. Dependence of the friction loss coefficient along the length of the pipe in the hydraulic systems of the agro-industrial complex. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2018;(27):79–82. (In Russ.).
9. Kharkin V. A. Development of a systematic approach and optimization of non-pressure drainage networks operation. Speciality 05.23.04 Water Supply, Sewerage, Building Systems of Water Resources Protection. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Kharkin Vladislav Albertovich. Moscow; 2005. 156 p. (In Russ.).
10. Chupin V. R., Maizel I. V., Chupin R. V., Nguyen T. A. Optimization of developing wastewater disposal systems. *Innovative systems for diversion and treatment of surface runoff from urban areas: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Petrozavodsk, November 13–14, 2014)*. Saint Petersburg; 2014. P. 105–126. (In Russ.).
11. Alekseev M. I., Dmitriev V. D., Mishukov B. G., Sergeev Yu. S. Operation of water supply and sewerage systems. Moscow: Higher School; 1993. 272 p. (In Russ.).
12. Yakovlev S. V., Kalitsun V. I. Self-cleaning of the sewer network. *Water supply and sanitary equipment*. 1970;(7):4–7. (In Russ.).
13. Ivanenko I. I., Senicheva K. S. The study of the mode of receipt of urban wastewater from small settlements in dry weather. *Vestnik of Moscow State University of Civil Engineering*. 2019;14(125):225–236. (In Russ.).
14. Orlov V., Zotkin S. Influence of the temperature factor on the hydraulic resistance of pressure pipes. *E3S Web of Conferences. Edition Diffusion Presse Sciences*. 2021;263:04004.
15. Chupin R. V., Nguyen T. A. Substantiation of the parameters of the projected drainage systems. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*. 2022;12(41):232–239. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

О. А. Продоус – независимый эксперт в сфере водоснабжения и водоотведения, доктор технических наук, профессор.

Д. И. Шлычков – доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, кандидат технических наук.

### **Information about the authors**

O. A. Prodous – Independent Expert in the Field of Water Supply and Sewage, Doctor of Engineering, Professor.

D. I. Shlychkov – Associate Professor of the Water Supply and Sewage Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 04.04.2023; одобрена после рецензирования 21.04.2023; принята к публикации 26.04.2023.

The article was submitted 04.04.2023; approved after reviewing 21.04.2023; accepted for publication 26.04.2023.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 642.21

doi 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_82

### Экспериментальные исследования скорости роста усталостных трещин в сварных конструкциях железнодорожных мостов

Михаил Юрьевич Маликов<sup>1✉</sup>, Леонид Юрьевич Соловьев<sup>2</sup>,  
Алексей Алексеевич Неровных<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup> mixakad@mail.ru✉

<sup>2</sup> lys111@yandex.ru

<sup>3</sup> aleksey@nerovnykh.ru

**Аннотация.** Проблема усталостного трещинообразования в сварных узлах (местах сварных соединений элементов) металлических пролетных строений железнодорожных мостов является одной из наиболее актуальных в настоящее время. На сегодняшний день на сети РЖД эксплуатируют около 20 % болтосварных пролетных строений с трещинами, в том числе нелокализованными. При этом количество подобных дефектов продолжает расти и за последнее десятилетие существенно увеличилось. Стоит отметить, что исследований усталостного ресурса сварных узлов – наработки до образования трещин – достаточно много, а исследований кинетики их развития значительно меньше. Кроме того, отсутствуют и подтвержденные расчетами граничные (критические) размеры трещин, существенно влияющие на состояние конструкций.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных лабораторных исследований скорости роста усталостных трещин, аналогичных трещинам типа Т-9 (согласно принятой классификации), возникающих в узлах сварных металлических пролетных строений мостов. Лабораторные испытания проводились по запатентованной методике с соответствующим контролем образования трещины. Одной из важнейших составляющих определения скорости роста трещины являлось определение длины трещины, при которой наступает ее неконтролируемый рост. Это необходимо для прогнозирования роста трещины и своевременного принятия мер по ее устранению или торможению.

По результатам исследований получены зависимости скорости роста от различных параметров. Введен новый параметр – ускорение, т. е. увеличение скорости роста трещины за некоторый период времени, который наиболее ярко свидетельствует о неконтролируемом характере роста. Стабильный рост трещины наблюдается на протяжении 1,6 млн циклов нагружений с постепенным увеличением скорости роста, изменением длины трещины за этот период с 30 до 160 мм. При длине трещины 160 мм и скорости роста  $1,3 \cdot 10^{-4}$  мм/цикл начинается существенное увеличение последней, что позволяет принять эти параметры как критические, при которых рост трещины выходит из-под контроля.

**Ключевые слова:** сварные узлы, усталостные трещины, скорость роста

**Для цитирования:** Маликов М. Ю., Соловьев Л. Ю., Неровных А. А. Экспериментальные исследования скорости роста усталостных трещин в сварных конструкциях железнодорожных мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 82–90. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_82.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

### Experimental studies of fatigue crack growth rate in welded structures of railway bridges

Mikhail Yu. Malikov<sup>1✉</sup>, Leonid Yu. Solovyev<sup>2</sup>, Aleksey A. Nerovnykh<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup> mixakad@mail.ru✉

<sup>2</sup> lys111@yandex.ru

<sup>3</sup> aleksey@nerovnykh.ru

**Abstract.** The problem of fatigue cracking in the welded joints of metal bridge spans is one of the most actual nowadays. Today about 20 % of bridge spans with cracks, including non-localized ones, are in operation on the

Russian Railways network. At the same time the number of such defects continues to grow and has considerably increased during the last decade. It is necessary to note, that there are rather many researches of fatigue life of welded elements, before crack formation, but there are practically no researches of growth rate and dynamics of their development. Besides, the boundary (critical) sizes of cracks, essentially influencing a condition of constructions, confirmed by calculations are absent.

This paper presents the results of experimental laboratory studies of fatigue crack growth rate similar to T-9 cracks (according to the accepted classification) arising in the nodes of welded metal bridge spans. Laboratory tests were carried out by a patented technique with corresponding control of crack formation. One of the most important components of determining the crack growth rate was to determine the crack length at which its uncontrolled growth occurs. This is necessary to predict the crack growth and to take timely measures to eliminate or inhibit it.

According to the results of the studies, the dependences of the growth rate on various parameters have been obtained. A new parameter of crack growth – acceleration – an increase in the crack growth rate over a certain period of time, which most clearly expresses the beginning of its uncontrolled growth, has been introduced. Stable crack growth is observed during 1.6 million load cycles with a gradual increase in the growth rate, with crack length during this period varying from 30 to 160 mm. At a crack length of 160 mm and a growth rate of  $1.3 \cdot 10^{-4}$  mm/cycle a significant increase in the growth rate begins, which allows us to accept these parameters as critical, at which uncontrolled crack growth begins.

**Keywords:** welded joints, fatigue cracks, growth rate

**For citation:** Malikov M. Yu., Solovyev L. Yu., Nerovnykh A. A. Experimental studies of fatigue crack growth rate in welded structures of railway bridges. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(65):82–90. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_82.

### Введение

На сети железных дорог Российской Федерации эксплуатируют более 5 000 металлических пролетных строений со сварными и болтосварными соединениями. Несмотря на не продолжительный период эксплуатации, такие конструкции имеют высокую степень дефектности в виде усталостных трещин, образующихся в сварных швах и основном металле околошовных зон. Наиболее часто встречаются трещины, возникающие в основном металле стенки балки у верхних и нижних концов прикрепления вертикальных ребер жесткости (тип Т-9 и Т-10) [1]. За последние 10 лет количество таких трещин в пролетных строениях увеличилось в 2...3 раза. Дефектные конструкции требуют особого контроля и своевременного принятия мер по устранению и торможению роста трещин. Наличие трещин

большой длины может существенно повлиять на состояние пролетных строений, а в некоторых случаях привести к отказу – полной неспособности элемента или конструкции в целом выполнять свои функции (рис. 1).

Большинство исследований процесса трещинообразования в различных металлических конструкциях сводится к определению усталостного ресурса (усталостной долговечности) – времени до образования трещин. Этому посвящено множество работ как российских, так и зарубежных авторов [2–6]. Однако в исследуемых конструкциях наибольший интерес представляет кинетика усталостных трещин – скорость роста, время и количество циклов нагружений с момента образования трещины до некоторой критической длины, после достижения которой рост трещины становится неконтролируемым. Кинетика скорости роста усталостных трещин

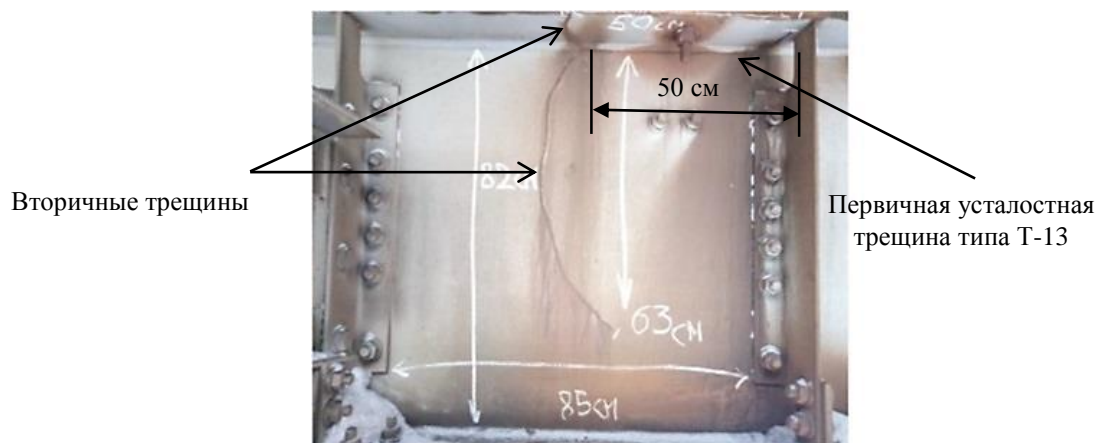


Рис. 1. Трещины в продольной балке пролетного строения моста через р. Тины Красноярской железной дороги [7]

является достаточно сложным и многогранным процессом и зависит от множества параметров: уровня максимальных напряжений, коэффициента асимметрии нагружения, формы конструкции и т. п. [8–14].

П. С. Пэрис и Ф. Эрдоган [13] выразили скорость роста трещины  $dl/dN$  за один цикл нагружения через размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН)  $\Delta K$ :

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n,$$

где  $C$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты, постоянные для материала.

Эта зависимость характерна для второго (прямолинейного) участка стабильного роста на типичной кинетической диаграмме (рис. 2), построенной в двойных логарифмических координатах.

Работа [11] посвящена исследованию скорости роста трещин и определению КИН для металлических крестообразных образцов при двухосном нагружении. В статье [9] также определены КИН и другие параметры скорости роста трещин, в том числе и предельная глубина развития серповидной трещины и соответствующее ей количество циклов, при которой наступает предельное состояние (мгновенное разрушение элемента). В работе [10] исследуются сварные соединения опорных блоков морских стационарных платформ. В результате аналитическим и экспериментальными методами определены необходимые параметры диаграммы роста трещины, в том числе и границы участков диаграммы (пороговый  $K_{th}$  и критический  $K_{1C}$  значения КИН),

зависящие от характеристик материала и дающие более точное представление о диапазоне (продолжительности) стабильного роста трещины.

Важнейшие исследования в области определения КИН для различных конструктивных форм и условий нагружения провела группа японских специалистов, результаты которых вошли в «Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений» под редакцией Ю. Мураками [15].

Параметры скорости роста усталостных трещин могут существенно отличаться друг от друга в зависимости от формы элемента и условий нагружения, поэтому целью настоящей работы являлось определение скорости роста усталостной трещины по типу Т-9.

#### Материалы и методы исследования

Экспериментальные лабораторные исследования скорости роста усталостной трещины по типу Т-9 были предприняты в СибНИИ мостов Сибирского государственного университета путей сообщения в 2021–2022 гг. Для проведения эксперимента ранее был разработан испытательный стенд и подготовлены необходимые образцы [16]. На рис. 3 представлена конструкция испытательного образца, повторяющая узел прикрепления ребер жесткости к стенке балки пролетного строения.

На рис. 4 приведена схема испытательного стенда и общий вид всей конструкции. Лабораторный образец изготовлен из стали 15ХСНД и состоит из металлического листа  $900 \times 360 \times 12$  мм, к которому с обеих сторон с помощью полуавтоматической сварки (катет

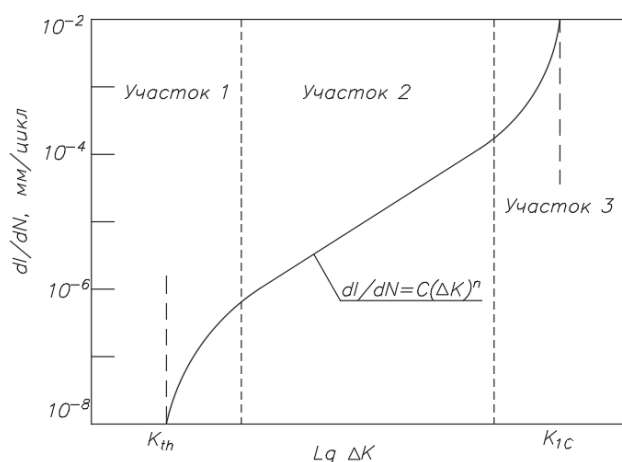


Рис. 2. Типичная кинетическая диаграмма роста трещины

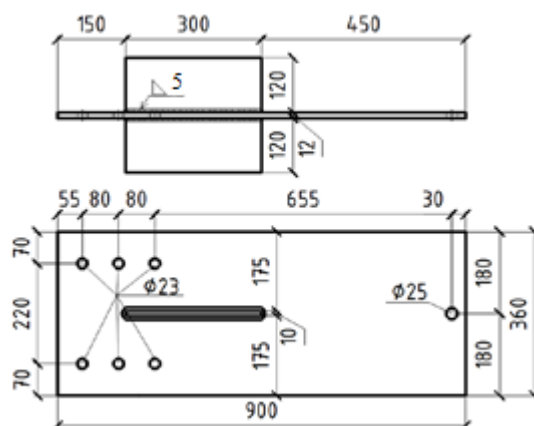


Рис. 3. Конструкция испытательного образца

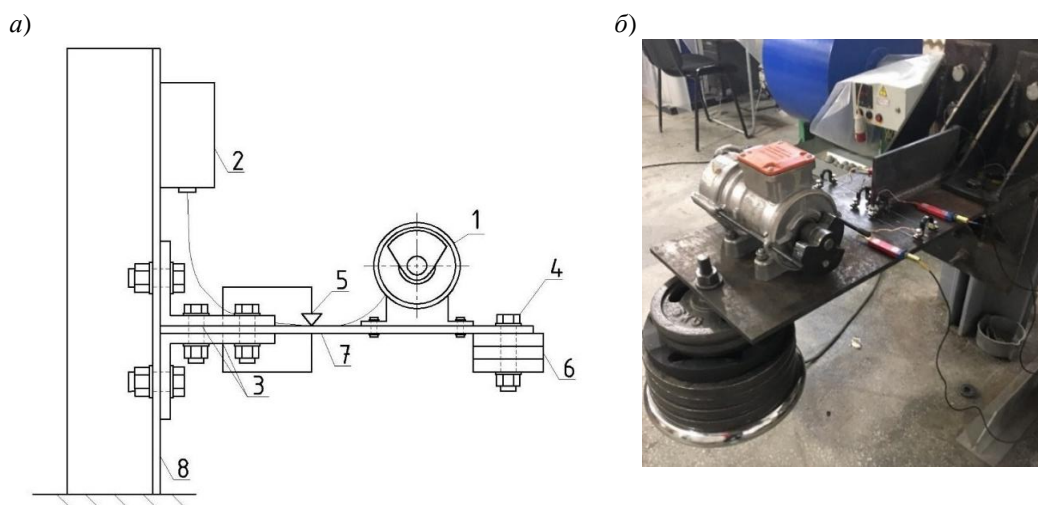


Рис. 4. Конструкция испытательного стенда:  
а – схема; б – общий вид в процессе испытаний

шва 5 мм) приварены ребра жесткости  $300 \times 120 \times 10$  мм, расположенные вдоль продольной оси листа на расстоянии 150 мм от одного из его краев. Для крепления образца к стенду с одного конца предусмотрены отверстия диаметром 23 мм, а на противоположной стороне – одно отверстие диаметром 25 мм для крепления груза.

Образец одним краем крепится к вертикальному листу 8 с помощью уголковых захватов 3 на высокопрочных болтах. На свободном крае листа установлен трехфазный электродинамический вибратор 1, подключенный к частотному преобразователю переменного тока 2. Также на краю листа на высокопрочной шпильке 4 подвешен груз необходимой массы 6. С помощью вибратора возникают изгибные колебания образца. Необходимая частота колебаний регулировалась с по-

мощью частотного преобразователя, а амплитуда колебаний – с помощью массы груза. Подбор частоты и массы груза осуществлялся взаимным изменением их величин с контролем напряжений в зоне развития трещины в горизонтальном листе 7 по верхней грани слева и справа от ребер жесткости на расстоянии 10 мм от ее вершины с помощью тензометрических датчиков типа «Омега» 5 [17] с усилителями преобразования сигнала и измерительной системы «Тензор МС» (рис. 5). Таким образом, были подобраны параметры частоты и массы груза, которые позволяют задать необходимые условия нагружения образца: коэффициент асимметрии  $\rho = 0$ , уровень максимальных и минимальных напряжений  $\sigma_{\max} = 100$  МПа,  $\sigma_{\min} = 0$  МПа, величины которых назначались исходя из опыта эксплуатации реальных конструкций и по результа-



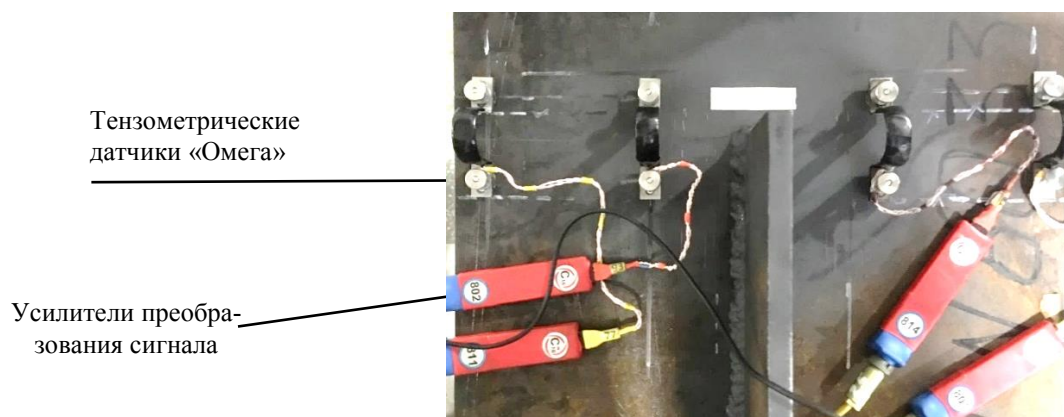


Рис. 5. Расположение датчиков в процессе испытаний

там обследований, проводимых сотрудниками СибНИИ мостов в 2018–2020 гг.

Кинетика роста усталостных трещин была исследована на 16 опытных образцах с общей начальной длиной трещины 30...40 мм, так как при этой длине возможен контроль ее развития. Параметры (частота колебаний и масса груза) устанавливались в начале испытаний и не изменялись в процессе эксперимента. Кроме того, фиксировались длина трещины и

количество циклов нагружения. Контроль положения вершины трещины осуществляли методом капиллярной дефектоскопии (рис. 6), а также дополнительно с помощью тепловизора на основе метода инфракрасной термографии (рис. 7) [18, 19]. При этом методом термографии выявлялась скрытая зона разрушения материала – фактическая вершина. Определив положение вершин, можно точно измерить длину трещины.



Рис. 6. Выявление трещины капиллярным методом

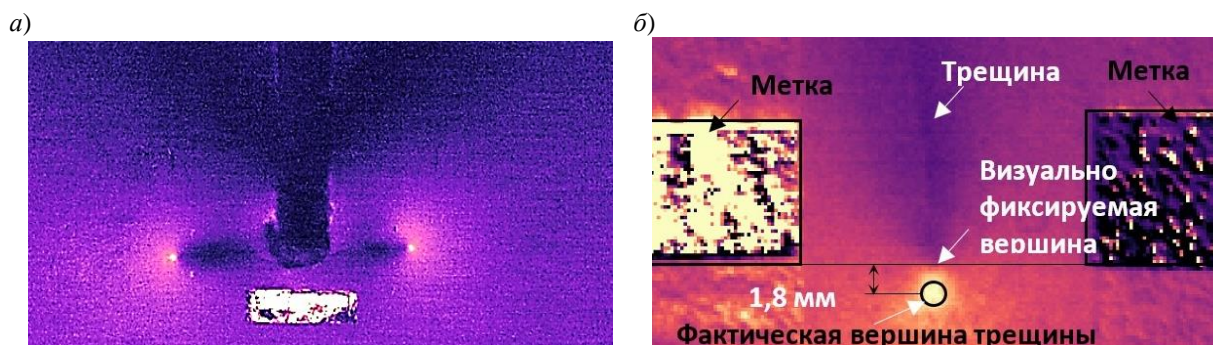


Рис. 7. Выявление вершины трещины методом инфракрасной термографии:

*а* – вид трещины после обработки методом инфракрасной термографии; *б* – увеличенный фрагмент вершины трещины (метка слева – область фактического положения вершины трещины, метка справа – область визуального положения вершины трещины)



### Результаты исследования

Результаты испытаний лабораторных образцов приведены в виде различных аппроксимирующих кривых на рис. 8–10.

Согласно исследованиям П. С. Пэриса [13], скорость роста трещины  $v$  сводится к определению удлинения (подрастания) трещины за один цикл нагружения  $dl/dN$  в соответствии с приведенным выше уравнением. На рис. 9 представлена зависимость скорости роста трещины от количества циклов  $N$ .

Данный график наглядно показывает, что при скоростях  $v = (1,3 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$  мм/цикл трещина растет равномерно с незначительным постепенным увеличением скорости на протяжении 1,6 млн циклов и зависимость условно можно аппроксимировать прямой линией. При достижении указанных скоростей следует говорить о резком увеличении скорости роста и его

неконтролируемом характере. При этом за начальную точку увеличения скорости роста можно принять значение  $v = 1,3 \cdot 10^{-4}$  мм/цикл.

Для более точного определения границы перехода из состояния стабильного роста трещины в нестабильное введен новый параметр – ускорение роста трещины  $a$  как производная от скорости. На графике рис. 10 видно, что на протяжении 1,6 млн циклов при равномерном росте трещины ускорение в среднем равно нулю и резкое увеличение происходит после указанного количества циклов и нарастает лавинообразно. При скорости  $v = 1,3 \cdot 10^{-4}$  мм/цикл ее общая длина в соответствии с графиком на рис. 9 составляет около 160 мм, что позволяет принять эту величину за предельно допустимую для данных элементов, при достижении которой может начаться неконтролируемый рост трещины.

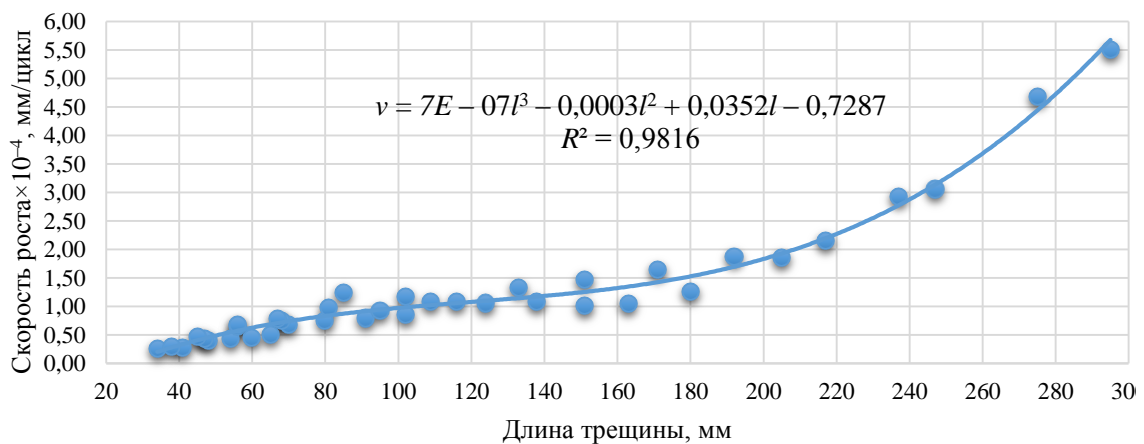


Рис. 8. Зависимость скорости роста трещины от длины

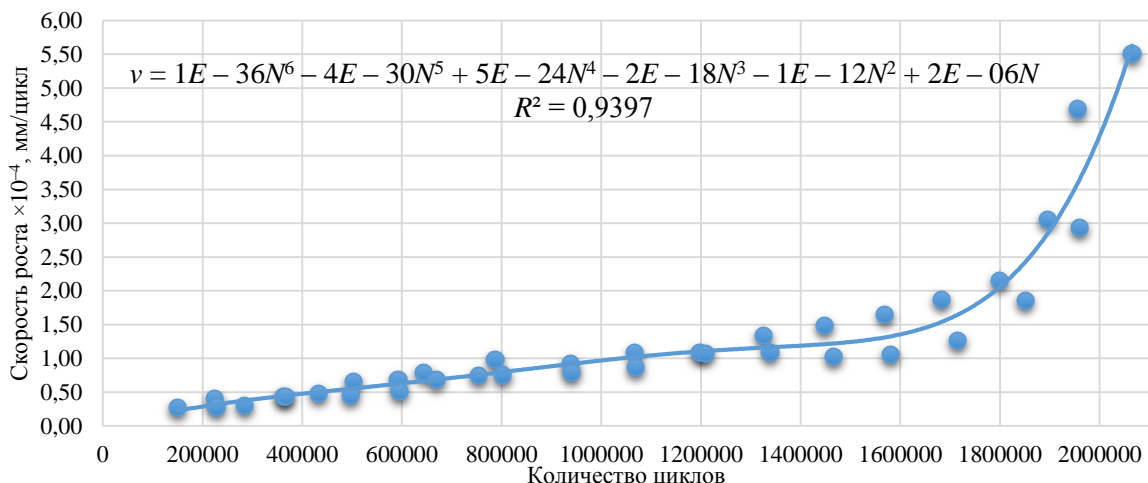


Рис. 9. Зависимость скорости роста трещины от количества циклов

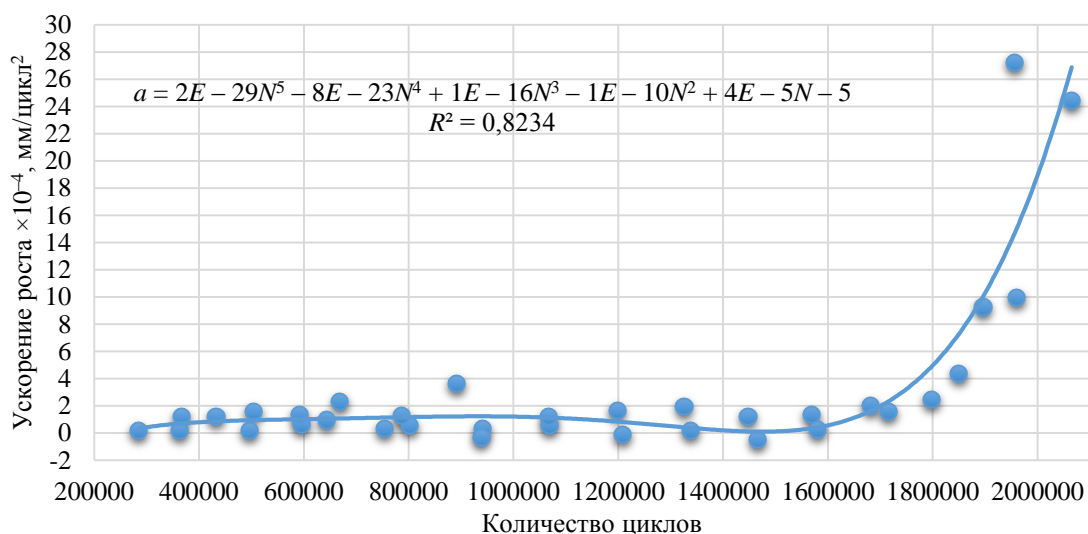


Рис. 10. Зависимость ускорения роста трещины от количества циклов

### Выводы

По результатам проведенных лабораторных исследований скорости роста усталостных трещин в сварных изгибаемых образцах сделаны следующие выводы. Стабильный рост усталостной трещины в исследуемых образцах с постепенным незначительным увеличением скорости роста наблюдается на протяжении 1,6 млн циклов нагружений. При этом величина трещины за этот период меняется с 30 до 160 мм. При длине трещины 160 мм скорость роста составляет  $1,3 \cdot 10^{-4}$  мм/цикл и является граничным усло-

вием, при котором начинается ее ускоренный рост и существенное увеличение скорости роста. Таким образом, критической длиной трещины можно считать величину в 160 мм и при ее наличии следует ограничить нагружение элемента во избежание стремительного роста.

Полученные результаты справедливы для рассматриваемых образцов с ограниченной длиной. При этом длина балок существенно больше, поэтому в дальнейшем значения критических параметров роста трещины необходимо скорректировать.

### Список источников

1. Указания по осмотру и усилению эксплуатируемых сварных пролетных строений / А. С. Гершман, Ю. П. Миролубов, Е. М. Панин [и др.]. Москва : Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта : Главное управление пути Министерство путей сообщения, 1990. 19 с.
2. Жунев К. О. Усталостная долговечность сварных соединений ребер жесткости в пролетных строениях железнодорожных мостов : специальность 2.1.8 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жунев Кирилл Олегович. Новосибирск, 2021. 173 с.
3. Мальгин М. Г. Моделирование выносливости сварных узлов мостов по локальным напряжениям : специальность 05.23.17 «Строительная механика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мальгин Михаил Геннадьевич. Киев, 2015. – 218 с.
4. Мастрейко И. Ю. Оценка остаточного ресурса эксплуатируемых стальных конструкций : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мастрейко Игорь Юрьевич. Казань, 2006. 232 с.
5. Картопольцев В. М., Картопольцев А. В., Колмаков Б. Д. Концептуальные основы оценки остаточного ресурса пролетных строений металлических мостов по критерию усталостной долговечности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 206–211.
6. Летова Т. И., Петин С. В. Оценка усталостной долговечности крестообразных сварных соединений, передающих нагрузку // Инженерно-строительный журнал. 2013. С. 51–78.

7. Усольцев А. М., Попова Е. Г., Маликов М. Ю. Комплексный подход к обеспечению долговечности сварных пролетных строений железнодорожных мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3 (54). С. 72–85.
8. Аистов И. П., Вансович К. А., Крючков А. Н. Исследование скорости роста усталостных трещин в алюминевом сплаве АК6 в зависимости от характеристик напряженного состояния в области их распространения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 2 (40). С. 68–76.
9. Кольцун Ю. И., Хибник Т. А. Методика расчета периода роста усталостной трещины и ее графическое обобщение // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3 (19). С. 124–134.
10. Староконь И. В. Кинетика усталостного трещинообразования основных конструктивных элементов и сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2 (ч. 1). С. 38–46.
11. Вансович К. А. Упругопластическая модель роста усталостных поверхностных трещин при двухосном нагружении : специальность 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Вансович Константин Александрович. Омск, 2018. 287 с.
12. Fisher J. W., Viest I. M. Fatigue life of bridge beams subjected to controlled truck traffic // IABSE congress report. Rio de Janeiro, 1964. P. 497–510.
13. Paris P. C., Erdogan F. Critical Analysis of Crack Propagation Laws // Journal of Basic Engineering; Transaction, American Society of Mechanical Engineers, Series D. 1963. Vol. 85. P. 528–534.
14. Raju I., Newman C. Stress Intensity Factors for Internal and External Surface Crack in Cylindrical Vessels // Journal of Pressure Vessel Technology. 1982. Vol. 104. P. 10–13.
15. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений : перевод с английского / Ю. Ито, Ю. Мураками, Н. Хасебэ [и др.] ; под ред. Ю. Мураками. Москва : Мир, 1990. Т. 1. 448 с. ; Т. 2. 568 с.
16. Патент № 2730555 Российская Федерация, МПК G01M 7/02 (2006.01), G01N 3/32 (2006.01). Установка для механических испытаний образцов листовых материалов на усталость при изгибе : № 2019143048 : заявлено 29.08.2019 : опубликовано 24.08.2020 / Бокарев С. А., Жунев К. О., Соловьев Л. Ю. ; заявитель СГУПС. 8 с.
17. Патент № 2730555 Российская Федерация, МПК G01B 5/30 (2006.01). Датчик деформаций : № 2017100389 : заявлено 09.01.2017 : опубликовано 25.10.2017 / Бардаев П. П., Бокарев С. А., Мурованный Ю. Н. [и др.] ; заявитель СГУПС. 5 с. Сертификат Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии RU.C.27.007.A № 31740.
18. Соловьев Л. Ю., Федоренко В. А. Тепловой метод контроля элементов металлических сварных пролетных строений // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 6. С. 5–8.
19. Соловьев Л. Ю., Федоренко В. А. Усовершенствование метода оценки характеристик усталостных трещин в сварных металлических конструкциях мостов тепловым способом // Дороги и мосты. 2022. № 2 (48). С. 113–139.

## References

1. Gershman A. S., Mirolubov Yu. P., Panin E. M. [et al.]. Guidelines for inspection and reinforcement of operated welded spans. Moscow: Leningrad Institute of Railway Engineers. Main Directorate of the Railway of the Ministry of Railways; 1990. 19 p. (In Russ.).
2. Zhunev K. O. Fatigue life of welded joints of stiffening ribs in the spans of railway bridges. Speciality 2.1.8 Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Zhunev Kirill Olegovich. Novosibirsk. 173 p. (In Russ.).
3. Malgin M. G. Modeling of Endurance of Welded Joints of Bridges by Local Stresses. Speciality 05.23.17 Structural mechanics. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Malgin Mikhail Gennadyevich. Kiev; 2015. 218 p. (In Russ.).
4. Mastreiko I. Yu. Estimation of residual life of operating steel structures. Speciality 05.23.01 Engineering structures, buildings and structures. Dissertation for the Degree of Candidate of Engineering. Igor Yuryevich Mastreiko. Kazan; 2006. 232 p. (In Russ.).
5. Kartopoltsev V. M., Kartopoltsev A. V., Kolmakov B. D. Conceptual Bases for Residual Life Assessment of Metal Bridge Spans by the Fatigue Life Criterion. *Journal of Construction and Architecture*. 2015;(4):206–211. (In Russ.).
6. Letova T. I., Petinov S. V. Assessment of fatigue life of cross-shaped welded joints that transmit the load. *Engineering and Construction Journal*. 2013:51–78. (In Russ.).
7. Usoltsev A. M., Popova E. G., Malikov M. Yu. Complex Approach to Durability of Welded Spanning Structures of Railway Bridges. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(54):72–85. (In Russ.).

8. Aistov I. P., Vansovich K. A., Kryuchkov A. N. Study of the growth rate of fatigue cracks in AK6 aluminum alloy depending on the characteristics of the stress state in the region of their propagation. *Vestnik of Samara State Aerospace University*. 2013;(40):68–76. (In Russ.).
9. Koltsun Y. I., Hibnik T. A. Calculation Method of Fatigue Crack Growth Period and its Graphical Generalization. *Vestnik of Samara State Aerospace University*. 2009;(19):124–134. (In Russ.).
10. Starokon I. V. Fatigue cracking kinetics of basic structural elements and welded joints of bearing blocks of offshore stationary platforms. *Modern problems of science and education*. 2015;2 (Part 1):38–46. (In Russ.).
11. Vansovich K. A. Elastoplastic model of fatigue surface crack growth under biaxial loading. Speciality 01.02.06 Dynamics, strength of machines, instruments and equipment. Dissertation for a Degree of Candidate of Engineering. Vansovich Konstantin Aleksandrovich. Omsk; 2018. 287 c. (In Russ.).
12. Fisher J. W., Viest I. M. Fatigue life of bridge beams subjected to controlled truck traffic. *IABSE congress report*. Rio de Janeiro; 1964. P. 497–510.
13. Paris P. C., Erdogan F. Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *Journal of Basic Engineering; Transaction, American Society of Mechanical Engineers, Series D*. 1963;85:528–534.
14. Raju I., Newman C. Stress Intensity Factors for Internal and External Surface Crack in Cylindrical Vessels. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 1982;104:10–13.
15. Ito Y., Murakami Y., Hasebe N., Yuuki R. [et al.]; Murakami Y., ed. Handbook of Stress Ratios. Translated from English. Moscow: The World; 1990. Vol. 1. 448 p.; Vol. 2. 568 p. (In Russ.).
16. Patent No. 2730555 Russian Federation, IPC G01M 7/02 (2006.01), G01N 3/32 (2006.01). Installation for mechanical testing of sheet materials samples for bending fatigue: No. 2019143048: announced 08.29.2019: published 08.24.2020. Bokarev S. A., Zhunev K. O., Solovyev L. Yu.; Siberian Transport University applicant. 8 p. (In Russ.).
17. Patent No. 2730555 Russian Federation, IPC G01B 5/30 (2006.01). Deformation sensor: No. 2017100389: announced on 01.09.2017: published on 10.25.2017. Bardaev P. P., Bokarev S. A., Murovanny Yu. N. [et al.]; Siberian Transport University applicant. 5 p. Certificate of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology RU.C.27.007.A No. 31740 (In Russ.).
18. Solovyev L. Yu., Fedorenko V. A. Thermal method of metal welded spans elements control. *Track and track facilities*. 2022;(6):5–8. (In Russ.).
19. Solovyev L. Yu., Fedorenko V. A. Improvement of the Method of Fatigue Cracks Assessment in Welded Metal Structures of Bridges by Thermal Method. *Roads and Bridges*. 2022;(48):113–139. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

**М. Ю. Маликов** – инженер СибНИИ мостов Сибирского государственного университета путей сообщения.

**Л. Ю. Соловьев** – доцент кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения, заведующий отделом автоматизированных информационных систем численных методов расчета СибНИИ мостов, кандидат технических наук.

**А. А. Неровных** – доцент кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения, заведующий отделом инновационных методов ремонта и усиления мостов СибНИИ мостов, кандидат технических наук.

### **Information about the authors**

**M. Yu. Malikov** – Engineer, Siberian Research Institute of Bridges, Siberian Transport University.

**L. Yu. Solovyev** – Associate Professor of the Bridge Department, Siberian Transport University, Head of the Department of Automated Information Systems for Numerical Calculation Methods Siberian Research Institute of Bridges, Candidate of Engineering.

**A. A. Nerovnykh** – Associate Professor of the Bridges Department Siberian Transport University, Head of the Department of Innovative Methods of Repair and Strengthening of Bridges Siberian Research Institute of Bridges, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 13.04.2023; одобрена после рецензирования 12.05.2023; принята к публикации 30.05.2023.

The article was submitted 13.04.2023; approved after reviewing 12.05.2023; accepted for publication 30.05.2023.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья  
УДК 625.7/.8  
doi 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_91

### Коэффициенты морозного пучения силикатизированных глинистых грунтов

Денис Алексеевич Разуваев<sup>1✉</sup>, Алексей Леонидович Ланис<sup>2</sup>, Михаил Геннадьевич  
Чахлов<sup>3</sup>, Роман Сергеевич Печенкин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> razdenis@mail.ru✉

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

<sup>3</sup> mik404@mail.ru

<sup>4</sup> 79831232250@ya.ru

**Аннотация.** Для исключения деформаций морозного пучения земляного полотна транспортных сооружений, эксплуатируемых в неблагоприятных климатических и грунтово-гидрологических условиях, нередко прибегают к способам преобразования свойств глинистых грунтов рабочего слоя (активной зоны). Одним из способов такого преобразования является силикатизация – пропитка грунтов раствором силиката натрия, так называемым жидким стеклом, через инъекторы специальной конструкции. При этом вопрос о закономерностях изменения коэффициентов морозного пучения исходных грунтов при силикатизации остается нерешенным. В связи с этим целью исследования является определение зависимости изменения коэффициентов морозного пучения силикатизированного грунта от концентрации раствора силиката натрия и числа пластичности глинистого грунта.

В рамках исследования проведен лабораторный эксперимент. В качестве основной лабораторной установки при реализации эксперимента использовался автоматизированный прибор ГТ 1.1.12. По результатам проведенного исследования с использованием методов статистической обработки данных установлены функциональные зависимости изменения коэффициентов морозного пучения от концентрации раствора и числа пластичности исходного грунта при силикатизации глинистых грунтов, используемых при отсыпке земляного полотна транспортных сооружений.

Полученные результаты исследования позволяют при известном типе грунта эксплуатируемого земляного полотна назначить оптимальную концентрацию раствора силиката натрия и рассчитать другие параметры полной или частичной силикатизации рабочего слоя или активной зоны сооружения (например, при создании капиллярного барьера).

**Ключевые слова:** земляное полотно, морозное пучение, силикатизированный глинистый грунт

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

**Для цитирования:** Коэффициенты морозного пучения силикатизированных глинистых грунтов / Д. А. Разуваев, А. Л. Ланис, М. Г. Чахлов, Р. С. Печенкин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 91–98. DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_91.

## BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

### Frost heaving coefficients of silicified clay soils

Denis A. Razuvaev<sup>1✉</sup>, Alexey L. Lanis<sup>2</sup>, Mikhail G. Chakhlov<sup>3</sup>, Roman S. Pechenkin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> razdenis@mail.ru✉

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

<sup>3</sup> mik404@mail.ru

<sup>4</sup> 79831232250@ya.ru

**Abstract.** To exclude transport structures roadbed frost heave deformations operated in unfavorable climatic and soil-hydrological conditions, methods are often used to transform the clay soils properties of the working layer (core). One of the ways to transform the clay soils properties is silicification - impregnation of soils with a solution

of sodium silicate, the so-called liquid glass, through injectors of a special design. At the same time, the question of the change patterns in the coefficients of initial soils frost heaving during silicification remains unsolved. In this regard, the purpose of the research is to determine the dependence of the change in the coefficients of frost heaving of silicified soil on the concentration of sodium silicate solution and the soil plasticity number.

As part of the research, a laboratory experiment was carried out. The GT 1.1.12 automated device was used as the main laboratory setup for the implementation of the experiment. Based on the results of the research, using statistical data processing methods, the functional dependences of the change in the frost heaving coefficients on the concentration of the solution and soil plasticity number during the silicification of clay soils used for backfilling the subgrade of transport structures were established.

The obtained results of the research allow, with a known type of exploited subgrade soil, to assign the optimal concentration of sodium silicate solution and calculate other parameters of full or partial silicification, for example, when creating a capillary barrier, silicification of the working layer or the active zone of the structure.

**Keywords:** subgrade, frost heaving, silicified clay soil

**Financial Support:** the study was carried out within the framework of the Russian Railways grant for the development of scientific and pedagogical schools in the field of railway transport.

**For citation:** Razuvaev D. A., Lanis A. L., Chakhlov M. G., Pechenkin R. S. Frost heaving coefficients of silicified clay soils. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(65):91–98. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2023\_65\_91.

## Введение

Проблема деформирования земляного полотна транспортных сооружений, эксплуатируемых в неблагоприятных климатических и грунтово-гидрологических условиях, силами морозного пучения является весьма актуальной [1–4]. Нередко для исключения таких деформаций прибегают к различным способам преобразования свойств глинистых грунтов рабочего слоя (активной зоны) земляного полотна. Одним из способов такого преобразования является силикатизация – пропитка грунтов раствором силиката натрия, так называемым жидким стеклом, через инъекторы специальной конструкции [5–8]. При этом инъектирование силиката натрия возможно выполнить на полную мощность рабочего слоя или активной зоны земляного полотна или частично, например при создании капиллярного барьера. В частности, в работах [5–10] авторами обоснован способ создания капиллярного барьера в земляном полотне путем инъекции гидроизолирующих составов.

Разработанный способ [5–10] позволяет перевести «открытую» схему промерзания грунта в «закрытую» за счет прерывания интенсивного криогенного влагопереноса в грунтах земляного полотна, что существенно снижает величину морозного пучения грунтов рабочего слоя земляного полотна. В качестве капиллярного барьера предлагается использовать силикатизированный грунт с коэффициентом морозного пучения не более 1 %. При этом вопрос о закономерности изменения (зависимости) коэффициентов морозного пучения от концентрации раствора и числа пластичности грунтов при силикатизации остается открытым. Решение данной

задачи в первую очередь необходимо для определения оптимальной мощности капиллярного барьера при его проектировании, а также для назначения других технологических параметров силикатизации. Оптимально подобранная мощность капиллярного барьера положительно сказывается как на технической, так и на экономической составляющей любого проектного решения.

## Постановка лабораторного эксперимента

Основной установкой лабораторного эксперимента являлся прибор для определения степени морозного пучения ГТ 1.1.12 (рис. 1). Установка укрупненно состоит из нагрузочного устройства, трех испытательных приспособлений для исследования грунтов, холодильной камеры, электроизмерительной аппаратуры, комплекта датчиков и персонального компьютера с установленным специализированным программным обеспечением. Прибор ГТ 1.1.12 предназначен для определения степени пучинистости образцов грунта по нормативной методике [11]. Ключевыми особенностями прибора являются автоматизированный режим испытаний и контроль температуры на торцах и внутри грунтового образца.

В качестве исходных материалов для лабораторного эксперимента приняты три вида глинистых грунтов (супесь, суглинков легкий, суглинков тяжелый) и водный раствор силиката натрия ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).

Физические характеристики и вид грунтов до силикатизации определены согласно методикам, описанным в [12, 13], и представлены в таблице.



Рис. 1. Общий вид автоматизированного прибора ГТ 1.1.12

#### Физические характеристики исходных грунтов

Грунт	$W_L$ , д.е.	$W_P$ , д.е.	$I_P$	Гранулометрический состав, %, по диаметрам фракции, мм									
				>10	10–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,10	0,10–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	<0,002
Супесь пылевая	0,26	0,21	0,05	0	0	0	0	1	3	10	67	7	12
Суглинок легкий пылеватый	0,30	0,21	0,09	0	0	0	0	0	0	12	60	11	17
Суглинок тяжелый пылеватый	0,33	0,20	0,13	0	0	0	0	0	1	21	51	13	14

Приготовление силикатизированного грунта производилось в лабораторных условиях. Изготовление лабораторных образцов из силикатизированного грунта выполнялось в кольцевой обойме прибора методом послойного трамбования до коэффициента уплотнения 0,95.

Подготовленный образец представлял собой цилиндр силикатизированного грунта диаметром 100 мм, высотой 150 мм внутри кольцевой обоймы прибора. Предварительно перед испытанием готовые образцы выдерживались в воздушно-сухом состоянии в течение суток.

Далее подготовленные образцы помещали в холодильную камеру с подключением всех необходимых датчиков и настройкой температурных условий согласно [11]. Во время эксперимента постоянно осуществлялся контроль за непрерывностью подтока воды к образцу силикатизированного грунта и поддержанием температуры «теплого» и «холодного» торцов образца.

Испытание прекращалось при промораживании образца грунта до глубины, равной

2/3 высоты образца. Фиксирование относительной деформации морозного пучения в момент завершения испытания производилось в автоматическом режиме с помощью датчиков прибора.

#### Проведение лабораторного эксперимента

Лабораторный эксперимент выполнен для каждого из намеченных видов грунта (супесь, суглинок легкий, суглинок тяжелый). Каждый эксперимент состоял из пяти опытов (по три повтора) с различной концентрацией раствора силиката натрия. Дополнительно определены значения относительной деформации морозного пучения для исходных грунтов без силиката натрия.

Последовательность и основные условия проведения лабораторного эксперимента по исследованию зависимости изменения коэффициентов морозного пучения силикатизированных грунтов от концентрации раствора силиката натрия представлены в виде блок-схемы (рис. 2).





Рис. 2. Последовательность лабораторного эксперимента

Последовательность подготовки образцов из силикатизированного грунта для проведе-

ния лабораторного эксперимента представ-лена на рис. 3, 4.

а)



б)



Рис. 3. Приготовление силикатизированного грунта:

а – подготовка раствора силиката натрия требуемой концентрации; б – пропитка исходного грунта раствором силиката натрия



а)



б)



Рис. 4. Подготовленные для проведения эксперимента образцы в приборе ГТ 1.1.12:  
а – общий вид образца в кольцевой обойме прибора; б – образцы силикатизированного грунта с установленными термоизоляцией и датчиками

### Результаты исследования

По результатам проведенных опытов построены графики зависимости величин коэффициентов морозного пучения силикатизированных грунтов от концентрации раствора силиката натрия (рис. 5).

На основании статистической обработки полученных экспериментальных данных построена поверхность зависимости (влияния) коэффициентов морозного пучения силикатизированного грунта от концентрации раствора силиката натрия и числа пластичности исходного грунта (рис. 6).

Результаты лабораторного эксперимента с использованием поверхности влияния позво-

лили определить функциональную зависимость изменения коэффициентов морозного пучения от концентрации раствора и числа пластичности исходного грунта при силикатизации, которая имеет вид:

$$K_{\text{пуч}}^{\text{sal}} = 113,619\rho_{\text{sal}}^2 - 0,0432I_p^2 - 1,905\rho_{\text{sal}}I_p - 262,2476\rho_{\text{sal}} + 3,1633I_p + 147,6782,$$

где  $K_{\text{пуч}}^{\text{sal}}$  – величина коэффициента морозного пучения силикатизированного глинистого грунта при коэффициенте уплотнения 0,95;  $\rho_{\text{sal}}$  – концентрация раствора силиката натрия;  $I_p$  – число пластичности исходного грунта.

а)

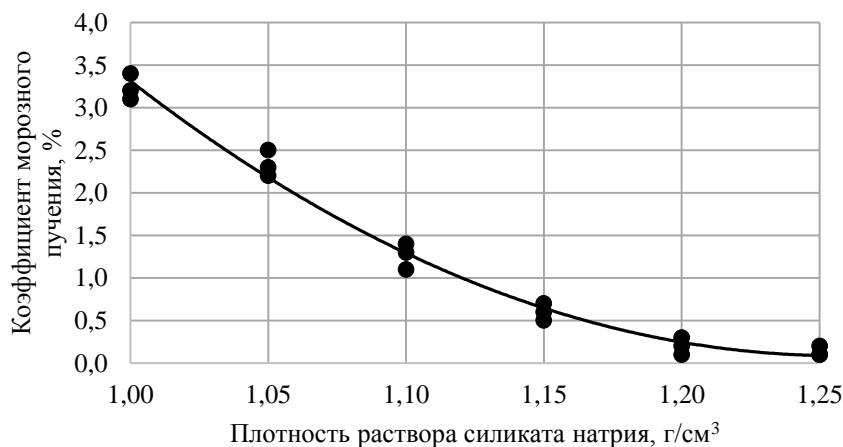
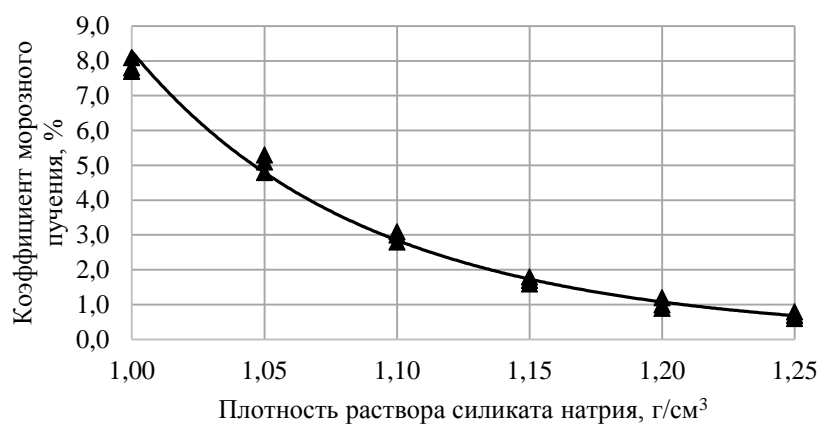


Рис. 5. Экспериментальные данные (начало):  
а – для супеси пылевой ( $I_p = 5$ )

б)



в)

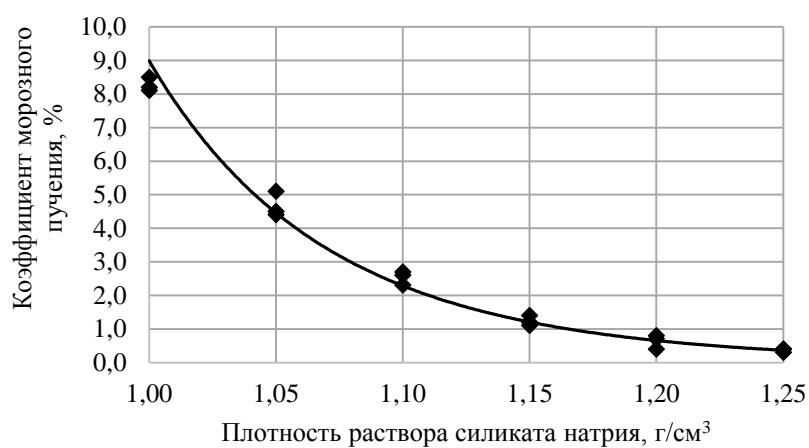


Рис. 5. Экспериментальные данные (окончание):  
б – для суглинка легкого пылеватого ( $I_p = 9$ ); в – для суглинка тяжелого пылеватого ( $I_p = 13$ )

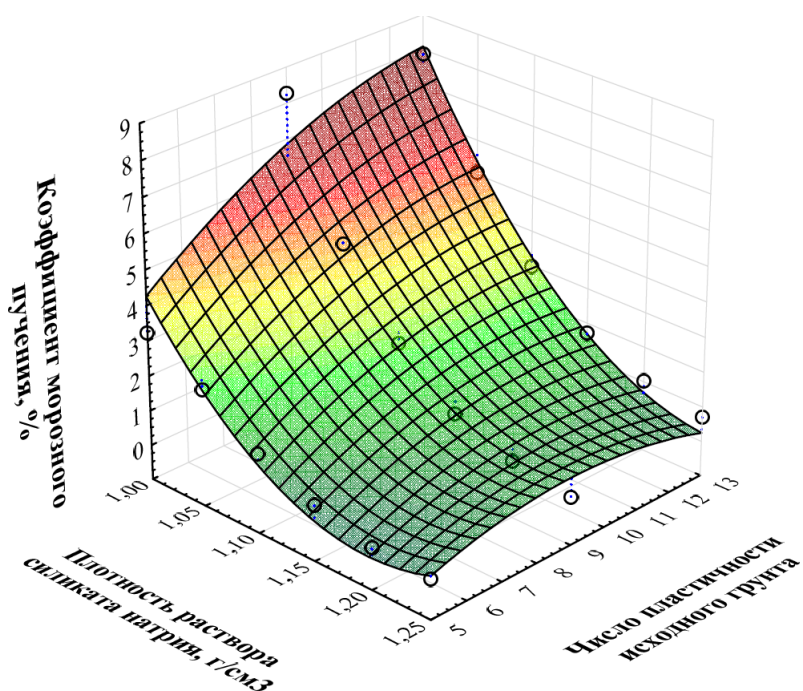


Рис. 6. Поверхность зависимости коэффициентов морозного пучения силикатизированного грунта от концентрации раствора силиката натрия и числа пластичности исходного грунта

### Заключение

По результатам проведенного исследования установлена новая зависимость изменения коэффициентов морозного пучения силикатизированного грунта от концентрации раствора силиката натрия и числа пластичности глинистого грунта.

Полученные результаты исследования позволяют при известном типе грунта эксплуатировать земляного полотна назначить оптимальную концентрацию раствора силиката натрия и рассчитать другие параметры полной или частичной (например, при создании капиллярного барьера) силикатизации рабочего слоя или активной зоны сооружения.

### Список источников

1. Золотарь И. А., Пузаков Н. А., Сиденко В. М. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. Москва : Транспорт, 1971. 416 с.
2. Bronfenbrener L., Bronfenbrener R. Frost heave and phase front instability in freezing soils // *Cold Regions Science and Technology*. 2010. Iss. 64 (1). P. 19–38. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.07.001>.
3. Исаков А. Л., Бухов С. И. К оценке коэффициента морозного пучения глинистых грунтов земляного полотна при закрытой системе промерзания // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 1 (56). С. 92–98. DOI 10.52170/1815-9262\_2021\_56\_92.
4. Experimental study on the volume and strength change of an unsaturated silty clay upon freezing / Zhenya Liu, Jiankun Liu, Xu Li, Jianhong Fang // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 157, January. P. 1–12.
5. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений : актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83\* : с Изменениями № 1, 2, 3, 4. Москва : Стандартинформ, 2017. 228 с.
6. Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation / D. A. Razuvaev, M. G. Chakhlov, V. Y. Soloviova, G. V. Karpachevsky // *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 61. P. 621–626. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.100>.
7. Калачук Т. Г. Химическое закрепление лессовых грунтов силикатизацией // *Новая наука: опыт, традиции, инновации*. 2015. № 4-2. С. 143–147.
8. Усиление грунтов основания фундаментов методом инъекционной силикатизации / А. А. Михайлов, Е. Ю. Евлахова, А. В. Иванова, М. С. Матвеев // *Строительство и архитектура*. 2019. Т. 7, № 1. С. 5–9. DOI 10.29039/article\_5c646f166c48d2.74103573.
9. Razuvaev D. A., Lanis A., Chakhlov M. Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds // *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021. Vol. 13, iss. 5. P. 366–371. DOI 10.3724/SP.J.1226.2021.21029.
10. Обоснование создания капиллярного барьера в земляном полотне путем инъектирования гидроизолирующих составов / Д. А. Разуваев, А. Л. Ланис, М. Г. Чахлов, Ю. А. Цибариус // *Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : XVIII Международная научно-техническая конференция (г. Москва, 27–28 октября 2021 г.) : чтения, посвященные памяти профессора Г. М. Шахунянца : труды / ОАО «Российские железные дороги» ; Российский университет транспорта (МИИТ). Москва, 2021. 216 с.*
11. ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости : с Поправкой, с Изменением № 1. Москва : Стандартинформ, 2019. 8 с.
12. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Москва : Стандартинформ, 2019. 20 с.
13. ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Москва : Стандартинформ, 2019. 20 с.

### References

1. Zolotar I. A., Puzakov N. A., Sidenko V. M. Water-thermal regime of subgrade and pavement. Moscow: Transport; 1971. 416 p. (In Russ.).
2. Bronfenbrener L., Bronfenbrener R., 2010. Frost heave and phase front instability in freezing soils. *Cold Regions Science and Technology*. 2010;64(1):19–38. DOI <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.07.001>.
3. Isakov A. L., Bukhov S. I. To the Estimation of the Frost Heave Ratio of Clay Soils of the Subgrade with a Closed Freezing System. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(56):92–98. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9262\_2021\_56\_92.

4. Liu Zhenya, Liu Jiankun, Li Xu, Fang Jianhong. Experimental study on the volume and strength change of an unsaturated silty clay upon freezing. *Cold Regions Science and Technology*. 2019;157(January):1–12.
5. SP 22.13330.2016 Foundations of buildings and structures. Updated edition of SNiP 2.02.01–83\*: with Amendments no. 1, 2, 3, 4. Moscow: Standartinform; 2017. 228 p. (In Russ.).
6. Razuvaev D. A., Chakhlov M. G., Soloviova V. Yu., Karpachevsky G. V. Injection Compositions for Creating Impervious Screen for Roadbed Foundation. *Transportation Research Procedia*. 2022;61:621–626. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.100>.
7. Kalachuk T. G. Chemical fixation of loess soils by silicification. *New Science: Experience, Traditions, Innovations*. 2015;(4-2):143–147. (In Russ.).
8. Mikhailov A. A., Evlakhova E. Yu., Ivanova A. V., Matveev M. S. Strengthening of foundation soils by injection silicification. *Construction and Architecture*. 2019;7(1):5–9. (In Russ.). DOI 10.29039/article\_5c646f166c48d2.74103573.
9. Razuvaev D. A., Lanis A. L., Chakhlov M. G. Rationale for creation of capillary breaking layers in cold regions subgrade by pressure injection of waterproofing compounds. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021;13(5):366–371. DOI 10.3724/SP.J.1226.2021.21029.
10. Razuvaev D. A., Lanis A. L., Chakhlov M. G., Tsibarius Yu. A. Substantiation of the capillary barrier creation in the subgrade by injecting waterproofing compounds. *Modern Problems of Design, Construction and Operation of the Railway Track: XVIII International Scientific and Technical Conference (Moscow, October 27–28, 2021); Readings Dedicated to the Memory of Professor G. M. Shakhunyan. Proceedings*. Russian Railways; Russian University of Transport. Moscow; 2021. 216 p. (In Russ.).
11. GOST 28622–2012. Soils. Method for laboratory determination of heaving degree: with Amendment, with Change no. 1. Moscow: Standartinform; 2019. 8 p. (In Russ.).
12. GOST 5180–2015. Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics. Moscow: Standartinform; 2019. 20 p. (In Russ.).
13. GOST 12536–2014. Soils. Methods for laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition. Moscow: Standartinform; 2019. 20 p. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

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

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

**М. Г. Чахлов** – аспирант кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог», научный сотрудник Сибирского государственного университета путей сообщения.

**Р. С. Печенкин** – инженер Сибирского государственного университета путей сообщения.

### **Information about the authors**

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

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

**M. G. Chakhlov** – Postgraduate of the Research, Design and Construction of Railways and Highways Department, Researcher, Siberian Transport University.

**R. S. Pechenkin** – Engineer, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 05.06.2023; принята к публикации 06.06.2023.

The article was submitted 28.03.2023; approved after reviewing 05.06.2023; accepted for publication 06.06.2023.

## Информация для авторов

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.

2. Статья предоставляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (гарнитура Times New Roman, кегль 14 pt; поля: верхнее и нижнее – 20, левое – 30, правое – 10 мм). Файл с текстом статьи должен быть назван фамилией автора (например: Иванов.doc).

3. Статья должна содержать:

- тип статьи (например, научная, обзорная, рецензия);
- УДК;
- название статьи;
- фамилию, имя и отчество каждого автора, место его работы/учебы, город, страну, ученую степень, звание, должность;
- аннотацию на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- библиографический список на русском и английском языках.

4. Список источников составляется в порядке упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Список должен содержать не менее 10 источников, из них собственных статей должно быть не более 30 %.

5. Графический материал должен быть выполнен в графических редакторах, поддерживающих векторную и растровую графику. Иллюстрации должны быть четкими, все подписи на рисунке должны хорошо читаться и иметь расшифровку. Если в тексте есть фотография, отсканированный рисунок, то они обязательно должны быть представлены также отдельным файлом в исходном графическом формате (например: jpeg, tiff).

6. Статья для опубликования в журнале и заявка отправляются по адресу: [vestnik.stu@yandex.ru](mailto:vestnik.stu@yandex.ru).

7. В редакцию предоставляются оригиналы документов: экспертное заключение о возможности опубликования статьи, статья и заявка.

8. Публикация статей в журнале бесплатная.

Более подробную информацию по вопросам опубликования статей и размещения другой информации в журнале можно найти на сайте издания.



[www.stu.ru/science](http://www.stu.ru/science)



[vestnik.stu@yandex.ru](mailto:vestnik.stu@yandex.ru)



+7 383 328-04-36



630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук,  
191, корп. 3, комн. 307



Главный редактор *А. Л. Манаков*  
Заместитель главного редактора *А. Д. Абрамов*  
Заместитель главного редактора *С. В. Карасев*  
Ответственный секретарь *М. С. Галай*  
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*  
Редакторы: *Е. Е. Рыжкова, А. О. Елесина, Ю. В. Печенкина*  
Корректор *А. А. Игумнов*  
Макет, верстка *Ю. В. Борцовой*  
Дизайн обложки *А. С. Петренко*

Учредитель  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

Адрес редакции  
630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, корп. 3, комн. 307.  
Телефон/факс: (383) 328-04-36.  
E-mail: [vestniksgups@sibgups.ru](mailto:vestniksgups@sibgups.ru)

Адрес издателя  
630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.  
Телефон/факс: (383) 328-03-81.  
E-mail: [bvu@stu.ru](mailto:bvu@stu.ru)

Подписано в печать 26.06.2023. Дата выхода в свет 26.06.2023  
Тираж 350 экз. Формат 60×84/8  
Объем 11,7 уч.-изд. л., 12,5 усл.-печ. л. Заказ № 3830

Цена свободная

Отпечатано в издательстве СГУПС.  
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191  
Тел. (383) 328-03-81; e-mail: [bvu@stu.ru](mailto:bvu@stu.ru)





Издательство Сибирского государственного  
университета путей сообщения

ISSN 1815-9265  
Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения  
2023. № 2 (65). 1–100