

УЧРЕДИТЕЛЬ:

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Состав редколлегии

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Заместитель главного редактора

Ильиных Андрей Степанович – д-р 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редактор перевода текста на английский язык

Степачкова Ирина Игоревна – старший преподаватель

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

Корректор Б. В. Устинов – канд. техн. наук

Макет, верстка Ю. В. Борцовой

Дизайн обложки А. С. Петренко

Сайт журнала:

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

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

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

FOUNDER

The Siberian Transport University

Editors and Editorial Board*Editor-in-Chief*

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

Deputy Editor

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

Deputy Editor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

K. A. Chernyi, 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

Managing Editor B. V. Ustinov, Candidate of Engineering

Layout Designer Yu. V. Bortsova

Cover Desinger 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: vestnik.stu@yandex.ru

The journal was registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media in 2021.

ISSN: 1815-9265

**Вестник
Сибирского государственного
университета путей сообщения**

Научно-теоретический
журнал

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

№ 1 (60) · 2022 · ЯНВАРЬ – МАРТ · 16+

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

СОДЕРЖАНИЕ

Транспорт

Дубровская Т. А. Выбор оптимального решения по повышению скоростей движения поездов с помощью математического модуля для автоматизации расчетов.....	5
Джахаяева С. Б., Климова Е. В. Причины загрязнения экосистемы города Астрахани выбросами автомобильного транспорта и пути его снижения	13
Щепотин Г. К. Допустимое морозное пучение подшпального основания с учетом весеннего оттаивания пути для модернизации восточного полигона	21
Витолин С. В., Лукьянсков А. М. Решение дорожно-транспортных проблем городов России на примере города Волгограда.....	29
Числов О. Н., Ильин А. М. Совершенствование методологических и технико-технологических решений по закреплению перспективных видов подвижного состава на станционных железнодорожных путях	38
Бондаренко Е. М., Гладунов В. А. Анализ влияния технологии доставки сборных грузов из Китая в Западную Сибирь на частоту использования различных видов транспорта	49
Чусовитин М. С. Расчет прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале с учетом износа древесины	58
Грефенштейн А. П. Обоснование целесообразности создания распределительного центра в условиях взаимодействия разных видов транспорта	68
Сидоров Э. С. Совершенствование производственного процесса термитной сварки рельсов	76

Строительство и архитектура

Брагарь Е. П., Рачков Д. В., Пронозин Я. А. Риски использования пылеватых песков в качестве искусственных оснований	86
Шишкин Е. А., Смоляков А. А. Повышение эффективности уплотнения асфальтобетонной смеси гладковальцовым катком.....	95
Александров А. С., Семенова Т. В. Метод расчета предельной глубины колеи для безопасного движения	104
Астахов Ю. В., Пичкурова Н. С. Численное моделирование взаимодействия стеклопластикового анкера с бетоном	117
Кунц К. Л., Ким И. Л. Характер проявления аварийных утечек воды из подземных трубопроводов	124
Воробьев В. С., Сидоренко И. Л. Крупнопанельное домостроение: историческая необходимость и перспективная технология строительной отрасли.....	130

The Siberian Transport University Bulletin

A scientific journal

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)"

Nº 1 (60), 2022 January – March 16+

Issued quarterly. Established in 1999

CONTENTS

Transport

T. A. Dubrovskaya. Choosing the optimal solution to increase train speeds using mathematical modeling.....	5
S. B. Dzhakhyaeva, E. V. Klimova. Pollution problem of the Astrakhan region ecosystem by emissions from road transport and ways to reduce it.....	13
G. K. Shchepotin. Permissible frost heaving of the sleeper base, taking into account the spring thawing of the track during the modernization of the eastern polygon.....	21
S. V. Vitolin, A. M. Lukyanskov. Solution to traffic problems of Russian cities using the example of Volgograd	29
O. N. Chislov, A. M. Ilyin. Improvement of methodological and technico-technological solutions for fixing promising types of rolling stock on station railway tracks	38
E. M. Bondarenko, V. A. Gladunov. Impact analysis of the groupage cargo delivery technology from China to Western Siberia by various modes of transport.....	49
M. S. Chusovitin. Calculation of rail plate deflections on a wooden sleeper, taking into account the wear of wood.....	58
A. P. Grefenshteyn. Justification of urban consolidation centre expediency with interaction transport modes	68
E. S. Sidorov. Improving the technology of thermite rail welding.....	76

Building and Architecture

E. P. Bragar, D. V. Rachkov, Ya. A. Pronozin. Risks of using artificial sand base in difficult geotechnical conditions.....	86
E. A. Shishkin, A. A. Smolyakov. Improving the efficiency of the asphalt concrete mixture compaction with a smooth drum roller	95
A. S. Aleksandrov, T. V. Semenova. Method for calculating the limit rut depth for safe traffic	104
Yu. V. Astakhov, N. S. Pichkurova. Numerical simulation of the interaction of a fiberglass anchor with concrete	117
K. L. Kunts, I. L. Kim. The nature of the manifestation of emergency water leaks from underground pipelines	124
V. S. Vorobyov, I. L. Sidorenko. Large-panel housing construction: historical necessity and advanced technology of the construction industry	130

ТРАНСПОРТ

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 5–12.
The Siberian Transport University Bulletin. 2022. No. 1 (60). P. 5–12.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.21

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_5

Выбор оптимального решения по повышению скоростей движения поездов с помощью математического модуля для автоматизации расчетов

Татьяна Алексеевна Дубровская

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Россия, rt-555@yandex.ru

Аннотация. Повысить скорости движения поездов на существующих железнодорожных линиях возможно за счет проведения реконструктивных мероприятий. К таким мероприятиям относятся: электрификация, строительство дополнительного пути, модернизация средств связи, удлинение приемо-отправочных путей, использование двухпутных вставок на перегоне, ввод нового подвижного состава.

Реконструктивные мероприятия для повышения скоростей движения на железной дороге проектируются так, чтобы были обеспечены безопасность и бесперебойность движения поездов, сократилось время нахождения пассажиров в пути при обеспечении потребных размеров перевозок и наименьших строительно-эксплуатационных затратах. Выбрать оптимальный способ решения задачи проектирования реконструкции железной дороги можно с использованием программ математического моделирования.

Необходимость принятия решений, для которых не полностью учтены предопределяющие их условия, а также последующее их влияние, встречается во всех областях техники и, в частности, на железных дорогах.

В статье предложен метод выбора реконструктивных мероприятий с помощью системы поддержки принятия решений. Это компьютерная система, предназначенная для анализа и выбора решений на основе объективных данных и субъективных суждений лица, принимающего решения. Суть программы заключается в вводе списка возможных вариантов решения и указании критериев для сравнения альтернатив. Далее для каждого критерия указывается его тип и вес (оценка важности критерия). Вводятся требования ко всем предложенным вариантам и производится расчет обобщенной оценки каждой альтернативы с учетом всех критериев и правил. Последним этапом будет выбор оптимального варианта для проведения реконструкции на данном участке.

Ключевые слова: железная дорога, реконструкция, система принятия решений, скорость, критерии, подвижной состав

Для цитирования: Дубровская Т. А. Выбор оптимального решения по повышению скоростей движения поездов с помощью математического модуля для автоматизации расчетов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 5–12. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_5.

TRANSPORT

Original article

Choosing the optimal solution to increase train speeds using mathematical modeling

Tatyana A. Dubrovskaya

Belarusian State University of Transport, Gomel, Russia, rt-555@yandex.ru

Abstract. It is possible to increase the speed of trains on existing railway lines by carrying out reconstruction measures. Such measures may include: electrification, construction of an additional track, modernization of communication facilities, extension of the receiving and sending lines, and the use of inserts on the stage, the introduction of new rolling stock.

Reconstructive measures to increase the speed of movement on the railway should be designed in such a way that the safety and continuity of train traffic are ensured, the time of passengers on the road is reduced, while

ensuring the required transport sizes and the lowest construction and operating costs. To choose the optimal solution to the tasks of designing the reconstruction of the railway is carried out on the basis of mathematical modeling.

The need to make decisions that do not fully take into account the conditions that determine them, as well as their subsequent impact, is found in all areas of technology, in particular when introducing high-speed traffic on railways. The article proposes a method for solving this problem using a decision support system. It is a computer system designed to analyze and select decisions based on objective data and subjective judgments of the decision maker.

The essence of the program is to enter a list of possible solutions and specify criteria for comparing alternatives. Next, for each criterion, its type and weight are specified (the evaluation of the importance of the criterion). The requirements for all the proposed options are introduced and a generalized evaluation of each alternative is calculated, taking into account all the criteria and rules. The last step will be to choose the best option for the reconstruction at this site.

Keywords: railway, reconstruction, decision-making system, speed, criteria, rolling stock

For citation: Dubrovskaya T. A. Choosing the optimal solution to increase train speeds using mathematical modeling. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2022;(60):5–12. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_5.

Введение

На сегодняшний день Белорусской железной дорогой ведется целенаправленная работа по повышению установленных скоростей движения грузовых и пассажирских поездов, а именно:

- восстановительный ремонт пути, предусматривающий замену рельсошпальной решетки;
- перерасчет отдельных геометрических параметров кривых участков пути (величины возвышения наружного рельса, длины переходных кривых) с целью максимального сокращения величины непогашенного ускорения и уклона отвода возвышения наружного рельса с учетом соответствия установленным требованиям нормативных документов [1, 2];
- строительство путепроводов, сокращающее количество железнодорожных переездов;
- проектирование устройства подземных пешеходных переходов на станциях, где запланирована реконструкция вокзального комплекса, для сокращения количества мест пересечения гражданами железнодорожных путей;
- укладка стрелочных переводов, конструкция которых состоит в соединении их частей при помощи метода промежуточного литья с рельсовыми пiletами бесстыкового пути, для обеспечения плавности хода в горловинах железнодорожных станций;
- увеличение протяженности прилегающих к железнодорожным переездам блок-участков рельсовых цепей для обеспечения заблаговременного оповещения водителей автомобильных средств о приближении скоростных пассажирских поездов.

Серьезным вопросом повышения скоростей движения поездов является выбор варианта переустройства линии. Требования, предъявляемые к линии при проектировании для организации скоростного движения, являются противоречивыми (требования снижения времени хода поездов и требования снижения затрат на переустройства). Наличие этих противоречий приводит к необходимости поиска компромиссов.

Цель исследования

Основная цель организации скоростного движения на стадии проектирования состоит в том, чтобы предоставить полную информацию для принятия решения по необходимому сокращению времени хода и капитальным затратам [3] и обосновать выбор того или иного варианта проектирования, при том, что лицо, принимающее решение (ЛПР), имеет свои субъективные взгляды на выбор варианта.

Задачи исследования

Организация скоростного движения предполагает разработку мероприятий по реконструкции дороги с максимальным сокращением времени хода и необходимыми для этого капитальными затратами. Постановка задач оптимизации организации скоростного движения состоит в следующем [4]:

- при заданных уровнях ограничений скорости и сокращения времени хода разработать систему скоростного движения с минимальными капитальными затратами;
- при заданных минимальных капитальных вложениях построить систему скоростного движения с максимальным сокращением времени хода.

На выбор того или иного варианта оказывает влияние множество факторов: имеющиеся инвестиции, дотации государства, объемы и сроки работ, возможности производства тех или иных работ, взгляд на проблему ЛПР и т. д. [5].

Из предложенных вариантов повышения скоростей движения поездов на существующих линиях несколько вариантов могут иметь практически одинаковую стоимость реализации, одинаковые сроки строительства и другое, и только ответственное лицо может принять для реализации один из предложенных вариантов [6, 7].

Используемые методы

В таком случае автором статьи предлагается выбор оптимального варианта осуществлять с помощью программы СППР LIGHTYEAR.

СППР LIGHTYEAR – компьютерная система, предназначенная для анализа и выбора решений на основе объективных данных и субъективных суждений лица, принимающего решение [8]. Новизна программы заключается в том, что позволяет выполнять оценку и сравнение альтернатив с учетом как объективных данных (т. е. оценок альтернатив по критериям), так и субъективных суждений ЛПР. Механизм принятия решений в СППР LIGHTYEAR состоит из нескольких оценок альтернатив, описанных ниже.

1. Оценка альтернатив по числовым критериям производится по следующим формулам:

– для критериев, подлежащих максимизации,

$$M = W [(X - D_{DL}) / (D_{MD} - D_{LD})];$$

– для критериев, подлежащих минимизации,

$$M = W [1 - (X - D_{MD}) / (D_{LD} - D_{MD})],$$

где W – вес критерия; X – оценка альтернативы по числовому критерию; D_{MD} , D_{LD} – наиболее и наименее желательное значение критерия соответственно.

Происходит перевод отдельных критериев в меры полезности. Оценки альтернатив по критериям различаются по размерности (измеряются в разных единицах), по направленности (некоторые критерии минимизируются, некоторые приводятся к максимуму), по диапазону значений. Меры полезности – безразмерные величины. Чем ближе оценка альтернативы к наиболее желательному значению,

тем больше мера полезности. Поэтому для всех критериев мера полезности чем больше, тем лучше. Максимальное значение меры полезности равно весу критерия, а минимальное значение меры полезности равно нулю. Все это позволяет суммировать меры полезности по отдельным критериям, чтобы получить обобщенные оценки альтернатив.

2. Оценка альтернатив по вербальным критериям находится по формуле

$$M = W(X / 100),$$

где X – оценка альтернативы по вербальному критерию.

Таким образом, вербальные оценки альтернатив преобразуются в числовые оценки – меры полезности. Чем лучше вербальная оценка (чем больше ее вес), тем больше мера полезности. Наилучшая мера полезности принята 100, наихудшая – 0.

3. Оценка альтернатив по графическим критериям определяется по формуле

$$M = W(X / 100),$$

где X – оценка альтернативы по графическому критерию.

Оценка альтернативы по графическому критерию задается с помощью отметки на шкале. Положение отметки у левой границы (наименее желательное значение) соответствует значению 0, у правой границы (наиболее желательное значение) – 100 %. Таким образом, величина X определяется из диапазона от 0 до 100 % пропорционально положению отметки на шкале.

4. Обобщенная оценка альтернатив в СППР LIGHTYEAR рассчитывается как сумма мер полезности по всем критериям и правилам. Чем больше обобщенная оценка, тем лучше альтернатива.

Основные этапы постановки и решения проблемы с применением СППР LIGHTYEAR состоят в следующем:

– ввод перечня вероятных вариантов решения;

– указание критериев для сравнения альтернатив (для каждого аспекта указывается его тип (числовой, вербальный либо графический) и вес (анализ значимости аспекта));

– ввод оценок альтернатив согласно любому аспекту, а также указание наиболее желательной и наименее желательной оценок согласно любому критерию;

- ввод условий к альтернативам в виде правил;
- расчет общего балла каждого варианта с учетом абсолютно всех критериев и правил;
- детальное исследование оценок альтернатив либо попарное сопоставление альтернатив согласно любому аспекту и каждому правилу (если это необходимо);
- выбор наилучшего варианта.

К количеству индивидуальных мнений, т. е. мнений лица, принимающего решение, принадлежат: оценки значимости аспектов (веса); требования к предлагаемым альтернативам, проявленные в виде наиболее желательных и наименее желательных оценок, согласно аспектам; оценки согласно вербальным и графическим критериям; требования к кандидатурам, выраженные в виде правил.

Оценки альтернатив выводятся на дисплей как в числовой, так и в графической форме (в виде диаграмм).

При вводе оценок по графическому критерию на экране появляются шкалы (для каждой альтернативы – своя шкала). Левая граница шкалы соответствует наименее желательной оценке по данному критерию, правая граница – наиболее желательной оценке. Оценка альтернативы указывается символом X , перемещаемым по шкале.

При вводе оценок согласно числовому критерию на экране возникают две таблицы: для ввода оценок альтернатив согласно данному критерию и для ввода диапазона. Сначала определяется спектр оценок: наиболее желательная оценка и наименее желательная.

По умолчанию данные оценки имеют значения 100 и 0 (соответственно), но данный спектр обычно не соответствует используемым оценкам, поэтому его необходимо менять. Эти оценки считаются индивидуальными, они выражают условия к решению, предъявляемые специалистом.

При вводе оценок альтернатив согласно числовым критериям предусматривают следующее:

- для критериев, подлежащих максимизации, наиболее желательная оценка обязана превышать наименее желательную, для критериев, подлежащих минимизации, – наоборот;

– наиболее желательная и наименее желательная оценки – это субъективные предположения о том, какие оценки желательны, а какие нежелательны, они назначаются исходя из опыта специалиста, из имеющихся в задаче ограничений, эти величины не то же самое, что наилучшая или наихудшая из оценок имеющихся альтернатив;

– ввод оценок, не входящих в установленный спектр значений, невозможен.

В СППР LIGHTYEAR применяются элементарные и продукционные правила. Помимо этого, элементарные и продукционные правила представляют собой ограничения (неотъемлемые условия) либо советы (желательные условия).

Для принятия окончательного решения применяется анализ по всем критериям и правилам. При этом выводится перечень альтернатив в режиме ранжирования. Для каждой альтернативы указывается ее место в ранжировании и обобщенная оценка, рассчитанная с учетом всех критериев и правил. По совокупности всех правил и решений принимается наиболее оптимальный вариант.

Применение программного модуля

Рассмотрим использование программы СППР LIGHTYEAR применительно к выбору мероприятий по повышению установленных скоростей движения поездов на Белорусской железной дороге.

Железнодорожная линия в данном случае рассматривается как сложная система, элементами которой являются участки дороги. Деление линии на участки диктуется стадией проектирования и степенью точности исходных данных. Каждый участок рассматривается как независимый элемент системы.

Выбор оптимального варианта повышения скоростей движения поездов в программе СППР LIGHTYEAR начинается с ввода перечня критериев, по которым происходит отбор. Обязательно указываются оценки альтернатив согласно любому из критериев.

В зависимости от уровней ограничения скорости по отдельным устройствам к возможным вариантам повышения скоростей движения поездов на существующих линиях [9, 10] можно отнести следующие:

- электрификация – позволяет повысить скорости движения поездов за счет использования электрической тяги и электровозов;
- строительство третьего (нового) пути – при смешанном пассажирском и грузовом движении позволяет вынести скоростное пассажирское движение на отдельный путь;
- модернизация средств связи – позволяет обеспечить безопасность на переездах, что особенно актуально при повышении скоростей движения поездов;
- удлинение приемо-отправочных путей – дает дополнительную возможность увеличения весовой нормы поездов (формирование поезда с большим числом вагонов) с целью ускорения пропуска транзитного вагонопотока по Белорусской железной дороге и увеличения маршрутной скорости;
- ввод нового подвижного состава – позволяет увеличить скорость прохождения пути без проведения сложных реконструктивных мероприятий (например, использование подвижного состава с наклоном кузова Talgo, Pendolino).

На рис. 1 представлен перечень возможных альтернатив выбора оптимального варианта повышения скоростей движения.

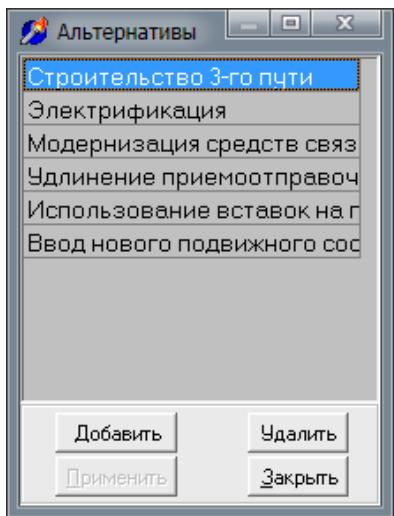


Рис. 1. Введение перечня альтернатив (вероятных вариантов решения)

При выборе оптимального мероприятия для увеличения скорости движения поездов на существующей железной дороге учитываются:

- период исполнения, цена;
- затрачиваемые человеческие ресурсы;
- результативность.

Вариант повышения скоростей движения поездов на существующих линиях должен иметь максимально короткие сроки исполнения и минимальную цену реализации, так как долгосрочные проекты в современных условиях инфляции, различных кризисов и, вместе с тем, роста научно-технического и интеллектуального прогресса неуместны. Сделать быстро – это значит обеспечить улучшение транспортных связей, привлечь на железнодорожный транспорт дополнительный пассажиропоток с авиационного и автомобильного, сократить убыточность пассажирских перевозок. Все эти показатели должны быть минимальными при требуемой эффективности решения. Человеческие ресурсы – это капитал, который надо эффективно использовать, т. е. даже автоматизированные операции должны выполнять квалифицированные кадры, которые могут генерировать мысли, идеи, направленные на решение данного вопроса. Результативность показывает решение поставленной задачи.

Для рассматриваемого примера к критериям, по которым будет производиться оценка каждого варианта, можно отнести: время выполнения работ, эффективность, затрачиваемые человеческие ресурсы, стоимость, новизна и экологичность. При этом для любого критерия указывается его наименование, вид и масса. Масса критерия – целое число из диапазона от 0 до 100. Вес критерия отражает его важность: чем важнее критерий, тем больший вес назначается данному критерию. В рассматриваемом примере применялся только графический и числовой типы критерия. Вес критерия в данном случае распределен по важности, т. е. более важный критерий имеет больший вес. В задаче время обычно отражает сроки выполнения, которые нельзя нарушать (вес 48 единиц), а стоимость – ограничение в денежных средствах (вес 29 единиц) (рис. 2).

Следующим этапом в выборе оптимального варианта в программе СППР LIGHTYEAR является оценка по графическому критерию. Так, в нашем случае, лицо, принимающее решение, считает, что самым выгодным и быстрым вариантом будет ввод нового подвижного состава, тогда как строительство третьего пути

является самым «неудобным», долгим и дорогостоящим мероприятием (рис. 3).

Далее производится ввод оценок согласно числовому критерию в две таблицы. Изначально определяется наиболее желательный вариант повышения скорости движения (ввод нового подвижного состава с оценкой 100) и наименее желательный, приравненный к оценке 0. В нашем случае принято, что все варианты имеют право на осуществление с большей или меньшей долей вероятности. В данной задаче все эти оценки индивидуальны и выражают только мнение специалиста, принимающего решение (рис. 4).

Последним этапом в решении данной задачи является принятие окончательного решения путем анализа по всем критериям и

правилам. На рис. 5 представлены все предлагаемые альтернативы и варианты их оценки в программе СППР LIGHTYEAR для рассматриваемого примера. Самая большая оценка принадлежит альтернативе «Ввод нового подвижного состава» – 84 %; самая низкая – «Использование двухпутных вставок на перегоне» и «Строительство 3-го пути» (44,4 и 44,1 % соответственно).

В случае, если вариант не отвечает какому-либо правилу-ограничению, соответствующий столбец диаграммы выделяется красным цветом. Это означает, что данная альтернатива не рассматривается в качестве рационального решения. В предлагаемых вариантах такого решения нет.

Критерий	Тип	Вес
Время выполнения	Г	48
Затрачиваемые человеческие ресурсы	Ч	7
Эффективность	Ч	4
Новизна	Г	8
Экологичность	Г	4
Стоимость	Ч	29

Рис. 2. Обозначение критериев с целью сопоставления альтернатив

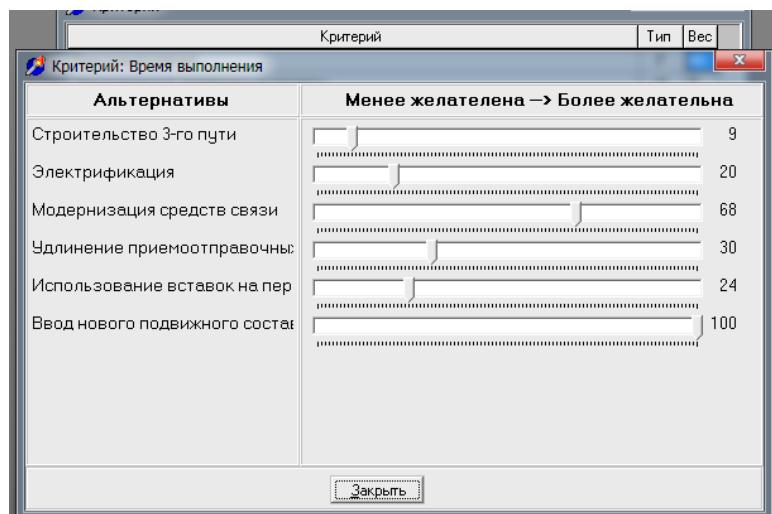


Рис. 3. Ввод оценок альтернатив согласно графическому критерию

Критерий		Тип	Вес
Критерий: Затрачиваемые человеческие ресурсы	X		
Альтернативы	Значения		
Строительство 3-го пути	20	Г	48
Электрификация	30	Ч	7
Модернизация средств связи	80	Ч	4
Чдлинение приемоотправочных путей	50	Г	8
Использование вставок на перегонах	39	Г	4
Ввод нового подвижного состава	100	Ч	29
Диапазон значений			
Наиболее желательное		100	
Наименее желательное		0	
Закрыть			

Рис. 4. Ввод оценок альтернатив согласно числовому критерию и указание наиболее желательной и наименее желательной оценки

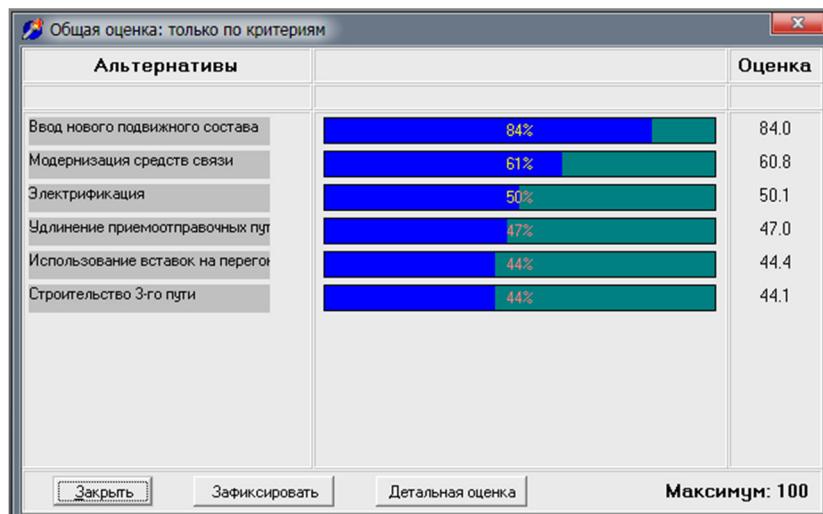


Рис. 5. Расчет обобщенной оценки каждой альтернативы с учетом всех критериев и правил

Вывод

В установленных обстоятельствах рациональной альтернативой считается приобретение современного тягового состава, так как

она имеет максимальную общую оценку и соответствует абсолютно всем правилам-ограничениям.

Список источников

- Ерофеев А. А., Ковтун П. В., Дубровская Т. А. Проблемы повышения скорости движения поездов на существующих железнодорожных линиях // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. 2018. № 181. С. 57–60.
- Миронов В. С., Руденко Т. А. Анализ эффективности скоростного движения пассажирских поездов в Республике Беларусь // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Гомель : БелГУТ, 2013. С. 300–302.
- Дубровская Т. А. Выбор параметров реконструкции железных дорог для скоростного движения с учетом неопределенности исходной информации // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. Гомель : БелГУТ, 2015. С. 241–242.
- Шварцфельд В. С. Сравнение вариантов строительства и реконструкции железнодорожных объектов с учетом фактора времени // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 4 (68). С. 248–256.

5. Курбасов А. С. Увеличение скоростей на железных дорогах России: возможности и преимущества // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 6 (37). С. 20–23.
6. Экономико-математические методы и модели в железнодорожном строительстве / Г. Н. Жинкин, И. И. Зеликович, В. А. Рогонов, С. Б. Шрайбер. М. : Транспорт, 1979. 256 с.
7. Кравченя И. Н., Руденко Т. А. Определение оптимальных скоростей движения поездов в кривых при введении скоростного движения // Транспорт и транспортная логистика : бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТ. № 2 (4). Брянск : Дизайн-Принт, 2013. С. 15–17.
8. Никульшин Б. В., Русин В. Г. Лабораторный практикум по курсу «Автоматизация деятельности банка». М. : БГУИР, 2011. 25 с.
9. Дубровская Т. А. Обоснование проектных решений при реконструкции железных дорог для скоростного движения пассажирских поездов в Республике Беларусь : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06 / Дубровская Татьяна Алексеевна. М., 2021. 159 с.
10. Ковтун П. В., Дубровская Т. А. Проблемы повышения скорости движения на существующих железнодорожных линиях // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорти : матер. 7-ї Міжнар. наук.-техн. конф. Харків : ДЗНУТ, 2018. С. 43–45.

References

1. Erofeev A. A., Kovtun P. V., Dubrovskaya T. A. Problems of increasing the speed of trains on existing railway lines. *Bulletin of the Belarusian State University of Transport*. 2018;(181):57–60. (In Russ.).
2. Mironov V. S., Rudenko T. A. Analysis of the efficiency of high-speed passenger trains in the Republic of Belarus. *Problems and prospects for the development of transport systems and the construction complex: materials of the III Intern. scientific-practical conf.* Gomel: BelsUT; 2013. P. 300–302. (In Russ.).
3. Dubrovskaya T. A. The choice of parameters for the reconstruction of railways for high-speed traffic, taking into account the uncertainty of the initial information. *Transport security issues: scientific-practical conference*. Gomel: BelsUT; 2015. P. 241–242. (In Russ.).
4. Shvartsfeld V. S. Comparison of options for the construction and reconstruction of railway facilities, taking into account the time factor. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2020;(68):248–256. (In Russ.).
5. Kurbasov A. S. Speed increase on Russian railways: opportunities and advantages. *Transport of the Russian Federation*. 2011;(37):20–23. (In Russ.).
6. Zhinkin G. N., Zelikovich I. I., Rogonov V. A., Shraiber S. B. Economic-mathematical methods and models in railway construction. M.: Transport; 1979. 256 p. (In Russ.).
7. Kravchenya I. N., Rudenko T. A. Determination of optimal train speeds in curves with the introduction of high-speed traffic. *Transport and transport logistics: Bulletin of scientific papers of the Bryansk branch of MIIT*. No. 2 (4). Bryansk: Design-Print; 2013. P. 15–17. (In Russ.).
8. Nikulshin B. V., Rusin V. G. Laboratory workshop in Automation of the Bank's activities. M.: BGUIR; 2011. 25 p. (In Russ.).
9. Dubrovskaya T. A. Substantiation of design decisions in the reconstruction of railways for high-speed passenger trains in the Republic of Belarus: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.22.06 / Dubrovskaya Tatyana Alekseevna. M.; 2021. 159 p. (In Russ.).
10. Kovtun P. V., Dubrovskaya T. A. Problems of increasing the speed of movement on existing railway lines. *Problems of reliability and durability of engineering structures and buildings on railway transport*. 7th Intern. sci.-tech. conf. Kharkiv: DZNUT; 2018. P. 43–45. (In Russ.).

Информация об авторе

Т. А. Дубровская – доцент кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов» Белорусского государственного университета транспорта.

Information about the author

T. A. Dubrovskaya – Associate Professor of the Department Design, construction and operation of transport facilities of the Belarusian State University of Transport.

Статья поступила в редакцию 20.04.2021; одобрена после рецензирования 11.10.2021; принятая к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 20.04.2021; approved after reviewing 11.10.2021; accepted for publication 17.01.2022.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.13

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_13

Причины загрязнения экосистемы города Астрахани выбросами автомобильного транспорта и пути его снижения

Светлана Борисовна Джахьяева¹, Екатерина Владимировна Климова^{2✉}

^{1, 2} Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

¹ psb1976@yandex.ru

² katuwaastu@yandex.ru✉

Аннотация. В связи с тенденцией концентрации населения в городских агломерациях наблюдается рост востребованности автотранспортных услуг. Увеличивается количество единиц автомобильного транспорта в городах по всему миру. В результате выявляется ухудшение экологической обстановки ввиду устаревания парка, низкого качества топлива и горюче-смазочных материалов, особенностей режимов работы двигателей в городском цикле. Экологическую ситуацию в городах осложняет факт высокого среднего возраста автотранспортных средств. Вместе с тем опыт европейских стран показывает перспективу прироста численности подвижного состава автотранспорта, что влечет за собой увеличение экологической нагрузки. На ухудшение экологической обстановки влияет не только токсичность выбросов двигателей автомобильного транспорта, но и загрязнение среды шумом, вибрацией и теплом.

Астрахань по классификации гидрометеорологии отнесена к числу загрязненных промышленных городов. Весомый вклад в общий объем загрязнений вносят выбросы автотранспорта. Близкое расположение магистралей к жилым застройкам, сосредоточение на них городского движения, регулярные заторовые ситуации ведут к ухудшению экологической обстановки в регионе.

Учитывая ежегодный прирост подвижного состава в областном центре, становится очевидной необходимость принятия мер по снижению экологической нагрузки на экосистему региона. Так, из всего спектра возможных мероприятий наиболее целесообразным считаем внедрение следующих направлений: оптимизация маршрутов движения городского общественного транспорта; повсеместное использование технологий по дожиганию топлива; применение водородного топлива для общественного транспорта; обеспечение возможностей для эксплуатации гибридного транспорта и электромобилей на территории Астрахани; расширение спектра мероприятий по защите от шума и вибрации; обновление автомобильного парка; ужесточение контроля качества топлива, горюче-смазочных материалов, технического состояния транспортных средств. Это обеспечит снижение негативной экологической нагрузки на экосистему Астрахани, увеличив эффективность перемещения пассажир- и грузопотоков.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, экосистема города Астрахани, загрязнение окружающей среды, выбросы вредных веществ, снижение негативного воздействия выбросов автотранспорта

Для цитирования: Джахьяева С. Б., Климова Е. В. Причины загрязнения экосистемы города Астрахани выбросами автомобильного транспорта и пути его снижения // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 13–20. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_13.

TRANSPORT

Original article

Pollution problem of the Astrakhan region ecosystem by emissions from road transport and ways to reduce it

Svetlana B. Dzhakhyaeva¹, Ekaterina V. Klimova^{2✉}

^{1, 2} Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

¹ psb1976@yandex.ru

² katuwaastu@yandex.ru✉

Abstract. In connection with the tendency of population concentration in urban agglomerations, there is an increase in the demand for road transport services. There is an increase in the number of road transport units in cities around the world. As a result, the deterioration of the ecological situation is revealed due to the obsolescence

of the fleet, poor quality of fuel and fuel and lubricants, and the peculiarities of engine operating modes in the urban cycle. The ecological situation in cities is complicated by the fact of the high average age of vehicles. At the same time, the experience of European countries shows the prospect of an increase in the number of rolling stock of vehicles, which entails an increase in the environmental load. The deterioration of the environmental situation is influenced not only by the toxicity of emissions from motor vehicles, but also by environmental pollution by noise, vibration and heat.

According to the hydro meteorological classification, the city of Astrakhan is classified as a polluted industrial city. Emissions from vehicles make a significant contribution to the total volume of pollution. The proximity of highways to residential buildings, the concentration of city traffic on them, regular traffic congestion lead to a deterioration of the ecological situation in the region.

Taking into account the annual increase in rolling stock in the Astrakhan, it becomes obvious the need to take measures to reduce the environmental load on the urban ecosystem. So, out of the whole range of possible measures, we consider the introduction of the following directions to be the most expedient: optimization of urban public transport routes; widespread use of fuel afterburning technologies; the use of hydrogen fuel for public transport; providing opportunities for the operation of hybrid vehicles and electric vehicles on the territory of the Astrakhan city; expansion of the range of measures in the city to protect against noise and vibration; car fleet renewal; tightening of quality control of fuel, fuels and lubricants, technical condition of vehicles on the territory of the Astrakhan city. This will ensure a decrease in the negative environmental load on the Astrakhan region, increasing the efficiency of movement of passenger and freight traffic.

Keywords: road transport, ecosystem of the Astrakhan city, environmental pollution, emissions of harmful substances, reducing the negative impact of emissions from vehicles

For citation: Dzhakhyaeva S. B., Klimova E. V. Pollution problem of the Astrakhan region ecosystem by emissions from road transport and ways to reduce it. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):13–20. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_13.

Введение

На протяжении нескольких десятилетий мы наблюдаем ярко выраженную в большинстве стран тенденцию концентрации населения в городских агломерациях [1, с. 44; 2, с. 2; 3, с. 1]. Соответственно, повышается актуальность своевременного и качественного обслуживания населения в различных аспектах социальной сферы. Как следствие, наблюдается уверенный рост в области транспортных услуг внутри населенных пунктов. Высокий спрос на индивидуальные пассажирские перевозки, транспортировку грузов, услуги доставки в формате «от двери до двери», каршеринг, лизинг меняют конфигурацию рынка и увеличивают долю продаж как корпоративным клиентам, так и частным лицам, значительно повышая циркуляцию автотранспорта в городской черте [1, с. 45, 3, с. 2]. Сложившаяся ситуация весомо влияет на рост количества выбросов в окружающую среду.

Необходимо отметить, что основная часть автотранспортного парка приходится на личный легковой автомобиль, средний возраст которого в России составляет 12,9 лет [3, с. 5]. Этот показатель свидетельствует о значительном износе парка легковых транспортных средств, что в свою очередь обрекает густо населенные города на повышенное количество выбросов [2, с. 4; 3, с. 3; 4, с. 32]. Это закономерно, ведь, с одной стороны, технический прогресс обуславливает постоянное совершенствование

вновь выпускаемого подвижного состава, а с другой стороны, естественный износ автомобилей старше 10 лет не дает возможности конкурировать по экологическим составляющим с усовершенствованными или новыми моделями. Таким образом, обилие устаревшего парка автомобилей как личного, так и общественного пользования заметно влияет на рост количества выбросов вредных компонентов и, как следствие, снижает качество атмосферного воздуха и состояние объектов гидрологии.

В Российской Федерации на 1 000 жителей приходится 313 легковых автомобилей [3, с. 2]; на территории Евросоюза на 1 000 жителей – 569 автомобилей [4, с. 31]. Вместе с тем потенциал увеличения единиц подвижного состава автотранспорта в нашей стране весьма велик. Фундаментальным драйвером долгосрочного роста российского рынка является относительно меньшая плотность парка по сравнению с западными странами [1, с. 45; 3, с. 3].

С ростом автомобилизации в нашей стране активно развивается транспортная инфраструктура. Увеличивается количество автозаправочных станций, пунктов технического обслуживания, парковок. Качество их функционирования зависит от добропорядочности владельца и экономического климата страны. Влияние инфраструктуры транспортного обслуживания на состояние окружающей среды сложно переоценить. Для поддержания качества атмосферного

воздуха и объектов гидрологии в удовлетворительном состоянии необходим строгий и постоянный контроль сферы автотранспортного сервиса в части соблюдения экологических требований [2, с. 3; 5, с. 156; 6, с. 21].

Особое внимание в рамках поддержания экологически комфортного уровня следует уделить энергетическому загрязнению. Шумовое, тепловое и вибрационное воздействие оказывает значимое и непосредственное негативное влияние как на участников дорожного движения, так и на людей, находящихся вблизи автомобильных дорог [7, с. 142; 8, с. 12]. Для снижения вредного воздействия автотранспортной инфраструктуры важно применять организационные меры, комплексно подходя к решению указанных вопросов.

Город Астрахань представляет собой один из высокоразвитых центров Поволжья и по ежегодной классификации Государственного комитета по гидрометеорологии и контролю окружающей среды отнесен к числу загрязненных промышленных городов России [2, с. 4]. Территория города и его окрестности расположены в нижнем течении реки Волги и представляют своеобразную геохимическую ловушку, аккумулирующую в себе все загрязнители, поступающие с верховьев Волги. Специфика загрязнения природной среды города непосредственно связана не только с отраслевой диверсификацией, но и с физико-географическими особенностями положения города. Особенность размещения промышленных источников загрязнения такова, что центр города, жилые кварталы, примыкающие к Волге, ее притокам, окружены промышленными зонами на северо-востоке, юго-востоке, северо-западе.

Учитывая преобладающую среднегодовую розу ветров: восточная (25 %), северо-восточная (9 %), юго-восточная (14 %) в сочетании с повторяющимися приземными инверсиями (более 52 % в год), низкой лесистостью (ниже 8 м³ на одного жителя), – потенциал загрязнения атмосферы характеризуется как высокий, особенно при низких источниках загрязнения. Наряду с этим сильные ветры, способствующие рассеиванию примесей в воздухе, сопровождаются ростом естественной запыленности атмосферы. При этом число дней с осадками более 0,1 мм составляет не более 80 дней в году, более 0,5 мм – 10 дней в году [9, с. 59].

Материалы и методы исследования

Основным источником загрязнения воздушного бассейна города является автотранспорт. Выбросы от автотранспорта составляют 16,6 тыс. т, или 67,2 % от общих валовых выбросов в целом по городу [9, с. 58].

Регулярные заторовые ситуации на дорогах города, высокая степень износа подвижного состава как общественного, так и индивидуального автотранспорта, а также неудовлетворительное состояние покрытия проезжей части и средств организации дорожного движения как в селах, так и в областном центре ведут к повышению концентрации опасных компонентов в экосистеме региона [2, с. 4; 9, с. 60].

Меры, направленные на снижение негативного воздействия выбросов автомобильного транспорта на экосистему, подразделяются на три группы:

- технические,
- организационно-технические,
- планировочно-градостроительные.

К первой группе относятся технические вопросы развития автомобилестроения. Чем больше будет доля усовершенствованных автомобилей в астраханском автопарке, тем более отчетливо будет проявляться эффективность мероприятий данной группы.

Под усовершенствованием в данном случае следует понимать обновление подвижного состава, повышение качества и экологических характеристик топлив и масел. Для достижения необходимого уровня качества горюче-смазочных материалов, топлива в Астрахани необходимо усилить контроль соблюдения нормативно-правовых актов в этой сфере.

Актуальным направлением для внедрения является технология снижения концентрации выбросов посредством очистки токсичных компонентов отработавших газов на территории Астрахани. Принцип основан на пропускании отработавших газов через различные аппараты в системе их выпуска [10, с. 27]. Еще одним перспективным направлением является использование альтернативных видов топлива. Наибольшее число исследований, подтвержденных экспериментально, находится в сфере применения газа и водорода в качестве альтернативы традиционным видам топлива.

Вторая группа включает в себя организационно-технические мероприятия, которые несут в себе комплекс задач, направленных на исполнение предписаний государственных и отраслевых стандартов, чьей целью является контроль уровня токсичности автотранспорта.

Так, одним из способов решения поставленных задач является введение ограничения на передвижение автомобильного транспорта с низкими экологическими классами в наиболее экологически неблагоприятных районах Астрахани. Оценка эффективности подобных мероприятий показала, что такая мера обеспечит снижение выбросов диоксида азота на 19 % и оксида углерода на 10 % [4, с. 32].

Третья группа включает в себя выбор опимальных градостроительных решений, которые могут быть связаны с обустройством подземных пешеходных переходов, многоуровневых транспортных развязок, оптимизацией схем организации дорожного движения и т. д.

В Астрахани около 30 % протяженности улиц и проездов заняты магистральными дорогами [9, с. 61]. На них сосредотачивается порядка 70 % всего автомобильного движения. Следовательно, уровень загруженности магистралей значительно выше, чем на остальных дорогах областного центра. Повысить пропускную способность автомобильных путей сообщения, сократить число дорожно-транспортных происшествий, изолировать спальные районы и общественные центры от концентрированных потоков транспортных средств, вследствие чего повысить уровень экологической безопасности города можно посредством строительства сети скоростных магистралей вдали от жилых домов.

Эффективной мерой снижения вредного воздействия автотранспорта на экосистему города считаем внедрение принципов разделения путей пешеходов и транспорта [5, с. 145; 11, с. 10]. За счет этого снижается количество точек пересечения транспортных и пешеходных потоков, что позволяет повысить пропускную способность и увеличить время пребывания автомобиля в более экологичном режиме движения.

Еще одним важным элементом повышения пропускной способности на основных магистралях Астрахани является строительство объездных дорог для транзитного транспорта,

большую часть которого составляют грузовые крупнотоннажные транспортные средства.

Эффективность мероприятий третьей группы локализована в районах автомагистралей, особенно в зонах их пересечений. Уровень эффективности обусловлен целесообразностью проектировочных решений. Вместе с тем в случае некорректного подхода есть вероятность повышения уровня токсичности в соседних локальных зонах [12, с. 38].

Результаты исследования

Учитывая высокий уровень загрязнения экосистемы Астрахани [2, с. 5; 9, с. 58], актуальным будет применение радикальных мер. Так, целесообразно внедрение альтернативной энергетики на общественном транспорте города. Наиболее перспективными в этой области считаются: водородный транспорт, гибридный транспорт и электромобили.

И если еще 10 лет назад разработки в сфере альтернативной энергетики были привилегией науки [13, с. 103], то сегодня такие автомобили эксплуатируются на городских дорогах наравне с традиционными представителями. В борьбе за сокращение выбросов вредных веществ крупнейшие автоконцерны все активнее расширяют границы внедрения водородных технологий, предлагая в последние пять лет много новых коммерческих решений. А мегаполисы мира все активнее работают над переводом общественного транспорта на энергоустановки с водородным топливом. Правительством нашей страны утвержден план мероприятий по развитию водородной энергетики до 2024 г. [14, с. 1]. В связи с внедрением водородной энергетики в производство планируются новые меры поддержки, в первую очередь развитие научно-исследовательской базы. С целью налаживания процесса производства планируется разработка газовых турбин на метано-водородном топливе и установок по производству водорода без выбросов углекислого газа [15, с. 22].

Такой подход позволит в ближайшие годы реализовать возможность эксплуатации автобусов на водородном топливе в системе общественного транспорта. В этом случае существенно снизится токсичная нагрузка на улично-дорожную сеть города.

Снизить негативное воздействие выбросов автотранспорта позволит широкое внедрение экологически чистых электромобилей. И сегодня, в начале третьего десятилетия XXI в. такие предложения есть у многих концернов. Необходимо отметить ценовую доступность и положительный зарубежный опыт эксплуатации, обеспеченный конкурентоспособностью большинства моделей.

Перспективным с точки зрения повышения экологической безопасности также является развитие гибридов, соединяющих в себе ДВС и электродвигатель. Однако ввиду высокой научно-емкости и сложности технического обслуживания такое направление на данный момент находится скорее на стадии подготовки к широкому внедрению на российский рынок.

Выводы

Описанные направления внедрения альтернативной энергетики на пространстве автодорог считаем целесообразными в рамках снижения негативного воздействия автомобильного транспорта на экосистему Астрахани.

Для рассматриваемого города наиболее рациональным является разработка своего комплекса мер, направленного на снижение уровня загрязнения атмосферы. При этом важно учитывать структуру автомобильного парка города, виды и качество используемого топлива, а также другие факторы, влияющие на состояние экосистемы. Для обеспечения максимального эффекта указанные мероприятия должны реализовываться в комплексе.

Учитывая тенденцию стабильного роста численности единиц подвижного состава, научная общественность, производители и политические деятели вынуждены ужесточить контроль уровней выбросов [16, с. 972; 17, с. 50]. Вместе с тем необходимо продумывать пути снижения количественных показателей выбросов вредных веществ, которые будут эффективными в указанных условиях [5, с. 78].

По результатам подробного анализа сложившейся в Астрахани ситуации сделаны выводы о целесообразности применения мер снижения вредного воздействия выбросов автотранспорта на экосистему, описанные ниже.

1. Оптимизация маршрутов движения городского общественного транспорта и регули-

рование численности единиц подвижного состава на каждом из них.

Данная мера обеспечит снижение вероятности повторяемости маршрутов, позволит отрегулировать количество подвижного состава, сделав его минимально необходимым для снижения вредного воздействия выбросов на окружающую среду областного центра.

2. Масштабное внедрение технологий по дожиганию топлива как на общественном, так и на личном автотранспорте.

Такой подход позволит снизить неполноту сгорания топлива, что особенно актуально для городского режима эксплуатации транспортных средств.

3. Внедрение альтернативной энергетики (водородное топливо, электромобили, гибридные автомобили).

Использование водородного топлива, в первую очередь для общественного транспорта, позволит снизить загазованность в городе, особенно при условии регулярных заторовых ситуаций на основных астраханских магистралях. Эксплуатация электромобилей существенно снизит нагрузку негативного воздействия (токсичного и шумового) на экосистему города. Особенно эффективным внедрение электромобилей станет на территориях природных заповедников, вблизи водоемов, а также вблизи памятников архитектурного наследия. Использование электромобилей способно внести весомый вклад в развитие туристической отрасли не только города, но и всего Астраханского региона.

4. Расширение спектра мероприятий в городе по защите от шума и вибрации.

Учитывая близкое расположение жилой застройки к магистралям города, считаем необходимым организацию шумозащитных экранов, систем активного гашения, а также обустройство зеленых насаждений вдоль автомобильных дорог. Данные меры эффективны как в городской черте, так и за ее пределами. Особенno целесообразна организация многорядных и многоуровневых зеленых насаждений вдоль территории сельскохозяйственного назначения.

5. Экономические инициативы регионального уровня для обновления автомобильного парка.

На сегодняшний день в городской черте общественный транспорт представлен только ав-

томобильным. Подвижной состав не обновлялся в течение длительного времени. Высокий уровень износа, несоответствие современным требованиям экологичности приводит к повышенному загрязнению среды.

6. Регулярный контроль качества топлива на территории Астрахани.

Известно, что от качества топлива также зависит уровень выбросов [18, с. 58; 19, с. 7]. Только полное соответствие стандартам обеспечит возможность использования высококачественного топлива для автотранспорта.

7. Ужесточение контроля технического состояния транспортных средств в пунктах проведения технического осмотра и на мобильных и стационарных постах ДПС как на территории города, так и на всей области.

Исправное техническое состояние транспортных средств, а именно качество смесеобразования, состояние горюче-смазочных материалов, исправность узлов и агрегатов, способ-

ствует обеспечению соответствия нормам выбросов, что позволяет снизить нежелательное токсичное воздействие автотранспорта на окружающую среду региона. Однако технический осмотр, осуществляемый только один раз в год, часто не способен обеспечить контроль исправности транспортного средства в течение всего периода. Это приводит к увеличению нагрузки выбросов на экосистему Астрахани.

Комплексный подход, включающий в себя выше перечисленные мероприятия, обеспечит уменьшение вредного воздействия автотранспорта на экологию Астрахани, увеличит эффективность перемещения пассажиро- и грузопотоков, а также позволит снизить экономический ущерб от временных потерь и нецелесообразных трудозатрат. Своевременное реагирование на экологическое состояние в регионе позволит обеспечить безопасность его жителей с учетом требований, прописанных в ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» [6, с. 36].

Список источников

1. Прокудин Д. А. Современное состояние автомобильного рынка в России // Вестник университета. 2016. № 4. С. 43–47.
2. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году : Государственный доклад Министерства природных ресурсов и экологии РФ. URL: <https://gosdoklad-ecology.ru/2017/atmosfernyy-vozdukh/vybrosy-zagryaznyayushchikh-veshchestv/> (дата обращения: 01.07.2021).
3. Автомобильный парк: на чем ездят россияне? // Аналитическое агентство АВТОСТАТ. URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/47703/> (дата обращения: 10.07.2021).
4. Сердюкова А. Ф., Барабанчиков Д. А. Влияние автотранспорта на окружающую среду // Молодой ученик. 2018. № 25. С. 31–33.
5. ОДМ 218.4.005–2010. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах. М. : Росавтодор, 2010. 269 с.
6. Об охране атмосферного воздуха : feder. закон от 4 мая 1999 г. № 96-ФЗ (ред. от 25.06.2012). М., 2012. 49 с.
7. Конякин Г. Н., Карабаева А. З. Шумовое загрязнение окружающей среды современного города // Географические науки и образование : материалы XI Всерос. науч.-практ. конф. Астрахань, 2018. С. 142–144.
8. ГОСТ 20444–2014. Шум. Транспортные потоки. Методы определения шумовой характеристики. М. : Стандартинформ, 2014. 39 с.
9. Морозова Л. А., Родина С. А., Ведеева А. А. Анализ динамики источников загрязнения атмосферного воздуха Астраханской области // Конфликт природопользования: роль в эволюции ноосферы : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Астрахань, 2019. С. 58–62.
10. Совершенствование методов снижения загрязнения атмосферы вредными выбросами автотранспорта / М. К. Ибатов, И. А. Пак, Б. Ш. Аскаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. С. 25–29.
11. Матюшин Д. В. Исследование биосферной совместимости городской среды от воздействия объектов транспортного строительства : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Орел, 2016. 18 с.
12. Анализ путей образования вредных веществ в отработавших газах поршневых двигателей / В. Р. Ведрученко, А. Л. Иванов, В. А. Борисов, П. В. Литвинов // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 36–39.
13. Бугаева О. В. Разработка модели принятия технических решений по снижению выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников в условиях строительных организаций : дис. ... канд. техн. наук. Ростов-н/Д, 2004. 156 с.
14. Ликсутов М. В. Когда в Москве появится водородный общественный транспорт // РБК. URL: <https://www.rbc.ru/opinions/society/08/04/2021/606b3e089a794779f98ed5d5> (дата обращения: 15.07.2021).

15. Двоеглазов И. Е., Денисов А. Е., Чистяков В. О. Водородный транспорт в современном машиностроении // Символ науки. 2019. № 5. С. 20–23.
16. Ведрученко В. Р., Литвинов П. В. Анализ требований к нормативам выбросов вредных веществ // Архитектура, строительство, транспорт : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»). Омск, 2015. С. 970–976.
17. Анализ выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и организация их контроля / Т. С. Чигина, М. М. Иолин, А. С. Борзова [и др.] // Геология, география и глобальная энергия. 2017. № 2 (65). С. 47–52.
18. Шаталова Е. Е., Шаталов С. В. Оценка выбросов загрязняющих веществ на пересечениях внегородских дорог // Строительство 2003 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-н/Д: Изд-во Рос. гос. соц. ун-та, 2003. С. 56–59.
19. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. СПб. : НИИ Атмосфера, 2010. 15 с.

References

1. Prokudin D. A. The current state of the automotive market in Russia. *Bulletin of the University*. 2016;(4):43–47. (In Russ.).
2. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2017: State report of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. (In Russ.). URL: <https://gosdoklad-ecology.ru/2017/atmosfernyy-vozdukh/vybrosy-zagryaznyayushchikh-veshestv/>.
3. Car park: what do Russians drive? *Analytical agency AUTOSTAT*. (In Russ.). URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/47703/>.
4. Serdyukova A. F., Barabanshchikov D. A. Influence of motor transport on the environment. *Young scientist*. 2018;(25):31–33. (In Russ.).
5. ODM 218.4.005–2010. Recommendations for ensuring traffic safety on highways. M.: Rosavtodor; 2010. 269 p.
6. On the protection of atmospheric air: Feder. Law of May 4, 1999 No. 96-FZ. M.; 2012. 49 p. (In Russ.).
7. Konyakin G. N., Karabaeva A. Z. Noise pollution of the environment of a modern city. *Geographical sciences and education: materials of the XI All-Russia. scientific-practical. conf. Astrakhan*; 2018. P. 142–144. (In Russ.).
8. GOST 20444–2014. Noise. Transport streams. Methods for determining the noise characteristic. M.: Standartinform; 2014; 39. (In Russ.).
9. Morozova L. A., Rodina S. A., Vedeyeva A. A. Analysis of the dynamics of atmospheric air pollution sources in the Astrakhan region. *Nature management conflict: role in the evolution of the noosphere: Proceedings of the International scientific-practical conference*. Astrakhan; 2019. P. 58–62. (In Russ.).
10. Ibatov M. K., Pak I. A., Askarov B. Sh. [et al.] Improvement of methods for reducing atmospheric pollution by harmful emissions of motor vehicles. *Modern problems of science and education*. 2013;(3):25–29. (In Russ.).
11. Matyushin D. V. Study of the biospheric compatibility of the urban environment from the impact of objects of transport construction: author. dis. ... cand. tech. Sciences. Orel; 2016. 18 p. (In Russ.).
12. Vedruchenko V. R., Ivanov A. L., Borisov V. A., Litvinov P. V. Analysis of the ways of formation of harmful substances in the exhaust gases of piston engines. *Omsk Scientific Bulletin*. 2017;4(154):36–39. (In Russ.).
13. Bugaeva O. V. Development of a model for making technical decisions to reduce emissions of pollutants from mobile sources in the conditions of construction organizations: dis. ... cand. tech. Sciences. Rostov-on-Don; 2004. 156 p. (In Russ.).
14. Liksutov M. V. When hydrogen public transport will appear in Moscow. *RBC*. (In Russ.). URL: <https://www.rbc.ru/opinions/society/08/04/2021/606b3e089a794779f98ed5d5>.
15. Dvoeglazov I. E., Denisov A. E., Chistyakov V. O. Hydrogen transport in modern engineering. *Symbol of science*. 2019;(5):20–23. (In Russ.).
16. Vedruchenko V. R., Litvinov P. V. Analysis of the requirements for emission standards of harmful substances. *Architecture, construction, transport: materials of the Intern. scientific-practical. conf. (to the 85th anniversary of FGBOU VPO “SibADI”)*. Omsk; 2015. P. 970–976. (In Russ.).
17. Chigina T. S., Iolin M. M., Borzova A. S. [et al.]. Analysis of emissions of pollutants into the atmosphere and organization of their control. *Geology, geography and global energy*. 2017;2(65):47–52. (In Russ.).
18. Shatalova E. E., Shatalov S. V. Evaluation of pollutant emissions at the intersections of off-road roads. *Construction 2003: materials of the Intern. scientific-practical. conf. Rostov-on-Don*: Publishing house of Russian State Social University; 2003. P. 56–59. (In Russ.).
19. Methodology for determining vehicle emissions for conducting summary calculations of urban air pollution. St. Petersburg: NII Atmosphere; 2010. 15 p. (In Russ.).

Информация об авторах

С. Б. Джахъяева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии наземного транспорта» Астраханского государственного технического университета.

Е. В. Климова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии наземного транспорта» Астраханского государственного технического университета.

Information about the authors

S. B. Dzhakhyaeva – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Equipment and Technologies of Land Transport, Astrakhan State Technical University.

E. V. Klimova – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Equipment and Technologies of Land Transport, Astrakhan State Technical University.

Статья поступила в редакцию 16.08.2021; одобрена после рецензирования 28.09.2021; принятая к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 16.08.2021; approved after reviewing 28.09.2021; accepted for publication 17.01.2022.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 625.17(07)

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_21

Допустимое морозное пучение подшпального основания с учетом весеннего оттаивания пути для модернизации восточного полигона

Георгий Константинович Щепотин

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, shepotin@rambler.ru

Аннотация. Повышение несущей способности подшпального основания пути в сложных инженерно-геологических условиях Сибири является одной из основных задач при модернизации восточного полигона. Вопрос о допустимом морозном пучении актуален для проектирования противопучинных конструкций при строительстве новых железных дорог, а также для устранения их на эксплуатируемых линиях. Существующую градацию допустимого морозного пучения необходимо дополнительно детализировать с учетом многообразия инженерно-геологических особенностей восточного региона.

Весеннее оттаивание пути – наиболее опасный период года. По мере оттаивания пути снижается морозное пучение. Оттаивание мерзлых грунтов сопровождается снижением их несущей способности и образованием просадок основания. В результате сезонные деформации наносят немалый ущерб путевому хозяйству дорог в условиях Сибири и препятствуют бесперебойному и безопасному движению поездов с установленными скоростями. Поэтому при определении допустимого морозного пучения необходимо учитывать весенне оттаивание подшпального основания.

Ключевые слова: модернизация восточного полигона, допустимое морозное пучение, усиление подшпального основания, сезонные деформации, asbestos ballast, глинистые грунты

Для цитирования: Щепотин Г. К. Допустимое морозное пучение подшпального основания с учетом весеннего оттаивания пути для модернизации восточного полигона // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 21–28. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_21.

TRANSPORT

Original article

Permissible frost heaving of the sleeper base, taking into account the spring thawing of the track during the modernization of the eastern polygon

George K. Shchepotin

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, shepotin@rambler.ru

Abstract. Increasing the load-bearing capacity of the sleeper base of the track in the difficult engineering and geological conditions of Siberia is one of the main tasks in the modernization of the eastern polygon. The issue of permissible frost heaving is relevant for the design of anti-spring structures during the construction of new railways, as well as their elimination on existing lines. The existing gradation of permissible frost heaving should be further detailed, taking into account the variety of engineering and geological features of the eastern region.

Spring thawing is the most dangerous period of the year. As the path thaws, frost heaving decreases. Thawing of frozen soils is accompanied by a decrease in their bearing capacity and the formation of subsidence of the base. As a result, seasonal deformations cause considerable damage to the road infrastructure in Siberia and hinder the smooth and safe movement of trains at set speeds. Therefore, when determining the permissible frost heaving, it is necessary to take into account the spring thawing of the sleeper base.

Keywords: modernization of the eastern polygon, permissible frost heaving, strengthening of the sleeper base, seasonal deformations, asbestos ballast, clay soils

For citation: Shchepotin G. K. Permissible frost heaving of the sleeper base, taking into account the spring thawing of the track during the modernization of the eastern polygon. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):21–28. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_21.

При реализации поэтапной модернизации восточного полигона планируется к 2024 г. увеличить грузонапряженность путей в 1,5 раза. Существенное повышение пропускной способности дорог предполагается за счет строительства новых и вторых путей, а также внедрения тяжеловесного движения.

Восточный полигон располагается в труднодоступных таежно-болотистых районах с наличием вечномерзлых грунтов. В этих сложных инженерно-геологических условиях важно создать прочное и устойчивое основание железной дороги для ее эффективной эксплуатации. Однако именно подшпальное основание является наименее надежным элементом пути.

Подшпальное основание железных дорог восточного региона – это сложный по своей работе и неоднородный по физико-механическим характеристикам комплекс, состоящий из балластной призмы, старых балластных материалов и основания, как правило, из перевуаленных глинистых грунтов [1–3].

Данный комплекс представляет собой слой от нижней постели шпал до глубины, на которой уже можно пренебрегать деформациями от динамического воздействия поездной нагрузки. В этом слое (примерно 3 м) деформации от поездной нагрузки постепенно затухают.

С ростом нагрузок (уголь и другие сыпучие грузы) интенсивность остаточных деформаций пути при движении тяжеловесных поездов увеличивается, при этом увеличивается и толщина слоя активного сжатия грунтов основания. Путейцам становится затруднительно содержать путь в исправном состоянии и обеспечивать бесперебойное и безопасное движение поездов.

Подшпальное основание длительно эксплуатируемых железных дорог запроектировано и построено по устаревшим и не удовлетворяющим современным эксплуатационным требованиям нормам [4].

Работа пути осложняется изменчивостью состояния земляного полотна в зависимости от свойств слагающих его грунтов, которые не постоянны во времени и меняются при взаимодействии с грунтовой и поверхностной водой, при сезонном промерзании-оттаивании [5–7].

Поэтому усиление подшпального основания пути на эксплуатируемых железнодорожных линиях в сложных инженерно-геологических и климатических условиях Сибири яв-

ляется одной из основных задач при модернизации восточного полигона [8, 9].

Для предотвращения остаточных деформаций в толщине слоя активного сжатия грунтов подшпального основания необходимо выполнить замену слабых грунтов на более прочные дренирующие [10–12].

Замена местных слабых грунтов на песчано-гравийные смеси широко применялась в 60-х годах при строительстве «трассы мужества» Абакан – Тайшет. Первоначально толщина замены (противодеформационной подушки) принималась 60 см. Позднее она была увеличена до 80 см.

В дальнейшем опыт эксплуатации этой линии показал недостаточность данных мероприятий для борьбы с последствиями морозного пучения грунтов. Пучинные деформации здесь получили повсеместное распространение. Исправить ситуацию не удается до сих пор [1].

При строительстве линии Тюмень – Сургут толщина подушек принималась 80 см. Но вместо песчано-гравийных смесей укладывался асбестовый балласт. Он использовался в накладных и врезных подушках (слой 80 см), а также в качестве балластного слоя (толщиной 50 см). В результате этого на линии пучинные деформации не получили широкого развития [13].

Выяснилось, что к положительным качествам асбестового балласта относятся не только хорошие противопучинные свойства, но и высокая несущая способность и сопротивляемость вибрационным воздействиям, а также незначительная водопроницаемость и относительно постоянный влажностный режим. При этом отпускная стоимость асBESTОВОГО балласта в 3 раза меньше, чем стоимость путевого щебня [8, 14].

Опыт эксплуатации пути в Сибири показывает, что полностью избежать пучения практически невозможно (или очень дорого). Поэтому целесообразно обеспечить такие условия, при которых пучение не будет вызывать недопустимых деформаций как в процессе промерзания, так и при оттаивании [15–17].

Морозное пучение – один из важнейших факторов, определяющих эксплуатационную надежность железных дорог. Вопрос о допустимом морозном пучении актуален в связи с разработкой эффективных мер предотвраще-

ния пучинообразований при строительстве новых железных дорог и устраниением их на эксплуатируемых линиях [10].

Весной по мере оттаивания пути снижается морозное пучение (оттаивают ледяные пролойки). Оттаивание мерзлых грунтов сопровождается снижением их несущей способности и образованием просадок основания. В результате сезонные деформации наносят большой ущерб путевому хозяйству дорог в условиях Сибири и препятствуют бесперебойному и безопасному движению поездов с установленными скоростями [11, 18].

Принятую в настоящее время градацию допустимого пучения нельзя считать окончательной, поскольку она не затрагивает всего многообразия эксплуатационных условий, существующих конструкций пути, а также климатических и инженерно-геологических особенностей восточного региона [1, 19].

Весна – наиболее опасный сезон года в работе пути. В этот период (апрель – май) при оттаивании оседают распученные зимой грунты земляного полотна. Интенсивность накопления остаточных деформаций возрастает (рис. 1).

Наблюдения позволили установить зависимость между остаточными деформациями $E_{\text{от}}$ в период оттаивания пути и величиной морозного пучения h :

$$E_{\text{от}} = 2,35 + 0,9h. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что остаточные деформации пути в период весеннего оттаивания определяются в основном величиной морозного пучения:

$$E_{\text{от}} \approx h. \quad (2)$$

При весенном неравномерном оттаивании существенно изменяется напряженно-деформированное состояние пути за счет дополнительных напряжений, возникающих придви-

жении транспорта по неровностям. Это ускоряет процессы разрушения элементов пути. Отсюда существует целесообразность ограничения величины морозного пучения не только из условия неравномерности пучения грунтов при промерзании, но и из-за неравномерности их осадки при оттаивании.

Учитывая вышесказанное, наиболее кардинальным следует считать такой вариант, при котором допустимое пучение $[h]$ равно 0, что практически невозможно с экономической точки зрения.

Чтобы решить данную задачу, необходимо минимизировать интенсивность нарастания неравномерности пути при оттаивании подшпального основания весной в зависимости от величины морозного пучения.

Для решения этой задачи на основе натурных исследований разработана математическая модель, которая описывает распределение отклонений по уровню от величины морозного пучения по сечениям пути.

Состояние пути по уровню оценивается с помощью проходов путеизмерительных вагонов два раза в месяц. Рост интенсивности осадок пути весной приводит к увеличению вероятности появления недопустимых неравномерностей пути по уровню в сравнении с летним сезоном за одинаковый промежуток времени (например, равный периоду прохода путеизмерительного вагона). Следовательно, величину морозного пучения следует ограничить таким допустимым значением, при котором не наблюдается существенного увеличения вероятности появления недопустимых неравномерностей пути по уровню при оттаивании подшпального основания.

В модели было принято оценивать неравномерность пути по уровню вероятностью P_N появления в пути перекосов больше 8 мм.

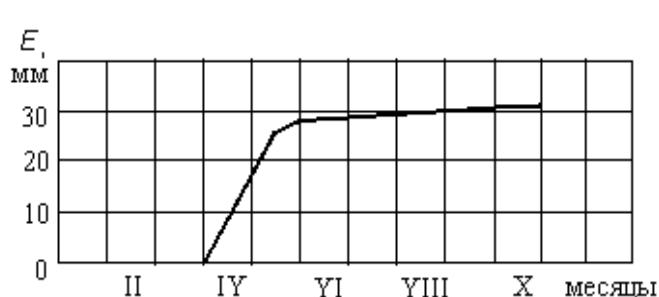


Рис. 1. График накопления остаточных деформаций E по сезонам года

Пусть ΔT – пропущенный тоннаж, Мт, между j -м и $(j+1)$ -м моментами контроля состояния рельсовой колеи вагоном-путеизмерителем, а \dot{E}_{ij} – интенсивность накопления остаточных деформаций в i -м сечении пути, мм/Мт. Тогда остаточная деформация E_{ij} в i -м сечении пути за период ΔT составит

$$E_{ij} = \dot{E}_{ij} \Delta T. \quad (3)$$

Превышение одной рельсовой нити над другой за ΔT находится по формуле

$$\Delta d_{ij} = E_{mij} - E_{nij}, \quad (4)$$

а величина отклонения пути по уровню в i -м сечении в $(j+1)$ момент контроля определяется как

$$d_{i,j+1} = d_{ij} + \Delta d_{ij}, \quad (5)$$

где d_{ij} – отклонение пути по уровню в i -м сечении в j -й момент контроля, мм; E_{mij} – остаточная деформация по междупутной рельсовой нити, мм; E_{nij} – остаточная деформация по полевой рельсовой нити, мм.

Перекос пути в i -м сечении в $(j+1)$ момент контроля будет равен:

$$N_{i,j+1} = |d_{i+1,j+1} - d_{i,j+1}|. \quad (6)$$

Поскольку значения d и N на любой момент контроля являются случайными величинами, то, зная функции распределения d и N , можно определить возрастание вероятности отклонений рельсовой колеи от норм содержания за период ΔT .

На рис. 2 и 3 приведены характерные гистограммы частостей распределения отклонений пути по уровню d и перекосов N на опытных участках в различные моменты времени. Гистограммы указывают на возможность подчинения случайной величины d нормальному закону распределения, а случайной величины N – экспоненциальному.

В этом случае плотность вероятностей распределения перекосов пути может быть представлена в виде

$$\rho(N) = \lambda \exp(-\lambda N), \quad (7)$$

а плотность вероятностей распределения отклонений рельсовых нитей по уровню как

$$f(d) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(d - \bar{d})^2}{2S^2}\right\}, \quad (8)$$

где λ – параметр, равный $1/\bar{N}$ (\bar{N} – среднее значение перекосов пути); \bar{d} и S – среднее значение отклонений по уровню и среднеквадратичное отклонение.

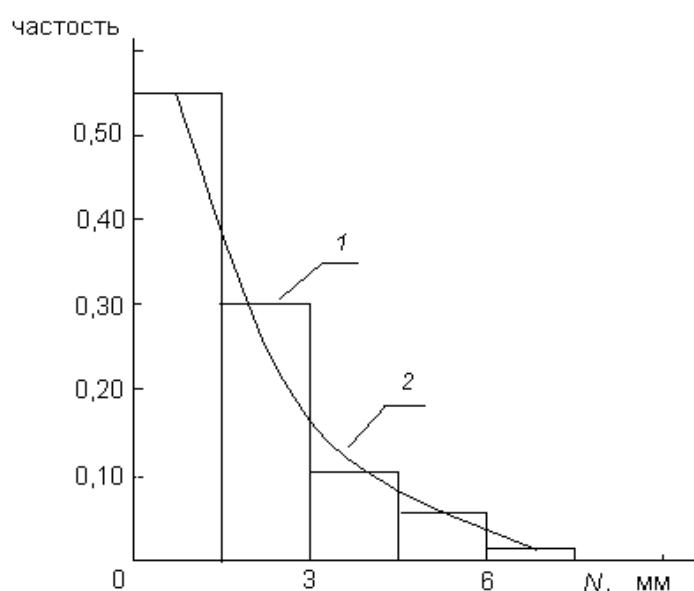


Рис. 2. Гистограмма частостей распределения перекосов пути N :
1 – опытные данные; 2 – теоретическое распределение

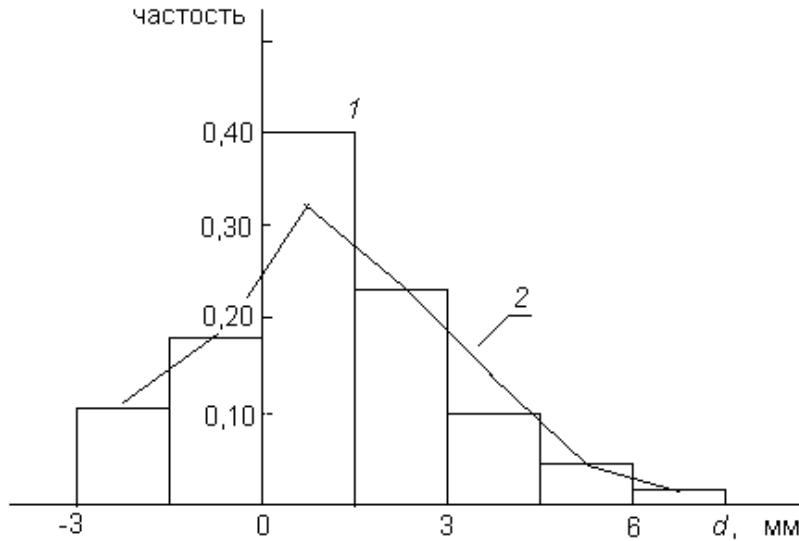


Рис. 3. Гистограмма частостей распределения отклонений пути по уровню d :
1 – опытные данные; 2 – теоретическое распределение

Нахождение параметров распределения d и N на очередной момент контроля выполнялось методом статистического моделирования [20, 21].

Вследствие подчинения случайной величины \dot{E} нормальному закону розыгрыш \dot{E}_{mij} с математическим ожиданием \bar{E} и среднеквадратичным отклонением S_e осуществлялся следующим образом:

$$\dot{E}_{mij} = S_e \sqrt{2} \left(\sum_{k=1}^6 R_k - 3 \right) + \bar{E}. \quad (9)$$

Для получения псевдослучайных чисел R_k использовался стандартный генератор случайных чисел [22], реализованный конгруэнтным мультипликативным методом

$$R_{k+1} = (R_k \lambda) \bmod 1. \quad (10)$$

Формула (10) определяет последовательность чисел в интервале от 0 до 1 с распределением, близким к равномерному.

Величина интенсивности накопления остаточных деформаций по полевой рельсовой нити \dot{E}_{nij} находилась по величине \dot{E}_{mij} с использованием процедуры розыгрыша двух зависимых случайных величин с учетом коэффициента корреляции в поперечном профиле r_n . Аналогично определялась и величина $\dot{E}_{m,i+1,j}$, но с учетом значений коэффициента корреляции в продольном профиле r_{np} [23].

Средняя интенсивность накопления остаточных деформаций в период оттаивания пути находилась по формуле

$$\dot{E} = \frac{h}{T_{\text{от}}}, \quad (11)$$

где $T_{\text{от}}$ – пропущенный тоннаж за период оттаивания пути, Мт, определяемый как

$$T_{\text{от}} = \frac{\Gamma t_{\text{от}}}{365}, \quad (12)$$

где Γ – грузонапряженность, Мт; $t_{\text{от}}$ – период оттаивания (апрель – начало июня), дни; 365 – число дней в году

Параметры распределения отклонений пути по уровню в период оттаивания приняты согласно натурным замерам на опытных участках: $\bar{d}_{j=1} = 0,61$ мм, $S_{j=1} = 3,10$ мм (см. рис. 3).

Приведем упрощенную последовательность выполнения расчетов на ПЭВМ:

1) ввод исходных данных: h , $t_{\text{от}}$, r_n , r_{np} ,

$\bar{d}_{j=1}$, $S_{j=1}$, $T_{\text{от}}$;

2) генерация случайных чисел P_k , равномерно распределенных в интервале $(0,1)$;

3) использование этих чисел для получения \dot{E}_{ij} ;

4) вычисление Δd_{ij} , $d_{i,j+1}$, $N_{i,j+1}$;

5) вычисление d_{j+1} , S_{j+1} , N_{j+1} ;

6) вычисление вероятностей P_d и P_N превышения отклонений по уровню d_{j+1} и перекосам пути N_{j+1} от норм содержания;

7) печать результатов расчета.

В модели принято определять вероятность P_d как

$$P_d = P\{d > [d]\}, \quad (13)$$

а вероятность P_N из условия

$$P_N = P\{N > [N]\}, \quad (14)$$

где $[d]$ и $[N]$ – нормы содержания рельсовой колеи по уровню и перекосам.

Результаты статистического моделирования представлены на рис. 4. Здесь изображена зависимость вероятности P_N от величины морозного пучения h .

Таким образом, из условия обеспечения минимума объемов работ по выправке пути по уровню в период оттаивания из-за неравномерной осадки распущенных грунтов допустимое морозное пучение не должно превышать 10 мм. А в условиях дефицита рабочей силы на дорогах восточного региона задача минимизации объемов работ при эксплуатации пути является актуальной. Кроме того, следует учитывать, что при укладке бесстыкового пути в холодных климатических условиях Сибири крайне важно ограничить весенние деформации пути для исключения отказов рельсовых плетей и обеспечения без-

опасности движения поездов с установленными скоростями в период оттаивания.

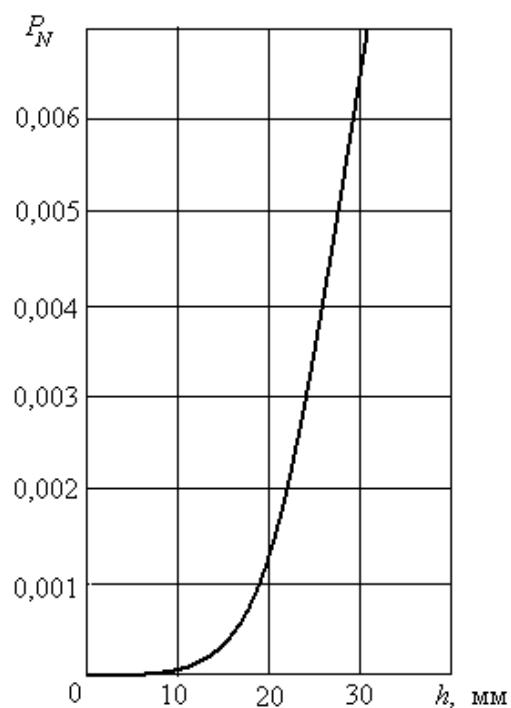


Рис. 4. Зависимость вероятности P_N от величины морозного пучения h

Зависимость на рис. 4 имеет степенной вид. Из ее анализа следует, что при значениях h больше 10–12 мм наблюдается существенное увеличение вероятности P_N , т. е. на практике имеет место резкое приращение объемов работ по выправке пути по уровню в единицу времени.

Список источников

- Щепотин Г. К. Усиление подшпалльного основания в условиях Сибири // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 7. С. 22–24.
- Бесстыковой путь / В. Г. Альбрехт, Н. П. Виногоров, Н. Б. Зверев [и др.] ; под ред. В. Г. Альбрехта, А. Я. Когана. М. : Транспорт, 2000. 408 с.
- Бредюк Г. П., Палькин Ю. С. Проектирование земляного полотна на вечномерзлых грунтах. Новосибирск : Изд-во НИИЖТа, 1986. 87 с.
- Титов В. П. Усиление земляного полотна длительно эксплуатируемых железных дорог. М. : Стройиздат, 1980. 272 с.
- Справочник по земляному полотну эксплуатируемых железных дорог / под ред. А. Ф. Подпалого, М. А. Чернышева, В. П. Титова. М. : Транспорт, 1978. 767 с.
- Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений / В. О. Орлов, Ю. Д. Дубнов, Н. Д. Меренков. Л. : Стройиздат, 1977. 183 с.
- Рувинский В. И. Оптимальные конструкции земляного полотна. М. : Транспорт, 1982. 166 с.
- Щепотин Г. К., Машкин Н. А. Повышение морозоустойчивости земляного полотна автомобильных дорог // Известия вузов. Строительство. 2015. № 3. С. 85–91.
- Щепотин Г. К., Крутасов Б. В. Повышение несущей способности дорожных конструкций в условиях Сибири // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 21. № 1 (67). С. 127–137.

10. ЦПИ-24. Технические указания по устранению пучин и просадок железнодорожного пути / МПС России. М., 1997. 73 с.
11. Щепотин Г. К. Надежность подшпального основания бесстыкового пути в суровом климате // Путь и путевое хозяйство. 2002. № 5. С. 17.
12. Руководство по применению полимерных материалов (пенопластов, геотекстилей, георешеток, полимерных дренажных труб) для усиления земляного полотна при ремонтах пути / МПС России. М., 2002. 110 с.
13. Методические рекомендации по применению асбестового балласта на железнодорожном транспорте : утв. 07.08.2008. Министерство промышленности и науки Свердловской области. Екатеринбург, 2008. 13 с.
14. ТУ 32-ЦП-782-92. Смесь песчано-щебеночная из отсевов дробления серпентинитов для балластного слоя железнодорожного пути : утв. 15.08.1992. М., 1992.
15. Щепотин Г. К., Величко Д. В. Эффективность усиления подшпального основания пенополиэтилолом // Путь и путевое хозяйство. 2005. № 9. С. 12–13.
16. Akimov S., Kosenko S., Bogdanovich S. Stability of the supporting subgrade on the tracks with heavy train movement // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. № 1116. Р. 228–236.
17. Севастьянов А. А., Кочетков А. С., Стрелков Д. А. Анализ воздействия поездов на железнодорожный путь в условиях Среднесибирского хода // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (55). С. 26–33.
18. Косенко С. А., Акимов С. С. Причины отказов элементов железнодорожного пути на полигоне Западно-Сибирской железной дороги // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3 (42). С. 26–34.
19. Щепотин Г. К. Влияние грузонапряженности и осевых нагрузок на долговечность рельсов в регионах с холодным климатом // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1 (56). С. 12–19.
20. Математическая статистика / В. М. Иванова, В. Н. Калинина, В. Н. Нешумова [и др.]. М. : Высшая школа, 1981. 371 с.
21. Надежность технических систем : справ. / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин [и др.] ; под ред. И. А. Ушакова. М. : Радио и связь, 1985. 608 с.
22. Вентцель Е. С. Исследование операций. М. : Сов. радио, 1972. 552 с.
23. Щепотин Г. К. Усиление подшпального основания бесстыкового пути. Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. ун-та путей сообщения, 2008. 150 с.

References

1. Shchepotin G. K. Strengthening of the sleeper base in Siberia. *Way and track facilities*. 2021;(7):22–24. (In Russ.).
2. Albrekht V. G., Vinogradov N. P., Zverev N. B. [at al.]. Continuons welded rail track. M.: Transport; 2000. 408 p. (In Russ.).
3. Bredyuk G. P., Palkin Yu. S. Design of subgrade on permafrost soils. Novosibirsk: Publishing house of NIIZhT; 1986. 87 p. (In Russ.).
4. Titov V. P. Strengthening the subgrade of long-term operated railways. M.: Stroyizdat; 1980. 272 p. (In Russ.).
5. Podpalogo A. F., Chernysheva M. A., Titov V. P., eds. Reference book on the subgrade of operated railways. M.: Transport; 1978. 767 p. (In Russ.).
6. Orlov V. O., Dubnov Yu. D., Merenkov N. D. Heaving of freezing soils and its influence on the foundations of structures. L.: Stroyizdat; 1977. 183 p. (In Russ.).
7. Ruvinskiy V. I. Optimal designs of subgrade. M.: Transport; 1982. 166 p. (In Russ.).
8. Shchepotin G. K., Mashkin N. A. Increasing the frost resistance of the subgrade of motor roads. *Izvestiya vuzov. Building*. 2015;(3):85–91. (In Russ.).
9. Shchepotin G. K., Krutasov B. V. Increasing the bearing capacity of road structures in Siberia. *Proceedings of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2018;21(67):127–137. (In Russ.).
10. TsPI-24. Technical instructions for eliminating the depths and subsidence of the railway track. Ministry of Railways of Russia. M.; 1997. 73 p. (In Russ.).
11. Schepotin G. K. Reliability of the under-sleeper base of a jointless track in a harsh climate. *Way and track management*. 2002;(5):17. (In Russ.).

12. Guidelines for the use of polymeric materials (foam plastics, geotextiles, geogrids, polymeric drainage pipes) to strengthen the subgrade during track repairs. Ministry of Railways of Russia. M.; 2002. 110 p. (In Russ.).
13. Guidelines for the use of asbestos ballast in railway transport: approved. 08/07/2008. Ministry of Industry and Science of the Sverdlovsk Region. Yekaterinburg; 2008. 13 p. (In Russ.).
14. TU 32-TsP-782-92. A mixture of sand and crushed stone from screenings of crushing serpentinites for the ballast layer of the railway track: approved. 08/15/1992. M.; 1992. (In Russ.).
15. Shchepotin G. K., Velichko D. V. Efficiency of reinforcing the sleeper base with polystyrene foam. *Way and track management.* 2005;(9):12–13. (In Russ.).
16. Akimov S., Kosenko S., Bogdanovich S. Stability of the supporting subgrade on the tracks with heavy train movement. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2020;(1116):228–236.
17. Sevastyanov A. A., Kochetkov A. S., Strelkov D. A. Analysis of the impact of trains on the railway track in the conditions of the Central Siberian course. *Bulletin of the Siberian State University of Communications.* 2020;4(55):26–33. (In Russ.).
18. Kosenko S. A., Akimov S. S. Causes of failures of railway track elements at the site of the West Siberian Railway. *Bulletin of the Siberian State University of Communications.* 2017;3(42):26–34. (In Russ.).
19. Shchepotin G. K. Influence of cargo tension and axial loads on the durability of rails in cold climate regions. *Bulletin of the Siberian State University of Communications.* 2021;1(56):12–19. (In Russ.).
20. Ivanova V. M., Kalinina V. N., Neshumova V. N. [at al.]. Mathematical statistics. M.: Higher school; 1981. 371 p. (In Russ.).
21. Belyaev Yu. K., Bogatyrev V. A., Bolotin V. V. [at al.]; Ushakova I. A., ed. Reliability of technical systems: Ref. M.: Radio and communication; 1985. 608 p. (In Russ.).
22. Wentzel E. S. Research operations. M.: Sov. Radio; 1972. 552 p. (In Russ.).
23. Shchepotin G. K. Strengthening of the sleeper base of a seamless path. Yekaterinburg: Publishing house of Ural State Transport University; 2008. 150 p. (In Russ.).

Информация об авторе

Г. К. Щепотин – доктор технических наук, профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

G. K. Shchepotin – Doctor of Engineering, Professor of the Department of Track and Track Facilities, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 31.09.2021; одобрена после рецензирования 20.10.2021; принята к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 31.09.2021; approved after reviewing 20.10.2021; accepted for publication 17.01.2022.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.11

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_29

Решение дорожно-транспортных проблем городов России на примере города Волгограда

Сергей Владимирович Витолин^{1✉}, Алексей Михайлович Лукьянков²

^{1, 2} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ vitolinsv@mail.ru[✉]

² alukyanskov208700@mail.ru

Аннотация. Целью данной работы является нахождение методов повышения качества жизни жителей и гостей городов за счет улучшения условий мобильности. По экспертным оценкам, суммарный ущерб из-за проблем городских транспортных систем составляет 6–8 % ВВП России. Показатели смертности по причине дорожно-транспортных происшествий в российских городах в сравнении со многими развитыми странами еще крайне высокие.

Методами проведенной работы являются: анализ существующих дорожно-транспортных проблем г. Волгограда, поиск методов решения этих проблем, практическая реализация и оценка качества проведенных мероприятий за счет моделирования и оценки показателей качества и безопасности дорожного движения. В Волгограде за последние пять лет удалось добиться только снижения числа погибших (от 90 до 58 чел. в год) в результате дорожно-транспортных происшествий, количество раненых остается относительно стабильным (от 1 200 до 1 600 чел. в год). В вопросах безопасности дорожного движения, учитывая статистику, нужно перенимать больше европейский опыт, чем опыт США. Стратегия Vision Zero является ориентиром во многих странах мира для повышения безопасности дорожного движения. Значительную роль в крупном городе как для безопасности дорожного движения, так и для пропускной способности выполняют светофорные объекты.

Предложена методология повышения качества жизни жителей и гостей городов с целью улучшения условий мобильности за счет создания и развития мест притяжения жителей, снижения доминирования индивидуального легкового транспорта, обеспечения приоритета общественному транспорту, развития сети дорог, управления светофорами и дорожными знаками в реальном времени.

Ключевые слова: мобильность, ДТП, моделирование, качество и безопасность дорожного движения, методология повышения качества жизни жителей и гостей города

Для цитирования: Витолин С. В., Лукьянков А. М. Решение дорожно-транспортных проблем городов России на примере города Волгограда // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 29–37. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_29.

TRANSPORT

Original article

Solution to traffic problems of Russian cities using the example of Volgograd

Sergei V. Vitolin^{1✉}, Alexey M. Lukyanskov²

^{1, 2} Volgograd State Technical University

¹ vitolinsv@mail.ru[✉]

² alukyanskov208700@mail.ru

Abstract. The purpose of this work is to find methods to improve the life quality of city residents and guests by improving mobility conditions. According to expert estimates, the total damage due to problems of urban transport systems is 6–8 % of Russia's gross domestic product. Mortality rates due to traffic accidents in Russian cities, compared with many developed countries, are still extremely high.

The methods of work carried out are: analysis of existing traffic problems in Volgograd, search for methods for solving these problems, practical implementation and evaluation of the quality of the measures carried out through modeling and evaluation of quality and road safety indicators. In Volgograd, over the past five years, only a decrease in the number of dead (from 90 to 58) has been achieved, the number of injured remains relatively stable from 1,200

to 1,600 people per year. In matters of road safety, given the statistics, you need to adopt more European experience than the US experience. The Vision Zero strategy is a benchmark in many countries around the world to improve road safety. A significant role in a large city, both for road safety and for capacity, is played by traffic lights.

A methodology for improving the life quality of city residents and guests is proposed to improve mobility conditions by creating and developing places of attraction for residents, reducing the dominance of individual passenger transport, ensuring priority to public transport, developing a network of roads and managing traffic lights and road signs in real time.

Keywords: mobility, road accidents, modeling, quality and road safety, methodology for improving the life quality of city residents and guests

For citation: Vitolin S. V., Lukyanskov A. M. Solution to traffic problems of Russian cities using the example of Volgograd. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2022;(60):29–37. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_29.

Введение

Одной из основных дорожно-транспортных проблем г. Волгограда является низкая безопасность дорожного движения (БДД) [1]. При этом наблюдается тенденция к снижению числа погибших по причине дорожно-транспортных происшествий в городе (рис. 1). Ко-

личество погибших на 100 тыс. жителей за пять лет снизилось с девяти до шести.

По количеству раненных в ДТП в Волгограде за пять лет тенденция к снижению отсутствует (рис. 2). Количество раненных в ДТП за один год составило от 1 200 до 1 600 чел.

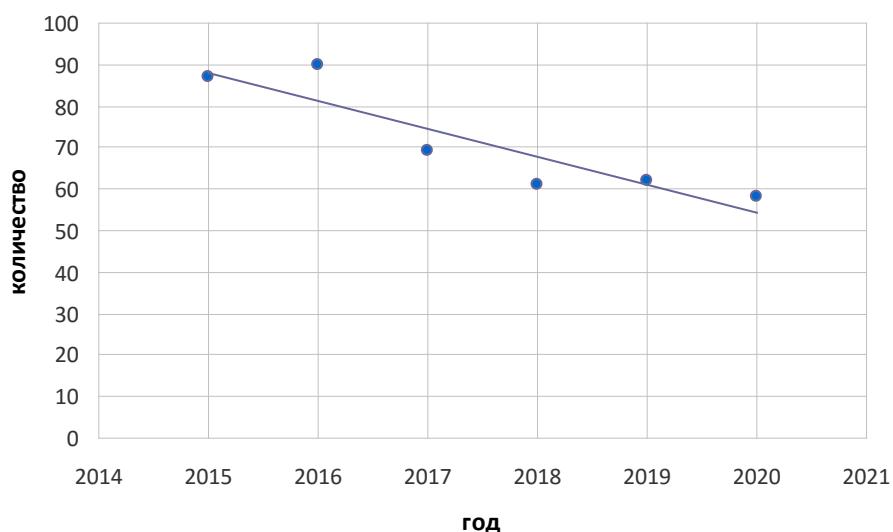


Рис. 1. Количество погибших в ДТП с 2015 по 2020 г. в Волгограде

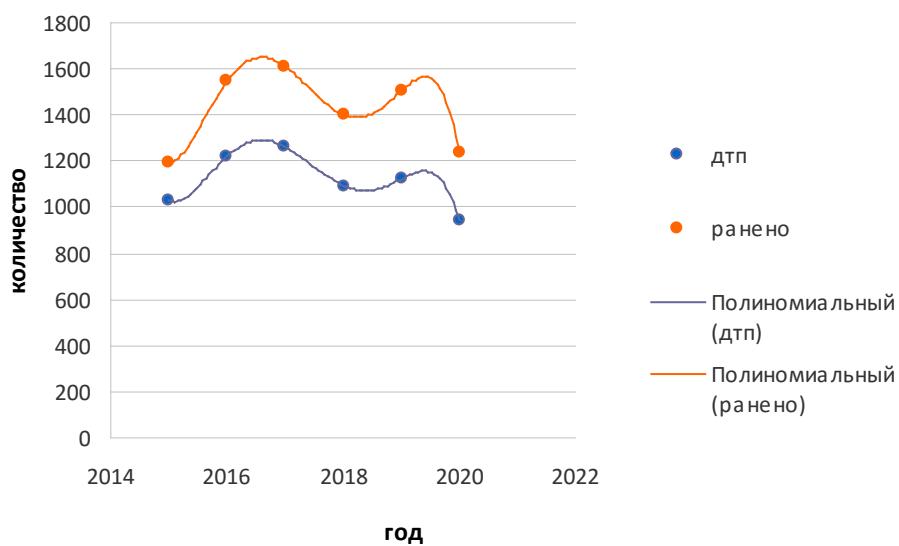


Рис. 2. Изменение количества ДТП и раненых за пять лет в Волгограде

В зарубежной статистике ДТП выделяют легко и тяжело раненных с целью фиксировать и сокращать в первую очередь не только количество погибших, но и количество тяжело раненных. Кроме того, в Европе в статистике учитывают ДТП не только с ранеными и погибшими, но и ДТП с материальным ущербом.

Вопросам улучшения условий мобильности в публикациях уделяется большое внимание [2–9]. Кроме безопасности важное значение для мобильности имеет качество дорожного движения (степень загрузки и задержки), а также эстетическая привлекательность участков улично-дорожной сети (УДС). Целью исследования являлось улучшение условий мобильности в г. Волгограде.

Задачи исследования:

– анализ существующих дорожно-транспортных проблем в Волгограде, а также методов решения этих проблем;

– улучшение условий функционирования для повышения безопасности и качества дорожного движения за счет принятия проектных решений и их оценки на основе макромоделирования на УДС Волгограда и на основе микромоделирования при введении реверсивного движения на Волжской ГЭС, реконструкции узла на ул. Мира и развязки на 3-й Провольной («Самарский разъезд»);

– разработка методологии повышения качества жизни жителей и гостей города за счет улучшения условий мобильности.

Решение и оценка дорожно-транспортных проблем города

Качество исходных данных как для макромоделей, так и для микромоделей определяет качество модели на выходе. На рис. 3 представлен участок УДС Волгограда с загрузкой транспортом. Представленный участок – выдержка из комплексной схемы организации дорожного движения (КСОДД) Волгограда.



Рис. 3. Участок картограммы транспортного спроса участка УДС Волгограда в вечерний пиковый период, по данным 2018 г. (по результатам макромоделирования) [10]

Результат выполненного в программном комплексе AimSun макромоделирования базового (2018 г.) и проектного (2033 г.) сценариев в сетевых параметрах агломерации [10] представлен в таблице.

Согласно результатам макромоделирования после проведения дорожно-транспортных изменений, представленных в [10], расчетные сетевые параметры улучшаются от 6,4 до 26,2 %.

Оценка пропускной способности при изменении конфигурации пересечения дорог (например, перевод регулируемого или нерегулируемого пересечения в кольцевое) в Волгограде периодически проводится на основе натурного эксперимента (установка водоналивных блоков), а не с помощью микромоделирования. Микромодели транспортных узлов и узких линейных участков позволяют оценить уровень загрузки, задержки и длину очереди.

В результате микромоделирования (рис. 4, а) при реконструкции двух пересечений на ул. Мира в Волгограде и введении светофорного регулирования установлено, что средняя длина очереди составила 20 м, максимальная длина очереди – 83 м, средняя задержка – до 27 с.

Малое применение расчетных методик оценки пропускной способности, длин очередей, задержек, уровня обслуживания транспортных потоков на пересечениях различных типов при выполнении проектных работ приводит к проблемам на узких участках УДС города. Управленческие решения иногда провоцируют транспортные проблемы. Например, сокращение первоначально запланированных сроков ремонта Волжской ГЭС привело к необходимости устройства реверсивного регулирования вместо проезда по двум полосам, при этом резко выросли очереди автомобилей на ГЭС, произошло перераспределение транспортной нагрузки на мост через р. Волгу и в районах подхода (рис. 4, б). По результатам микромоделирования на ГЭС при введении реверсивной полосы установлено, что пропускная способность одной полосы светофорного объекта составила 560 ед./ч, а средняя скорость образования очереди при максимальной интенсивности на одной полосе 913 ед./ч составляет 2,5 км/ч. И она будет увеличиваться до тех пор, пока интенсивность автомобилей не упадет до показателя 560 ед./ч.

Результат макромоделирования базового и проектного сценариев в сетевых параметрах

Расчетный сетевой параметр	Базовый сценарий (2018 г.)	Проектный сценарий (2033 г.)	Изменение расчетного сетевого параметра, %
Средняя загруженность всей сети, %	6,54	5,83	-10,9
Общая протяженность поездок, км	1 376 940	1 288 410	-6,4
Время в пути для всех поездок, мин	2 514 750	1 868 910	-25,7
Средняя скорость всех поездок, км/ч	31,16	39,32	+26,2

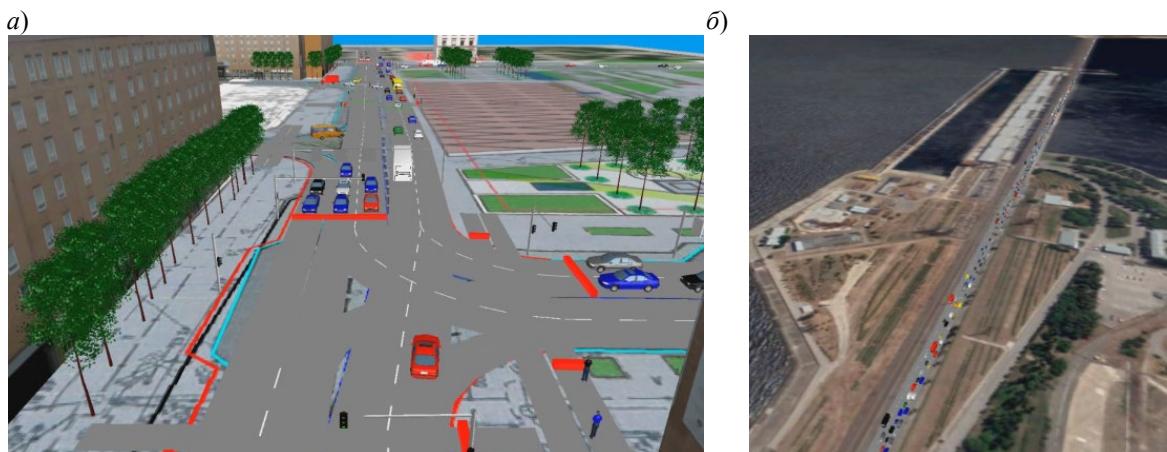


Рис. 4. Применение микромоделирования для поиска решения дорожно-транспортных проблем:
а – вариант реконструкции ул. Мира в Волгограде; б – оценка введения реверсивной полосы
при ремонте Волжской ГЭС

Международная программа по повышению безопасности дорожного движения и снижению смертности в дорожно-транспортных происшествиях Vision Zero (рис. 5) является ориентиром во многих странах мира.

В крупном городе роль светофорного регулирования как для повышения пропускной способности, так и для повышения БДД является весьма значимой. Предлагается следующая методология повышения безопасности и качества дорожного движения (рис. 6).

В настоящий момент на УДС Волгограда для осуществления оперативного управления установлено малое количество датчиков, фиксирующих изменения в транспортных нагрузках, поэтому оперативное вмешательство в управление транспортными потоками сложно реализуемо.

Кроме качества и безопасности дорожного движения важным для жителей и гостей города является устройство мест притяжения. Примером может служить благоустройство участка улицы в Зальцбурге при проведении праздника в 2010 г. (рис. 7).

Практическая реализация и оценка эффективности

В Волгограде проводится много мероприятий, направленных на повышение качества и безопасности дорожного движения. Так, например, на основе микромоделирования была проведена реконструкция пересечения дорог с устройством поворотов налево через развязку в двух уровнях (рис. 8). В транспортной модели проработан способ организации проезда транспортного узла с отнесенными левыми поворотами.

Основными проектными решениями модели стали:

- устройство новых и реконструкция существующих остановок общественного транспорта на транспортном узле;
- изменение режимов работы, реконструкция и строительство новых светофорных объектов;
- расширение въезда до двух полос на 3-ю Продольную магистраль с ул. им. Землячки;
- уменьшение полос движения на 3-й Продольной магистрали для обеспечения беспрепятственного въезда с ул. им. Землячки;

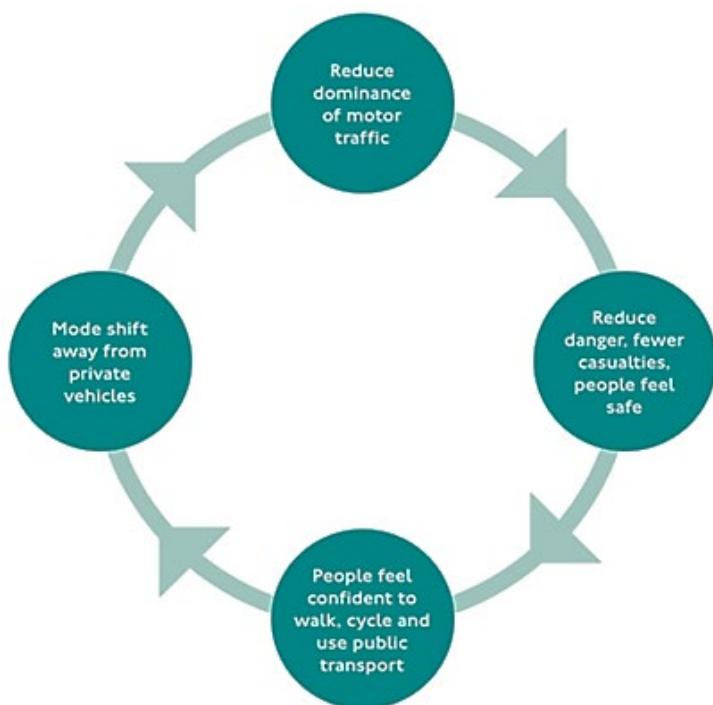


Рис. 5. Схема повышения безопасности дорожного движения на дорогах*

* Vision Zero action plan : Taking forward the Mayor's Transport Strategy. L., 2018. 56 p. URL: <http://content.tfl.gov.uk/vision-zero-action-plan.pdf>.



Рис. 6. Основы методологии управления транспортными потоками в крупном городе при светофорном регулировании [11]



Рис. 7. Реконструкция дороги в Зальцбурге на время проведения праздника в 2010 г.

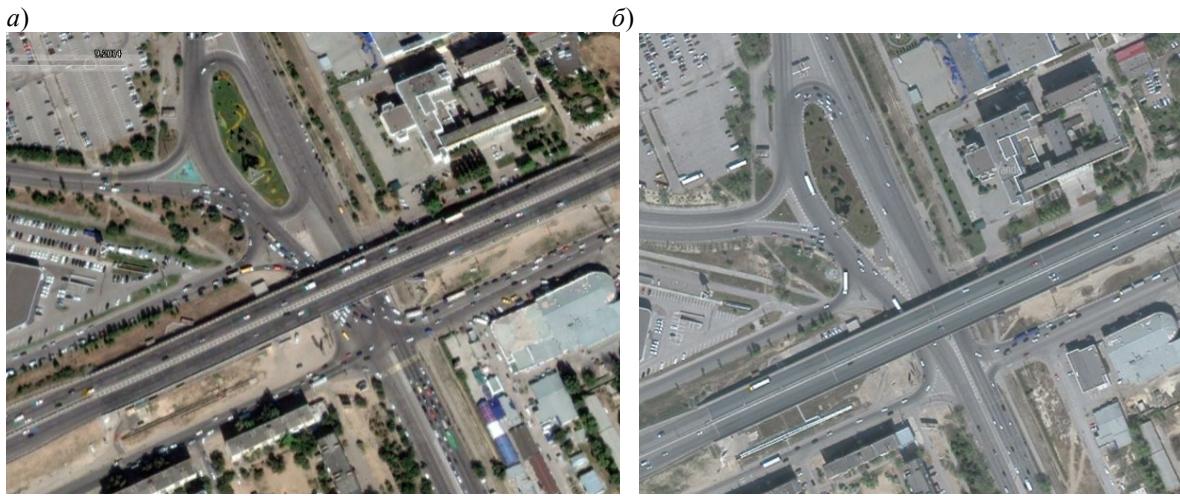


Рис. 8. Развязка в разных уровнях в Волгограде:
а – до реконструкции (2014 г.); б – после реконструкции (2020 г.) с организацией поворотов
налево через 3-ю Продольную магистраль

- запрещение левого поворота с ул. им. Землячки на пр-т им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова и обратно;
- запрещение въезда и выезда на съезд, соединяющий 3-ю Продольную магистраль и пр-т им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова со стороны ул. Историческая;
- расширение проезда на участке разворота у ш. Авиаторов;
- отнесение пешеходных переходов с пе-рекрестка «пр-т им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова – ул. им. Землячки» вглубь транспортного узла.

К методам повышения БДД относится использование специальных элементов, обеспечи-

вающих вынужденное (гарантированное) соблюдение водителями необходимых скоростных режимов, обоснованных для безопасности движения, в виде искусственных препятствий, изменяющих траекторию движения транспортных средств. Кроме повышения БДД предлагается благоустройство участка улицы с устройством зоны паркет (рис. 9).

На основе проведенного анализа предлагаются методология повышения качества жизни жителей и гостей городов за счет улучшения условий мобильности (рис. 10). Отличием предложенной методологии улучшения условий мобильности от аналогичных разработок [3–9] является разработанная система методов

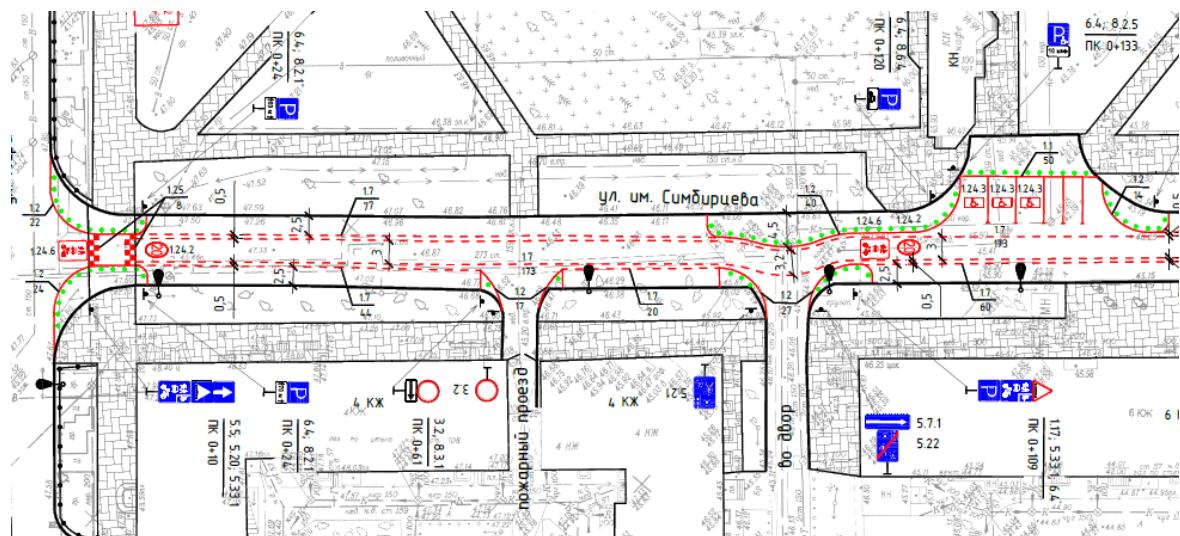


Рис. 9. Проект (2021 г.) участка велозоны в Волгограде с искусственным препятствием
(зоны паркет) для принудительного снижения скорости транспортных средств



Rис. 10. Методология повышения качества жизни жителей и гостей городов за счет улучшения условий мобильности

управления транспортными потоками в крупном городе при светофорном регулировании (см. рис. 6).

Заключение

На многих проблемных участках УДС Волгограда за последнее десятилетие было достигнуто снижение уровня загрузки на основе проведенного микро- и макромоделирования. Несмотря на большое количество направленных на повышение БДД мероприятий, на УДС Волгограда за последние пять лет удалось добиться только снижения числа погибших (от 90 до 58 чел. в год) при ДТП, количество раненых остается относительно стабильным (от

1 200 до 1 600 чел. в год). Для реализации стратегии Vision Zero необходимы не только прикладные разработки, но и фундаментальные исследования.

Предложена методология повышения качества жизни жителей и гостей городов за счет улучшения условий мобильности. Оценка новых проектных решений (реконструкция в узлах, строительство новых участков, изменение режимов работы светофорных объектов) проводилась с использованием макро- и макромоделирования. Разработанные транспортные модели (см. рис. 3, 4) позволили принять решение об их реализации на практике.

Список источников

1. Витолин С. В. Совершенствование транспортных потребительских свойств изолированных регулируемых перекрестков улично-дорожной сети города : дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2014. 169 с.
2. Концепция повышения эффективности содержания и реконструкции инженерных сооружений автомобильных дорог / В. С. Воробьев, О. А. Бендер, Е. А. Карелина, К. В. Каталымова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2 (45). С. 11–18.
3. Li Y., Wang F. Beijing's development strategy of population, traffic and land use: comparison with Tokyo's metropolitan areas // Econ. Geogr. 2017. Vol. 37. P. 5–14.
4. Li B. Transport congestion rehabilitation measures for mega city: Taking Shanghai as an example // China Transp. Rev. 2016. Vol. 38. P. 1–18.
5. Use of science to guide city planning policy and practice: How to achieve healthy and sustainable future cities / J. Sallis, F. Bull, R. Burdett [et al.] // Lancet. 2016. Vol. 388. P. 2936–2947.
6. Shao R., Duan J., Wang L. Reconstruction of street and alley system for life in modern cities // Planners. 2016. Vol. 12. P. 91–96.
7. Moriarty P., Honnery D. Low-mobility: The future of transport // Futures. 2008. Vol. 40. P. 865–872.
8. Parysek J., Mierzejewska L. Spatial structure of a city and the mobility of its residents: Functional and planning aspects // Bull. Geogr. Socio-Econ. Ser. 2016. Vol. 34. P. 91–102.

9. Changes in mode of travel to work: a natural experimental study of new transport infrastructure / E. Heinen, J. Panter, R. Mackett and D. Ogilvie // International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity. 2015. Vol. 12 (1), 81. P. 1–10. DOI 10.1186/s12966-015-0239-8.

10. Отчет о научно-исследовательской работе: разработка (актуализация) программы комплексного развития транспортной инфраструктуры, комплексной схемы организации дорожного движения с приложением к ней комплексной схемы организации транспортного обслуживания населения в границах Волгоградской агломерации (муниципальный контракт от 22.10.2018 № 3892) / Строй Инвест Проект. М., 2018. С. 737.

11. Витолин С. В. Основы методологии управления транспортными потоками на улично-дорожной сети крупного города при светофорном регулировании // Мир транспорта. 2020. Т. 18, № 4. С. 148–155.

References

1. Vitolin S. V. Improving the transport consumer properties of isolated regulated intersections of the city's street and road network: dis. ... cand. tech. Sciences. Volgograd; 2014. 169 p. (In Russ.).
2. Vorobyov V. S., Bender O. A., Karelina E. A., Katalymova K. V. The concept of improving the efficiency of maintenance and reconstruction of engineering structures of highways. *Bulletin of the Siberian State University of Communications*. 2018;2(45):11–18. (In Russ.).
3. Li Y., Wang F. Beijing's development strategy of population, traffic and land use: comparison with Tokyo's metropolitan areas. *Econ. Geogr.* 2017;(37):5–14.
4. Li B. Transport congestion rehabilitation measures for mega city: Taking Shanghai as an example. *China Transp. Rev.* 2016;38:1–18.
5. Sallis J., Bull F., Burdett R. [et al.]. Use of science to guide city planning policy and practice: How to achieve healthy and sustainable future cities. *Lancet*. 2016;(388):2936–2947.
6. Shao R., Duan J., Wang L. Reconstruction of street and alley system for life in modern cities. *Planners*. 2016;(12):91–96.
7. Moriarty P., Honnery D. Low-mobility: The future of transport. *Futures*. 2008;(40):865–872.
8. Parysek J., Mierzejewska L. Spatial structure of a city and the mobility of its residents: Functional and planning aspects. *Bull. Geogr. Socio-econ. Ser.* 2016;(34):91–102.
9. Heinen E., Panter J., Mackett R., Ogilvie D. Changes in mode of travel to work: a natural experimental study of new transport infrastructure. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 2015;12(1), 81:1–10. DOI 10.1186/s12966-015-0239-8.
10. Report on research work: development (updating) of a program for the integrated development of transport infrastructure, an integrated scheme for organizing traffic with an application to it of an integrated scheme for organizing transport services for the population within the boundaries of the Volgograd agglomeration (municipal contract dated 10/22/2018 No. 3892). Stroy Invest Project. M.; 2018. 737 p. (In Russ.).
11. Vitolin S. V. Fundamentals of the methodology for managing traffic flows on the street and road network of a large city with traffic light regulation. *World of Transport*. 2020;18(4):148–155. (In Russ.).

Информация об авторах

С. В. Витолин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений» Волгоградского государственного технического университета.

А. М. Лукьянков – магистрант кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений» Волгоградского государственного технического университета.

Information about the authors

S. V. Vitolin – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Construction and Operation of Transport Structures, Volgograd State Technical University.

A. M. Lukyanskov – a master student of the Department of Construction and Operation of Transport Structures, Volgograd State Technical University.

Статья поступила в редакцию 04.09.2021; одобрена после рецензирования 27.09.2021; принятая к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 04.09.2021; approved after reviewing 27.09.2021; accepted for publication 17.01.2022.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 625.1:629.4+06

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_38

Совершенствование методологических и технико-технологических решений по закреплению перспективных видов подвижного состава на станционных железнодорожных путях

Олег Николаевич Числов^{1✉}, Александр Михайлович Ильин²

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, o_chislov@mail.ru✉

² Ростовский центр организации работы железнодорожных станций – СП Северо-Кавказской дирекции управления движением – филиал ОАО «РЖД», Ростов-на-Дону, Россия, am.ilin.83@mail.ru

Аннотация. Организация работы железнодорожного транспорта неотъемлемо связана с обеспечением безопасности движения. В настоящее время важное значение приобретает расчет закрепления разнородного по длине перспективного грузового подвижного состава на приемо-отправочных путях с переменным профилем. Существующие методологические решения по расчету норм закрепления необходимо совершенствовать в части расчета количества тормозных башмаков. В работе представлено развитие методики моделирования и расчета норм закрепления разнородного по длине и инновационного сочлененного подвижного состава на железнодорожных путях. Разработаны схемы приложения сил, действующих на закрепленный разнородный подвижной состав на железнодорожных путях с профилем «гора». Предложено развитие метода определения сочетания сил за счет более точного итерационного расчета результирующей силы, действующей на каждую ось закрепляемого состава, и ее суммирования с учетом ветровой нагрузки. Предлагается единый методологический подход с вариантами расчета в зависимости от типа подвижного состава: первый вариант на основе использования известных формул с учетом итерационного повагонного расчета средств закрепления и значений средних уклонов пути; второй вариант основан на использовании уточненных формул определения сил и итерационного поосного расчета средств закрепления в зависимости от уклонов под каждой осью вагона. В качестве расчетной единицы используется вагон, в случае занятия вагоном смежных участков продольного профиля пути за единицу принимается каждая ось вагона в отдельности. Представлен интерфейс авторской программы расчета норм закрепления подвижного состава. Разработанная методика и полученные значения норм закрепления позволят исключить ошибки, связанные с человеческим и технологическим факторами, а также обеспечить точный расчет количества тормозных башмаков при учете физических данных закрепляемого подвижного состава и характеристик продольных профилей путей.

Ключевые слова: физико-математическая модель, инновационный подвижной состав, продольный профиль пути, тормозной башмак, нормы закрепления, схема приложения сил

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51014.

Для цитирования: Числов О. Н. Ильин А. М. Совершенствование методологических и технико-технологических решений по закреплению перспективных видов подвижного состава на станционных железнодорожных путях // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 38–48. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_38.

TRANSPORT

Original article

Improvement of methodological and technico-technological solutions for fixing promising types of rolling stock on station railway tracks

Oleg N. Chislov^{1✉}, Alexander M. Ilyin²

¹ Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, o_chislov@mail.ru✉

² The Rostov center for organizing the work of railway stations is a joint venture of the North Caucasian Directorate of Traffic Control, a branch of Russian Railways, Rostov-on-Don, Russia, am.ilin.83@mail.ru

Abstract. The organization of the railway transport work is inherently connected with ensuring traffic safety. Currently, it is important to calculate the fixing of promising freight rolling stock with a heterogeneous length on the receiving and forwarding tracks with a variable profile. The existing methodological solutions for calculating the fixing standards require improvement in terms of calculating the number of brake shoes. The paper presents the development of a methodology for modeling and calculating the norms for fixing heterogeneous in length and innovative articulated rolling stock on railway tracks. Schemes of application of forces acting on fixed heterogeneous rolling stock on railway tracks with a “mountain” profile have been developed. The development of the method for determining the combination of forces is proposed due to a more accurate iterative calculation of the resulting force acting on each axis of the fixed composition, and its summation taking into account the wind load. A unified methodological approach is proposed with calculation options depending on the type of rolling stock: the first option is based on the use of known formulas, taking into account the iterative car-by-car calculation of fixing means and the values of average track slopes; the second option is based on the use of refined formulas for determining forces and iterative axial calculation of fixing means depending on the slopes under each axle of the car. The car is used as the calculation unit, in the case of the car occupying adjacent sections of the longitudinal profile of the track, each axis of the car is taken as a unit separately. The interface of the author's program for calculating the norms of fixing rolling stock is presented. The developed methodology and the obtained values of the fixing standards will allow eliminating errors related to human and technological factors, as well as providing an accurate calculation of the number of brake shoes when taking into account the physical data of the fixed rolling stock and the characteristics of the longitudinal profiles of the tracks.

Keywords: physical and mathematical model, innovative rolling stock, longitudinal track profile, brake shoe, fixing standards, force application scheme

Funding: the study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, NTU Sirius, Russian Railways, and the Talent and Success Educational Foundation within the framework of research project No. 20-38-51014.

For citation: Chislov O. N., Ilyin A. M. Improvement of methodological and technico-technological solutions for fixing promising types of rolling stock on station railway tracks. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):38–48. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_38.

Введение

Эксплуатационная деятельность железнодорожного транспорта неотъемлемо связана с обеспечением безопасности движения. Требуют непреложного исполнения ГОСТы, правила, инструкции [1–4] и другие нормативные документы по безопасности станционных транспортно-технологических процессов, нормам закрепления подвижного состава, охране труда и т. п. Следует учесть, что нарушения норм закрепления могут привести к несанкционированному движению подвижного состава, произвести расчет ущерба от которого часто не представляется возможным из-за последствий крушения или аварии (рис. 1).

В настоящее время особо важное значение приобретает расчет закрепления разнородного по длине перспективного (сочлененного) грузового подвижного состава на станционных приемо-отправочных путях переменного профиля. Существующие методологические решения по расчету норм закрепления требуют совершенствования в части расчета количества тормозных башмаков вследствие разнородности профилей станционных путей. Выполненный анализ 373 продольных профилей приемо-отправочных путей 16 основных станций Северо-Кавказской железной дороги –

филиала ОАО «РЖД» показал, что 45 % профилей путей относится к типу «гора», 23 % – к монотонному типу, 20 % – к пилообразному и 12 % – к вогнутому. Известно, что наиболее проблемным типом продольного профиля железнодорожного пути, на котором необходимо производить закрепление подвижного состава, с точки зрения безопасности станционных технологических процессов, является продольный профиль типа «гора». Именно данный тип продольного профиля преобладает на путях рассматриваемых станций.

Исследование вопросов закрепления подвижного состава было начато с момента строительства первых железных дорог. Отечественный научный опыт в данном направлении был заложен трудами известных ученых – докторов технических наук В. Н. Образцова, С. Д. Корейши, В. Н. Никитина, Е. А. Сотникова, В. П. Шейкина, К. С. Исаева, кандидатов технических наук В. А. Рудановского, И. П. Старшова, М. В. Стрелкова, В. А. Буракова, С. К. Цымбала, инженера Н. И. Пачеса и др. В ведущих научно-исследовательских институтах и вузах страны (ВНИИЖТ, НИИАС, РУТ (МИИТ) и др.) продолжаются исследования проблем закрепления вагонов в рамках научных школ (проф. В. М. Лисенков, И. Н. Розенберг, А. М. За-



Рис. 1. Диаграмма причинно-следственных связей несанкционированного движения подвижного состава

* У каждого устройства закрепления есть перечень положительных характеристик, но имеются и недостатки. Например, тормозной башмак – простое, универсальное средство, но оно не позволяет производить закрепление подвижного состава на путях, имеющих уклоны больше 2,5 %, не оборудованных устройствами, предохраняющими выход подвижного состава на маршруты следования поездов, а также требует использования ручного труда. Затруднено производство наката колесными парами на полозья тормозных башмаков при использовании их в количестве более 10 шт.

** Нормы закрепления, содержащиеся в техническо-распорядительных актах станций, рассчитаны для составов поездов, одинаковых по роду (количеству осей и длине по осям автосцепок). Однако требуется расчет норм закрепления для различного по роду подвижного состава (вагонов условной длины, короткобазных, длиннобазных, пассажирских и др.). Затруднения в расчетах будут еще значительнее при включении в составы поездов перспективных вагонов сочлененного типа и восьмиосного подвижного состава, т. е. различного по количеству осей и длине по осям сцепления автосцепок. Также затруднен расчет норм закрепления башмаков в произвольном месте пути, имеющего продольный профиль «гора», вследствие чего требуется выполнение нескольких расчетов норм закрепления для одного и того же пути.

мышляев, И. А. Ольгейзер, Н. А. Коваленко, Р. А. Ефимов, В. А. Кобзев, А. В. Саврухин и др.).

Обоснование актуальности развития методики расчета норм закрепления

В настоящее время на сети дорог остаются нерешенными проблемы, связанные с расчетом норм закрепления подвижного состава. Сложность заключается в том, что существующая методика расчета актуальна для составов, состоящих из вагонов с одинаковыми длинами по осям автосцепок и с одинаковым количеством осей, которые составляют около 20 % от общего количества грузовых поездов

[5–7]. Нормы закрепления для составов, состоящих из различных по длине и количеству осей вагонов, отсутствуют.

При включении в составы грузовых поездов, вагонов, различных по длине и массе, появляется риск того, что нормы закрепления в одних случаях будут недостаточны, а в ряде других случаев – избыточны. Наиболее актуальна данная проблема для станционных путей с продольным профилем типа «гора».

Существующий способ расчета не позволяет определять количество тормозных башмаков, необходимых для закрепления грузо-

вых поездов, в составе которых имеются варианты сочетания типов разноосных вагонов, а также перспективный подвижной состав сочлененного типа на трех двухосных тележках (например, шестиосный вагон-хоппер для перевозки минеральных удобрений и зерна, модель 19-6978-01 сочлененного типа, грузоподъемность 113,5 т, тара 35,8 т; шестиосный вагон-цистерна для перевозки сжиженных углеводородных газов, модель 19-9541-01 сочлененного типа, грузоподъемность 90 т, тара 57,9 т), особенно если сочленение вагонов попадает на перелом профиля типа «гора».

Нормы закрепления необходимо определять индивидуально для конкретного состава поезда в зависимости от физических условий.

Физико-математическая модель закрепляемого подвижного состава

Для решения данной проблемы предлагается авторское развитие существующего метода расчета норм закрепления, включающее единый методологический подход с двумя вариантами расчета:

– I-й вариант расчета основан на использовании формул, приведенных в [3], с учетом итерационного повагонного расчета средств закрепления и значений средних уклонов пути (для однородного подвижного состава или близкого к однородному) [7];

– II-й вариант расчета основан на использовании формул определения сил, действующих на статический подвижной состав, и в авторской интерпретации итерационного поосного расчета средств закрепления в зависимости от

уклонов под каждой осью вагона (для разнодородного и сочлененного подвижного состава).

Схема приложения сил, действующих на закрепляемый подвижной состав, представлена на рис. 2.

В обоих вариантах необходимо определить уклоны, на которых располагается каждая подвижная единица закрепляемого состава. В первом варианте в качестве единицы используется вагон, когда требуется определить уклон, в том числе спрямленный. При расположении вагона на элементах профиля с разными уклонами требуется определение спрямленного уклона, определяемого по длине вагона по осям автосцепки.

Во втором варианте за единицу принимается каждая ось вагона в отдельности, когда определяется величина действующих на подвижной состав сил: сила тормозного действия башмаков при трогании с места, сила трения состава при трогании с места, результирующая сила воздушного напора вдоль пути, тангенциальная составляющая силы тяжести состава. При расчете тангенциальной составляющей силы тяжести состава рассматривается воздействие данной силы для каждой оси колесной пары вагона в отдельности, а затем производится суммирование данных сил.

Силы, действующие на неподвижно стоящий (закрепленный) на станционном пути подвижной состав, должны удовлетворять условию равновесия

$$\sum F_o + \sum W_{tp} = W_{bt} + \sum Q_t, \quad (1)$$

где $\sum F_o$ – сила тормозного действия башмаков при трогании с места; $\sum W_{tp}$ – сила трения со-

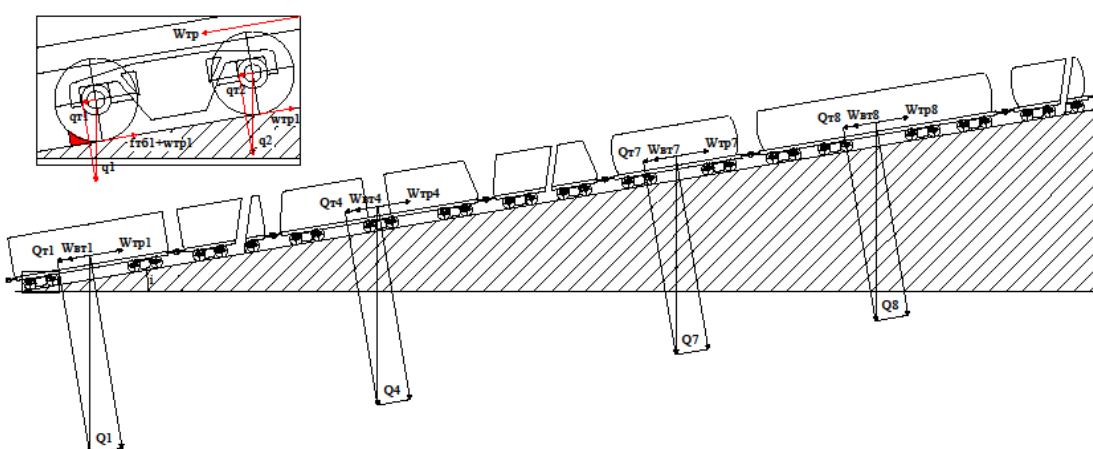


Рис. 2. Схема приложения сил на закрепляемый грузовой состав

става при трогании с места; $W_{\text{вт}}$ – составляющая силы воздушного напора вдоль пути; Q_{τ} – тангенциальная составляющая силы тяжести, рассчитанная для каждой оси вагона в отдельности.

Значения сил определяются по формулам:

$$\sum F_0 = \sum_{i=1}^{k_6} f_{0j} q_{0j} 10^3; \quad (2)$$

$$\sum W_{\text{тр}} = \sum nq_i w_{\text{тр}}; \quad (3)$$

$$W_{\text{вт}} = \frac{17,8(4C_x + (n-4)C_{xx})S}{4(273+t)} v_{\text{вт}}^2; \quad (4)$$

$$\sum Q_{\tau} = \sum nq_i i, \quad (5)$$

где k_6 – количество тормозных башмаков; f_{0j} – коэффициент трения сталь по стали; q_{0j} – нагрузка на ось, под которую положен тормозной башмак, т/ось; n – количество осей подвижного состава; q_i – нагрузка на ось состава, т/ось; $w_{\text{тр}}$ – удельное сопротивление состава при трогании с места, кгс/тс; C_x – коэффициент воздушного сопротивления одиночного вагона; C_{xx} – коэффициент воздушного сопротивления группы вагонов в середине состава; S – мидель (площадь поперечного сечения) вагона, м^2 ; t – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $v_{\text{вт}}$ – скорость ветра, $\text{м}/\text{с}$; i – уклон пути, %.

Так как на практике условия закрепления отличаются от расчетных (идеальных), то для надежности норм закрепления введем дополнительную поправку – среднеквадратические отклонения удельного сопротивления сил трения при трогании состава с места и силы тормозного действия башмаков при трогании с места, предложенные в работах [8–10].

С учетом среднеквадратических отклонений удельного сопротивления сил трения при трогании состава с места и силы тормозного действия башмаков при трогании с места уравнение равновесия (1) примет вид

$$\begin{aligned} \sum nq_i i + \frac{17,8(4C_x + (n-4)C_{xx})S}{4(273+t)} v_{\text{вт}}^2 = \\ = \sum_{i=1}^{k_6} f_{0j} q_{0j} 10^3 + \sum nq_i w_{\text{тр}} - \\ - t_x \sqrt{\sum_{i=1}^{k_6} \sigma_{fj}^2 q_{0j}^2 10^6 + nn\sigma_w^2 q_i^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где σ_{fj} – среднеквадратическое отклонение коэффициента тормозного действия башмака при трогании с места; σ_w – среднеквадратическое отклонение удельного сопротивления трогания вагонов, кгс/тс; t_x – доверительный интервал, равный трем. Постоянные вели-

чины принимаются равными значениям, указанным в работе [4]: $C_x = 1,76$, $C_{xx} = 0,88$, $S = 8,5 \text{ м}^2$, $f_{0j} = 0,15$, $w_{\text{тр}} = 1 \text{ кгс/тс}$, $t_x = 3$, $\sigma_{fj} = 0,055$, $\sigma_w = 0,25 \text{ кгс/тс}$.

Для расчетов значений сил тормозного действия башмаков при трогании с места, сил трения при трогании состава с места, результирующей силы воздушного напора вдоль пути и тангенциальной составляющей силы тяжести необходимо определить осевые нагрузки подвижного состава (по данным о весе вагонов в информационных системах ОАО «РЖД»).

Затруднение вызывает расчет воздействия тангенциальной составляющей силы тяжести, которую необходимо определить для каждой оси отдельно. Для определения данной силы необходимо знать координату каждой оси на продольном профиле пути. Хотя данные сведения известны и определены для каждого вагона, эксплуатируемого на сети ОАО «РЖД», они не содержатся в информационных базах ОАО «РЖД». Для реализации данной методики необходимо внести в базы данных информацию о расстояниях каждой оси вагона относительно осей автосцепок. Для определения тангенциальной составляющей силы тяжести необходимо уточнить расположение состава относительно элементов продольного профиля пути. Данную операцию можно выполнить путем разметки мест установки крайних вагонов на путях. Как вариант, возможно нанести ряд отметок на шейках рельсов, которые можно привязать к длинам локомотивов, эксплуатируемых на станциях, либо нанести разметку в зоне закрепления через каждые 10 м. При закреплении необходимо произвести установку подвижного состава путем совмещения оси крайней автосцепки с одной из отметок. Производится привязка размещения подвижного состава к продольному профилю пути. Имея информацию о координатах каждой оси вагона, можно определить координаты расположения каждой оси закрепляемого подвижного состава относительно элементов продольного профиля пути, а затем произвести расчет величин уклонов пути, на которых располагается каждая ось закрепляемого состава.

Алгоритм модифицированного метода расчета и его апробация

Для формирования алгоритма определения норм закрепления помимо данных о расположении каждой оси эксплуатируемого подвижного состава необходимо сформировать электронный массив информации, который должен содержать сведения о характеристиках продольных профилей путей станций и закрепить данную информацию за каждой железнодорожной станцией в отдельности. С целью повышения точности многовариантного способа определения норм закрепления подвижного состава составлена программа расчета в табличном процессоре *MS Excel*. Для повышения автоматизации расчета предлагаемый алгоритм планируется использовать в программном комплексе, который будет автоматически подгружать данные состава из электронных систем, действующих в ОАО «РЖД».

В алгоритме расчета принято условие, при котором воздействие силы воздушного напора вдоль пути будет независимо от его направления, т. е. при определении количества тормозных башмаков, которые необходимо уложить с головы состава, принято условие воздействия ветра с хвоста состава в голову, а при определении количества тормозных башмаков с хвоста состава, воздействие от воздуш-

ной среды принято с головы в хвост. В алгоритм расчета внесено условие, при котором воздействие ветра происходит при угле между вектором ветра и вектором оси пути, равном 30°. Фактическое направление ветра целесообразно учитывать при достижении его скорости до значений свыше 5–6 м/с.

Рассмотрим пример расчета норм закрепления для состава, характеристики которого приведены в табл. 1, на пути, имеющего характеристики продольного профиля, приведенные в табл. 2.

Принято условие расположения подвижного состава у границы полезной длины с нечетной стороны. Расчет координат каждой оси колесной пары рассматриваемых вагонов относительно осей автосцепок приведен в табл. 3.

На основе данных длин вагонов по осям автосцепок определяются координаты каждой оси автосцепки вагона рассматриваемого состава (столбец 6 табл. 1). Расчет нагрузки на каждую ось вагонов приведен в столбце 7 табл. 1. Далее производится определение уклонов, на которых находится каждая ось колесной пары вагонов, через определение координат их расположения на продольном профиле пути. Расчеты сведены в табл. 4. Рассчитываются значения Q_t для каждого вагона, производится вычисление воздействия сил на

Таблица 1

Параметры закрепляемого подвижного состава

Порядковый номер вагона	Род вагона	Длина вагона, м	Количество осей	Вес брутто вагона, т	Расстояние от оси автосцепки головного вагона до оси автосцепки последующих вагонов, м	Нагрузка брутто на оси вагонов, т/ось
1	2	3	4	5	6	7
1	Полувагон	13,92	4	40	13,92	10,0
2	Полувагон	13,92	4	80	27,84	20,0
3	Полувагон	13,92	4	80	41,76	20,0
4	Сочлененный	19,54	6	120	61,30	20,0
5	Сочлененный	19,54	6	120	80,84	20,0
6	Сочлененный	19,54	6	115	100,38	19,2
7	Цистерна 4	12,02	4	82	112,40	20,5
8	Цистерна 8	21,12	8	140	124,42	17,5
9	Цистерна 8	21,12	8	140	136,44	17,5

Таблица 2

Данные продольного профиля приемо-отправочного пути типа «гора»

Характеристика продольного профиля	Порядковый номер элемента профиля пути										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Длина элемента пути, м	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	46
Уклон элемента пути, м	1,5	2,2	2,0	1,6	1,7	2,3	1,9	2,4	1,4	-2,4	-2,39
Расстояние с нарастающим итогом, м	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	546

Таблица 3

Расстояние от осей автосцепок вагонов до осей колесных пар, м

Порядковый номер оси	Полувагон	Цистерна четырехосная	Цистерна восьмиосная	Сочлененный шестиосный вагон
1	1,71	1,185	1,14	1,825
2	3,56	3,035	2,99	3,675
3	10,36	8,985	5,265	8,845
4	12,21	10,835	7,115	10,695
5	—	—	14,93	15,865
6	—	—	16,78	17,715
7	—	—	18,13	—
8	—	—	19,98	—

подвижной состав отдельно для 1-го вагона с головы, затем для 1-го и 2-го, затем для 1-го, 2-го и 3-го и т. д., вплоть для всего состава с нарастающим итогом.

Производится выбор оси вагона, под которую планируется наиболее рационально уложить тормозной башмак, т. е. она должна иметь наибольшую нагрузку, учитывая требование об обязательном закреплении крайних вагонов. Получаются итоговые значения результирующих сил, действующих на состав.

Из полученных значений, для выполнения условия гарантированного удержания подвижного состава в случае саморасцепа, выбирается минимальное положительное значение. В случае, когда результирующая сила меньше нуля, производится дополнительная укладка тормозных башмаков до тех пор, пока результирующее значение итоговой силы не станет положительным. Аналогично рассчитываются необходимое количество тормозных башмаков, которые необходимо уложить с противоположной стороны.

Пример расчета результирующих сил приведен в табл. 5.

Вид интерфейса разработанной программной страницы по определению норм закрепления приведен на рис. 3.

Пояснения к рис. 3:

- в строку 4 вносятся условия закрепления;
- в столбцы *C–F* (начиная с 7-й строки) вносится информация из АСУ станции;
- в столбец *I*, начиная с 7-й строки, вносится информация о планируемой раскладки тормозных башмаков с нечетной стороны, в столбец *J* – с четной стороны;
- в столбцах *H* и *K* выводится информация о величинах результирующих сил, действующих на состав.

Из столбца 8 табл. 5 следует, что после укладки двух тормозных башмаков под голов-

ной вагон минимальный запас результирующей силы имеет положительное значение и составляет 0,904 тс. С четной стороны укладка тормозных башмаков не требуется, так как минимальная результирующая сила имеет положительное значение до укладки тормозных башмаков и составляет 0,249 тс. При укладке одного тормозного башмака под головной вагон минимальная результирующая сила будет иметь отрицательное значение, равное -0,249 тс. Это означает, что одного тормозного башмака, уложенного с нечетной стороны, будет недостаточно для гарантированного удержания состава.

Выводы

Данный подход к развитию методики расчета позволит исключить нарушения норм закрепления, связанные с ошибками:

- человеческого фактора – невнимательность при использовании большого массива табличных данных, содержащихся в технически-распорядительных актах станций;
- расчетного характера – на этапе принятия решения об однородности / разнородности закрепляемого подвижного состава, производимого в соответствии с установленным ранее порядком;
- технологического характера – риск закрепления подвижного состава на участках станционных путей, имеющих средний уклон более 2,5 % (в настоящее время определить фактическое значение среднего уклона пути, на котором располагается подвижной состав, состоящий из разнородных по типу и длине вагонов, также не представляется возможным).

Основное достоинство предложенного развития метода определения норм закрепления заключается в уточненном расчете количества тормозных башмаков при учете физических данных закрепляемого подвижного состава и характеристик продольных профилей путей.

Таблица 4

Расчет расстояний между осью автосцепки головного вагона до осей каждой колесной пары последующих вагонов

Показатель	Номер вагона								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Расстояние каждой оси колесной пары относительно оси сцепления крайней с головы состава автосцепки вагона, м	1,71								
	3,56	15,63							
	10,36	17,48	29,55						
	12,21	24,28	31,4	43,585					
		26,13	38,2	45,435	63,125				
			40,05	50,605	64,975	82,665			
				52,455	70,145	84,515	101,57		
					57,625	71,995	89,685	103,42	113,54
					59,475	77,165	91,535	109,37	115,39
						79,015	96,705	111,22	117,67
							98,555		136,51
								119,52	138,79
								127,33	140,64
								129,18	148,45
								130,53	150,3
								132,38	151,65
									153,5
Значение уклонов, на которых располагается каждая ось вагона рассматриваемого состава, %	1,5								
	1,5	1,5							
	1,5	1,5	1,5						
	1,5	1,5	1,5	1,5					
	1,5	1,5	1,5	2,2					
		1,5	2,2	2,2	2,2				
			2,2	2,2	2,2	2			
				2,2	2,2	2	2		
					2,2	2	2	2	
						2,2	2	2	
							2	2	
								2	
									1,6
								2	1,6
									1,6
Значение q_{ti} – тангенциальной составляющей силы тяжести, действующей на каждую ось, тс	0,015								
	0,015	0,030							
	0,015	0,030	0,030						
	0,015	0,030	0,030	0,030					
		0,030	0,030	0,030	0,044				
			0,030	0,044	0,044	0,042			
				0,044	0,044	0,042	0,041		
					0,044	0,044	0,042	0,041	0,035
						0,044	0,044	0,042	0,041
							0,044	0,035	0,035
								0,035	0,035
								0,035	0,035
								0,035	0,028
								0,035	0,028
									0,028
Значение Q_{ti} – тангенциальной составляющей силы тяжести, тс	0,060	0,120	0,120	0,236	0,264	0,253	0,164	0,280	0,259

Таблица 5

Расчет результирующих сил, действующих на закрепляемый грузовой состав с нечетной стороны

Тангенциальная составляющая силы тяжести, на каждый вагон в отдельности, тс	Тангенциальная составляющая силы тяжести, с нарастающим итогом, тс	Сила трения состава при трогании с места, тс	Сила трения состава при трогании с места с нарастающим итогом, тс	Составляющая силы воздушного напора вдоль пути, тс	Сила тормозного действия башмаков с нарастающим итогом, тс	Среднеквадратические отклонения удельного сопротивления сил трения состава при трогании с места и силы тормозного действия башмаков при трогании с места	Суммарная величина сил, действующая на состав, тс
1	2	3	4	5	6	7	8
Q_t	ΣQ_t	W_{tp}	ΣW_{tp}	W_{vt}	ΣF_{oj}	$t_x \sqrt{\sum \sigma_f^2 q_o^2 \cdot 10^6} + nn\sigma_w^2 q_o^2$	
0,060	0,060	0,066	0,066	0,003	3,000	1,273	1,730
0,120	0,180	0,083	0,149	0,003	3,000	1,276	1,690
0,120	0,300	0,083	0,232	0,003	3,000	1,280	1,648
0,236	0,536	0,124	0,356	0,004	3,000	1,287	1,530
0,264	0,800	0,124	0,481	0,005	3,000	1,295	1,381
0,253	1,053	0,123	0,604	0,005	3,000	1,304	1,241
0,164	1,217	0,083	0,687	0,006	3,000	1,317	1,148
0,280	1,497	0,160	0,847	0,006	3,000	1,328	1,016
0,259	1,756	0,160	1,007	0,007	3,000	1,341	0,904
Минимальное значение результирующей силы, тс							0,904

Примечание. Аналогично производится расчет сил, действующих с четной стороны.

	C	D	E	F	G	H	I	J	K
2	Номер пути	Номер поезда	Страна расположения	Расстояние от горловины	Температура	Скорость ветра	Выбор вагонов, под которые производится укладка тормозных башмаков и количество		
3					t	V _{vt}			
4	02	3522	неч		20	3			
5	Исходные данные состава из АСУ станции								
6	Порядковый номер вагона	Длина вагона по осям автосцепок, м	Вес вагона (брутто), т	Оси с нарастающим		Величина результирующей силы	с нечетной	с четной	Величина результирующей силы
7	1	13,92	40	4		1,730	2		0,249
8	2	13,92	80	8		1,690			0,557
9	3	13,92	80	12		1,648			0,744
10	4	19,54	120	18		1,530			1,070
11	5	19,54	120	24		1,381			1,404
12	6	19,54	115	30		1,241			1,709
13	7	12,02	82	34		1,148			1,861
14	8	21,12	140	42		1,016			2,091
15	9	21,12	140	50		0,904			2,298
16	исходные данные (2)								

Рис. 3. Интерфейс программной страницы по расчету норм закрепления

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России от 04.06.2012 № 162. М., 2012. 388 с.
2. Инструкция по движению поездов и маневровой работе на железных дорогах РФ. Приложение № 8 к Правилам технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России от 04.06.2012 № 162. М., 2012. 447 с.
3. Инструкция по сигнализации на железнодорожном транспорте РФ. Приложение № 7 к Правилам технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России от 04.06.2012 № 162. М., 2012. 156 с.
4. Правила и технические нормы проектирования станций и узлов на железных дорогах колеи 1520 мм. М. : Техинформ, 2001. 256 с.
5. Бураков В. А., Сычев Е. С. Повышение безопасности движения поездов на основе совершенствования и развития станционной техники : учеб. пособие. М. : МИИТ, 2006. 137 с.
6. Гунбин А. А., Старостина Т. И. Нормы закрепления вагонов // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». 2014. Т. 1. № 2 (57). С. 23.
7. Числов О. Н., Ильин А. М. Развитие автоматизированной методики расчета норм закрепления подвижного состава на станционных железнодорожных путях // Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление : сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. / Ростов. гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2018. С. 247–251.
8. Рудановский В. М. О надежности закрепления подвижного состава на станционных путях // Труды ЦНИИ МПС. 1972. № 464. С. 81–90.
9. Методические указания по расчету и применению норм закрепления подвижного состава тормозными башмаками на станционных путях : введ. в действие 31.01.2005 № ЦДТ-32. М. : Техинформ, 2005. 48 с.
10. Скутин Д. А. Определение мест возникновения наибольших поперечных сил при движении подвижного состава по кривой // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2017. № 2 (34). С. 101–110.

References

1. Rules for the technical operation of the Russian Railways: approved by order of the Ministry of Transport of Russia dated 04.06.2012 No. 162. M.; 2012. 388 p. (In Russ.).
2. Instructions for the movement of trains and shunting work on the railways of the Russian Federation. Appendix No. 8 to the Rules for the Technical Operation of Railways of the Russian Federation: approved. Order of the Ministry of Transport of Russia dated 04.06.2012 No. 162. M.; 2012. 447 p. (In Russ.).
3. Instructions for signaling on the railway transport of the Russian Federation. Appendix No. 7 to the Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation: approved. by order of the Ministry of Transport of Russia dated 04.06.2012 No. 162. M.; 2012. 156 p. (In Russ.).
4. Rules and technical norms for the design of stations and units on 1520 mm gauge railways. M.: Tekhninform; 2001. 256 p. (In Russ.).
5. Burakov V. A., Sychev E. S. Improving the safety of train traffic based on the improvement and development of station technology: textbook. M.: MIIT; 2006. 137 p. (In Russ.).
6. Gunbin A. A., Starostina T. I. Norms for fastening cars. *Chronicles of the United Fund of Electronic Resources “Science and Education”*. 2014;1(57):23. (In Russ.).
7. Chislov O. N., Ilyin A. M. Development of an automated method for calculating the norms for securing rolling stock on station railway tracks. *Transport and logistics: innovative infrastructure, intelligent and resource-saving technologies, economics and management: scientific papers II International scientific-practical conference*. Rostov State University of Communications. Rostov-on-Don; 2018. P. 247–251. (In Russ.).
8. Rudanovsky V. M. On the reliability of fixing rolling stock on station tracks. *Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railways*. 1972;(46):81–90. (In Russ.).
9. Guidelines for the calculation and application of the norms for securing rolling stock with brake shoes on station tracks: introduction into effect on January 31, 2005 No. TsDT-32. M.: Tekhninform; 2005. 48 p. (In Russ.).
10. Skutin D. A. Determining the places of occurrence of the largest transverse forces during the movement of rolling stock along a curve. *Bulletin of the Ural State University of Communications*. 2017;2(34):101–110. (In Russ.).

Информация об авторах

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

А. М. Ильин – ревизор движения, инженер Ростовского центра организации работы железнодорожных станций – СП Северо-Кавказской дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД».

Information about the authors

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

A. M. Ilyin – traffic supervisor, engineer of the Rostov Center for organizing the work of railway stations – joint venture of the North Caucasian Directorate of Traffic Control, a branch of Russian Railways.

Статья поступила в редакцию 22.07.2021; одобрена после рецензирования 06.10.2021; принята к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 22.07.2021; approved after reviewing 06.10.2021; accepted for publication 17.01.2022.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.228

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_49

Анализ влияния технологии доставки сборных грузов из Китая в Западную Сибирь на частоту использования различных видов транспорта

Екатерина Михайловна Бондаренко¹, Вадим Алексеевич Гладунов^{2✉}

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

¹ kuchkinaem@mail.ru

² gladunov.vadim@mail.ru✉

Аннотация. В настоящее время наблюдается ряд проблем с логистикой. Разрыв цепочек поставок при высоком уровне инфляции в мире неизбежен. Рост напряженности требует рассматривать сразу несколько вариантов перевозки грузов и оценивать не только финансовые показатели, которые влияют на конечную стоимость продукта, а следовательно, и на его привлекательность для потребителя, но и риски перекрытия торговых путей. Поэтому задачи по разработке маршрутов перевозки грузов из Китая в Российскую Федерацию являются актуальными на сегодняшний день.

В статье рассмотрены проблемы перевозки сборных партий грузов из Китая в Западную Сибирь. Проведен анализ существующих маршрутов доставки продукции с целью выявления закономерностей при выборе вида транспорта на каждом технологическом этапе. Рассмотрены мультимодальные способы организации перевозок, включающие в себя взаимодействие трех видов транспорта: автомобильного, морского и железнодорожного. Основными опорными точками исследуемых маршрутов являются крупные города Китая и Российской Федерации (Шанхай, Владивосток, Новороссийск, Санкт-Петербург, Москва, Новосибирск), морские порты (Шанхай, Владивосток, Санкт-Петербург, Новороссийск) и железнодорожные станции (Владивосток-Перевалка, Клещиха, Москва-Товарная).

Проанализированы технологические операции, выполняемые при осуществлении цепей поставки продукции по различным вариантам доставки. Выявлены как общие принципы организации таких перевозок, так и их отличительные черты.

Предложены мероприятия по повышению конкурентоспособности и уровня доходности компании ОАО «РЖД» в сегменте перевозок сборных грузов из Китая в Западную Сибирь.

Ключевые слова: логистика, товарообмен между Китаем и Россией, мелкие партии товаров, доставка товаров в Западную Сибирь, сборные грузы, технологии доставки товаров

Для цитирования: Бондаренко Е. М., Гладунов В. А. Анализ влияния технологии доставки сборных грузов из Китая в Западную Сибирь на частоту использования различных видов транспорта // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 49–57. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_49.

TRANSPORT

Original article

Impact analysis of the groupage cargo delivery technology from China to Western Siberia by various modes of transport

Ekaterina M. Bondarenko¹, Vadim A. Gladunov^{2✉}

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

¹ kuchkinaem@mail.ru

² gladunov.vadim@mail.ru✉

Abstract. Currently, there are a number of problems with logistics. Breaking supply chains with high inflation in the world is inevitable. The growth of tension requires considering several options for the transportation of goods at once and assessing not only financial indicators that affect the final cost of the product and, consequently, its attractiveness for the consumer, but also the risks of blocking trade routes. Therefore, the tasks of developing routes for the transportation of goods from China to the Russian Federation are relevant today.

The article deals with the problems of transportation of groupage consignments from China to Western Siberia. An analysis of the existing routes for the delivery of products was carried out in order to identify patterns in the choice of the type of transport at each technological stage. Multimodal ways of organizing transportation, including the interaction of three types of transport: road, sea and rail, are considered. The main reference points of the studied routes are the major cities of China and the Russian Federation (Shanghai, Vladivostok, Novorossiysk, St. Petersburg, Moscow, Novosibirsk), seaports (Shanghai, Vladivostok, St. Petersburg, Novorossiysk) and railway stations (Vladivostok-Perevalka, Kleschikha, Moscow-Tovarnaya).

The technological operations performed in the implementation of the supply chains of products for various delivery options are analyzed. Both the general principles of organizing such transports and their distinctive features are revealed.

Measures are proposed to increase the competitiveness and profitability of the Russian Railways company in the segment of groupage cargo transportation from China to Western Siberia.

Keywords: logistics, trade between China and Russia, small consignments of goods, delivery of goods to Western Siberia, groupage cargo, delivery technologies

For citation: Bondarenko E. M., Gladunov V. A. Impact analysis of the groupage cargo delivery technology from China to Western Siberia by various modes of transport. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):49–57. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_49.

С развитием интернет-торговли и, в частности, с популяризацией приобретения различных товаров, произведенных в Китае, потребителями из Сибири связано увеличение объемов перевозки грузов на данном направлении [1]. Так как конечный потребитель обычно должен получить мелкую партию груза, а отправителю необходимо отправить большое количество таких партий, то для снижения транспортной составляющей в конечной стоимости продукции необходимо разработать логистическую цепь поставки, позволяющую минимизировать складские и транспортные расходы, а также издержки, связанные с распределением продукции.

К основным методам оптимизации логистических цепей поставки относятся:

- консолидация партий грузов для различных получателей, находящихся в одном населенном пункте;
- использование специализированного программного обеспечения, а также электрон-

ных сервисов и платформ для контроля выполнения складских, транспортных и распределительных операций;

– строительство и дальнейшая эксплуатация крупных логистических центров, позволяющих сократить транспортно-логистические издержки по доставке продукции конечному потребителю.

Для оценки преимуществ и недостатков существующих вариантов доставки продукции из Китая в Сибирь, а также выявления операций, оказывающих негативное влияние на формирование транспортной составляющей в конечной стоимости продукции, были проанализированы выполняемые операции, относящиеся к различным этапам перемещения товаров от продавца к покупателю [2]. Стандартный список операций, обязательно выполняемых при транспортировке сборных грузов из Китая в Россию, приведен в табл. 1.

Логистические операции, выполняемые при организации доставки сборных грузов из Китая в Сибирь

Операции, выполняемые на маршруте	
на территории Китая	на территории России
1. Сбор отправлений от разных грузовладельцев (отгрузка, доставка до сортировочного склада, выгрузка). 2. Обработка груза на сортировочном складе (консолидация, взвешивание, упаковка, переупаковка, маркировка, составление сопроводительных документов, загрузка грузов в контейнер и их выгрузка, выдача товаров заказчику). 3. Доставка сборного груза в контейнере до порта в России (отгрузка, доставка до китайского порта, перевозка, перевозка морем, выгрузка)	4. Импортное таможенное оформление товаров в порту (декларирование, оформление товаров, оплата сборов). 5. Доставка грузов до складов перевозчика при помощи различных видов транспорта в необходимые регионы. 6. Доставка до дверей получателя со складов либо самовывоз

Исследуемые маршруты

Основное производство товаров в Китае находится на северо-востоке и востоке страны. В Китае существует больше 2 000 портов, из них около 300 международные, например, Шанхай, Гонконг, Нинбо и др. Развитая железнодорожная и морская сеть России позволяет включать в логистическую цепь доставки железнодорожный и морской виды транспорта.

При проведении исследования особое внимание уделялось мультимодальным схемам доставки груза, в которых для осуществления доставки продукции между крупными терминалами Китая и Российской Федерации преимущественно используется морской и железнодорожный транспорт. Данный факт объясняется тем, что данные виды транспорта имеют сравнительно небольшую себестоимость перевозок [3].

Маршрут № 1. Китайский порт Шанхай – дальневосточный порт Владивосток – Новосибирск.

На рис. 1 приведена логистическая цепь маршрута № 1.

Характеристика маршрута № 1. Товары отгружаются со складов А и Б, расположенных в Шанхае. Далее товары доставляются до сортировочного склада В. После обработки груза на данном складе контейнер с ним отправляется в китайский порт Шанхай и доставляется в дальневосточный порт Владивосток. Там происходит процедура таможенного оформления. На следующем этапе контейнер со сборным грузом перегружается на автомобильный транспорт и доставляется на сортировочный склад перевозчика К. Там происходит сортировка товара по различным направлениям, и уже оттуда сборный груз в новом контейнере в автомобиле следует до ст. Владивосток-Перевалка. Его переставляют на железнодорожный вагон и отправляют по Транссибирской магистрали до склада Н в Новосибирске через ст. Клещиха. Грузополучатель в Новосибирске забирает товар со склада Н лично [5].

магистрали до склада Н в Новосибирске через ст. Клещиха. Грузополучатель в Новосибирске забирает товар со склада Н лично [4].

В табл. 2 приведены логистические операции, выполняемые по маршруту № 1.

Маршрут № 2. Китайский порт Шанхай – балтийский порт Санкт-Петербург – Москва – Новосибирск.

На рис. 2 приведена логистическая цепь маршрута № 2.

Характеристика маршрута № 2. Товары отгружаются со складов А и Б, расположенных в Шанхае. Далее товары доставляются до сортировочного склада В. После обработки груза на данном складе контейнер с ним отправляется в китайский порт Шанхай и доставляется в балтийский порт Санкт-Петербург. Там происходит процедура таможенного оформления. На следующем этапе контейнер со сборным грузом перегружается в автомобильный транспорт и доставляется на сортировочный склад перевозчика М в Москве. Там происходит сортировка товара по различным направлениям, и уже оттуда сборный груз в новом контейнере в автомобиле следует до ст. Москва-Товарная. Его переставляют на железнодорожный вагон и отправляют по Транссибирской магистрали до склада Н в Новосибирске через ст. Клещиха. Грузополучатель в Новосибирске забирает товар со склада Н лично [5].

В табл. 3 приведены логистические операции, выполняемые по маршруту № 2.

Маршрут № 3. Китайский порт Шанхай – черноморский порт Новороссийск – Москва – Новосибирск.

На рис. 3 приведена логистическая цепь маршрута № 3.

Характеристика маршрута № 3. Товары отгружаются со складов А и Б, расположенных в Шанхае. Далее товары доставляются до сортировочного склада В. После обработки

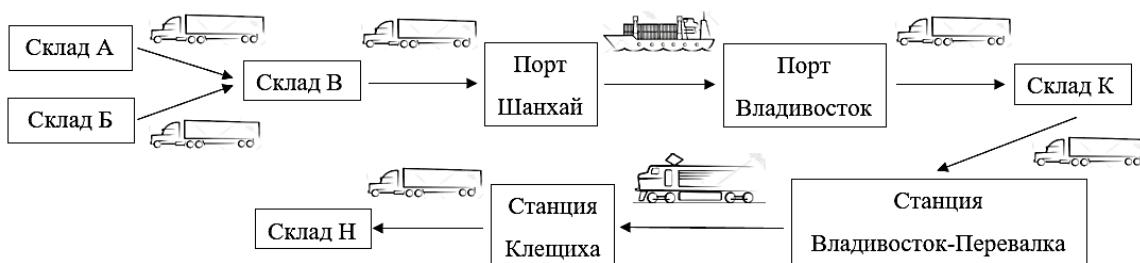


Рис. 1. Логистическая цепь маршрута № 1

Таблица 2

Логистические операции, выполняемые при организации доставки продукции из Китая в Сибирь по маршруту № 1

Операции, выполняемые на маршруте	
на территории Китая	на территории России
<p>1. Сбор отправлений от разных грузо-владельцев (автомобильный транспорт). 1.1. Отгрузка товаров со складов А и Б. 1.2. Перевозка товаров до склада В. 1.3. Выгрузка товаров на склад В.</p> <p>2. Обработка груза на сортировочном складе В (консолидация, взвешивание, упаковка, маркировка, составление сопроводительных документов, загрузка грузов в контейнер).</p> <p>3. Доставка сборного груза в контейнере до порта в России (автомобильный транспорт + морской транспорт). 3.1. Отгрузка контейнера со склада В на автотранспорт. 3.2. Перевозка контейнера до порта Шанхай. 3.3. Перегрузка контейнера в порту. 3.4. Перевозка контейнера морским транспортом. 3.5. Выгрузка контейнера в порту Владивосток</p>	<p>4. Импортное таможенное оформление товаров в порту Владивосток. 5. Доставка контейнера до склада перевозчика К во Владивостоке (автомобильный транспорт). 5.1. Отгрузка контейнера в порту Владивосток. 5.2. Перевозка контейнера до склада К. 5.3. Выгрузка контейнера на складе К. 6. Обработка груза на сортировочном складе К (выгрузка грузов из контейнера, взвешивание, загрузка грузов в новый контейнер, составление сопроводительных документов). 7. Доставка контейнера до склада перевозчика Н в Новосибирске (автомобильный транспорт + железнодорожный транспорт). 7.1. Отгрузка контейнера со склада К на автотранспорт. 7.2. Перевозка контейнера до ст. Владивосток-Перевалка. 7.3. Перегрузка контейнера на ст. Владивосток-Перевалка на железнодорожный вагон. 7.4. Перевозка контейнера до ст. Клещиха (Новосибирск) железнодорожным транспортом. 7.5. Перегрузка контейнера на ст. Клещиха на автотранспорт. 7.6. Перевозка контейнера до склада Н. 7.7. Выгрузка контейнера на складе Н. 8. Обработка груза на сортировочном складе Н (выгрузка груза из контейнера, выдача товаров заказчику)</p>

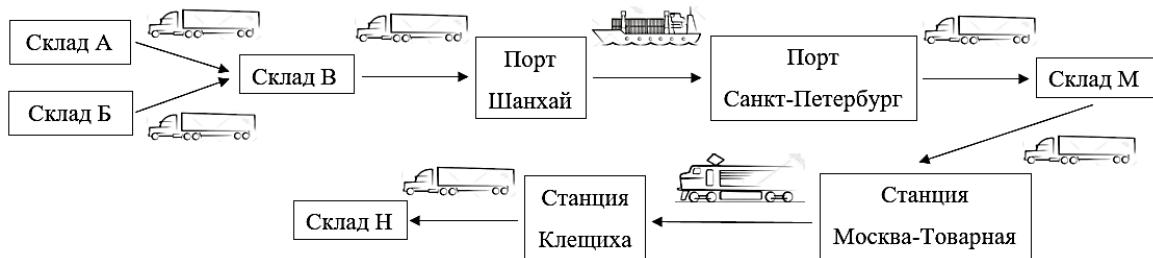


Рис. 2. Логистическая цепь маршрута № 2

груза на данном складе контейнер с ним отправляется в китайский порт Шанхай и доставляется в черноморский порт Новороссийск. Там происходит процедура таможенного оформления. На следующем этапе контейнер со сборным грузом перегружается в автомобильный транспорт и доставляется на сортировочный склад перевозчика М в Москве. Там происходит сортировка товара по различным направлениям, и уже оттуда сборный груз в новом контейнере в автомобиле следует до ст. Москва-Товарная. Его перевозят на железнодорожный вагон и отправляют по Транссибирской магистрали до склада Н в Новосибирске через ст. Клещиха.

Грузополучатель в Новосибирске забирает товар со склада Н лично [6].

В табл. 4 приведены логистические операции, выполняемые по маршруту № 3.

Анализируя логистические операции, выполняемые на трех исследуемых маршрутах, можно выделить три основные группы операций [7]. Данные операции представлены на рис. 4.

Расчет операций по транспортировке товаров между опорными пунктами маршрутов N_1 проводился по формуле

$$N_1 = N_{\text{от}} + N_{\text{пер}} + N_{\text{выг}} + N_{\text{перег}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{от}}$ – количество операций по отгрузке товаров или контейнеров; $N_{\text{пер}}$ – количество

Таблица 3

Логистические операции, выполняемые при организации доставки продукции из Китая в Сибирь по маршруту № 2

Операции, выполняемые на маршруте	
на территории Китая	на территории России
1. Сбор отправлений от разных грузо-владельцев (автомобильный транспорт). 1.1. Отгрузка товаров со складов А и Б. 1.2. Перевозка товаров до склада В. 1.3. Выгрузка товаров на склад В. 2. Обработка груза на сортировочном складе В (консолидация, взвешивание, упаковка, маркировка, составление сопроводительных бумаг, загрузка грузов в контейнер). 3. Доставка сборного груза в контейнере до порта в России (автомобильный транспорт + морской транспорт). 3.1. Отгрузка контейнера со склада В на автотранспорт. 3.2. Перевозка контейнера до порта Шанхай. 3.3. Перегрузка контейнера в порту. 3.4. Перевозка контейнера морским транспортом. 3.5. Выгрузка контейнера в порту Санкт-Петербург	4. Импортное таможенное оформление товаров в порту. 5. Доставка контейнера до склада М в Москву (автомобильный транспорт). 5.1. Отгрузка контейнера в порту. 5.2. Перевозка контейнера до склада М. 5.3. Выгрузка контейнера на складе М. 6. Обработка груза на сортировочном складе М (выгрузка грузов из контейнера, взвешивание, загрузка грузов в новый контейнер, составление сопроводительных документов). 7. Доставка контейнера до склада перевозчика Н в Новосибирске (автомобильный транспорт + железнодорожный транспорт). 7.1. Отгрузка контейнера со склада М на автотранспорт. 7.2. Перевозка контейнера до ст. Москва-Товарная. 7.3. Перегрузка контейнера на ст. Москва-Товарная на железнодорожный вагон. 7.4. Перевозка контейнера до ст. Клещиха (Новосибирск) железнодорожным транспортом. 7.5. Перегрузка контейнера на ст. Клещиха на автотранспорт. 7.6. Перевозка контейнера до склада Н. 7.7. Выгрузка контейнера на складе Н. 8. Обработка груза на сортировочном складе Н (выгрузка груза из контейнера, выдача товаров заказчику)

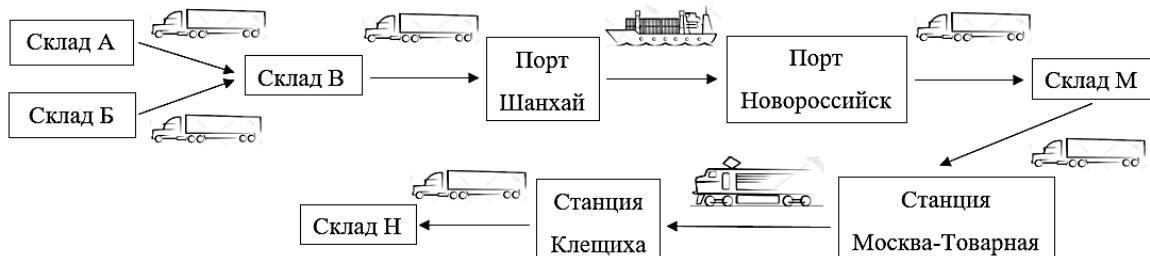


Рис. 3. Логистическая цепь маршрута № 3

операций по перевозке товаров или контейнеров; $N_{выг}$ – количество операций по выгрузке товаров или контейнеров; $N_{перег}$ – количество операций по перегрузке контейнеров.

Расчет операций по прохождению таможенного оформления N_2 проводился по формуле

$$N_2 = N_{дек} + N_{оф} + N_{сб}, \quad (2)$$

где $N_{дек}$ – количество операций по декларированию товаров; $N_{оф}$ – количество операций по оформлению товаров; $N_{сб}$ – количество операций по оплате сборов.

Расчет операций по обработке грузов на сортировочных складах N_3 проводился по формуле

$$N_3 = N_{кон} + N_{вз} + N_{уп} + N_{мар} + N_{сост} + N_{заг}, \quad (3)$$

где $N_{кон}$ – количество операций по консолидации товаров; $N_{вз}$ – количество операций по взвешиванию товаров; $N_{уп}$ – количество операций по упаковке товаров; $N_{мар}$ – количество операций по маркировке товаров; $N_{сост}$ – количество операций по составлению сопроводительных документов; $N_{заг}$ – количество операций по загрузке грузов в контейнер.

Необходимо отметить, что количество логистических операций по каждой группе имеет одинаковые значения на всех трех направлениях: к операциям по транспортировке товаров между опорными пунктами

Таблица 4

Логистические операции, выполняемые при организации доставки продукции из Китая в Сибирь по маршруту № 3

Операции, выполняемые на маршруте	
на территории Китая	на территории России
1. Сбор отправлений от разных грузовладельцев (автомобильный транспорт). 1.1. Отгрузка товаров со складов А и Б. 1.2. Перевозка товаров до склада В. 1.3. Выгрузка товаров на склад В. 2. Обработка груза на сортировочном складе В (консолидация, взвешивание, упаковка, маркировка, составление сопроводительных документов, загрузка грузов в контейнер). 3. Доставка сборного груза в контейнере до порта в России (автомобильный транспорт + морской транспорт). 3.1. Отгрузка контейнера со склада В на автотранспорт. 3.2. Перевозка контейнера до порта Шанхай. 3.3. Перегрузка контейнера в порту. 3.4. Перевозка контейнера морским транспортом. 3.5. Выгрузка контейнера в порту Новороссийск	4. Импортное таможенное оформление товаров в порту. 5. Доставка контейнера до склада перевозчика М в Москву (автомобильный транспорт). 5.1. Отгрузка контейнера в порту Новороссийск. 5.2. Перевозка контейнера до склада М. 5.3. Выгрузка контейнера на складе М. 6. Обработка груза на сортировочном складе М (выгрузка грузов из контейнера, взвешивание, загрузка грузов в новый контейнер, составление сопроводительных документов). 7. Доставка контейнера до склада перевозчика Н в Новосибирске (автомобильный транспорт + железнодорожный транспорт). 7.1. Отгрузка контейнера со склада М на автотранспорт. 7.2. Перевозка контейнера до ст. Москва-Товарная. 7.3. Перегрузка контейнера на ст. Москва-Товарная на железнодорожный вагон. 7.4. Перевозка контейнера до ст. Клещиха (Новосибирск) железнодорожным транспортом. 7.5. Перегрузка контейнера на ст. Клещиха на автотранспорт. 7.6. Перевозка контейнера до склада Н. 7.7. Выгрузка контейнера на складе Н. 8. Обработка груза на сортировочном складе Н (выгрузка груза из контейнера, выдача товаров заказчику) клиентом на складе Н

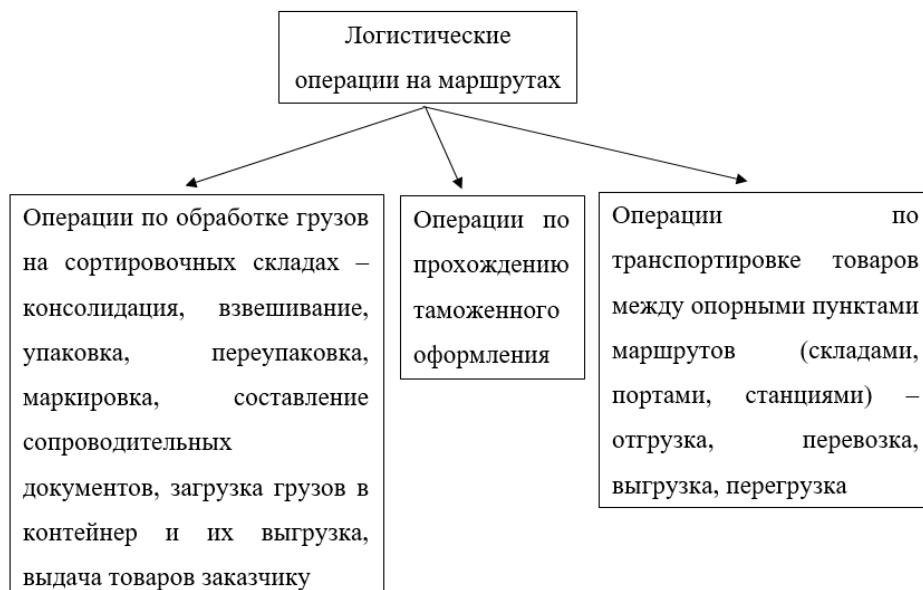


Рис. 4. Логистические операции на исследуемых маршрутах

маршрутов относятся 18 операций, к операциям по прохождению таможенного оформления – 3, к операциям по обработке грузов на сортировочных складах – 12.

Процентное распределение выполняемых операций по группам на маршрутах представлено на рис. 5.

Исходя из данных рис. 5, можно сделать вывод, что самыми многочисленными в каждом из маршрутов являются операции по транспортировке товаров между опорными пунктами. Их количество составляет 55 % от общего числа операций. Стоимость выполнения рассматриваемых работ напрямую зави-

сит от вида транспорта, выбранного для организации перемещения продукции. Данный факт может оказывать существенное влияние на конечную стоимость продукции, поэтому при выборе оптимальной цепи поставки продукции необходимо учитывать стоимость использования выбранного вида транспорта, а также анализировать альтернативные варианты [8].

В ходе проведения анализа было выявлено, что, несмотря на существенные географические различия в исследуемых маршрутах, использование различных видов транспорта имеет одинаковое процентное распределение. На маршрутах используются следующие виды транспорта: автомобильный, железнодорожный и морской. Если рассматривать маршруты по основным

операциям, то автомобильный транспорт встречается чаще всего – 4 раза, железнодорожный и морской – 1 раз.

Процентное распределение использованных видов транспорта на исследуемых маршрутах представлено на рис. 6.

Анализ показал, что автомобильный транспорт используется для осуществления 66 % логистических операций от общего числа. Однако стоит отметить, что дальность автомобильных перевозок в исследуемых маршрутах мала в связи с тем, что данный вид транспорта используется для сбора грузов от грузоотправителей и доставки их до складов, портов и железнодорожных станций [9]. Именно поэтому данный вид транспорта встречается довольно часто на выбранных направлениях. Железнодорожный и



Рис. 5. Распределение выполняемых операций по группам на маршрутах, %

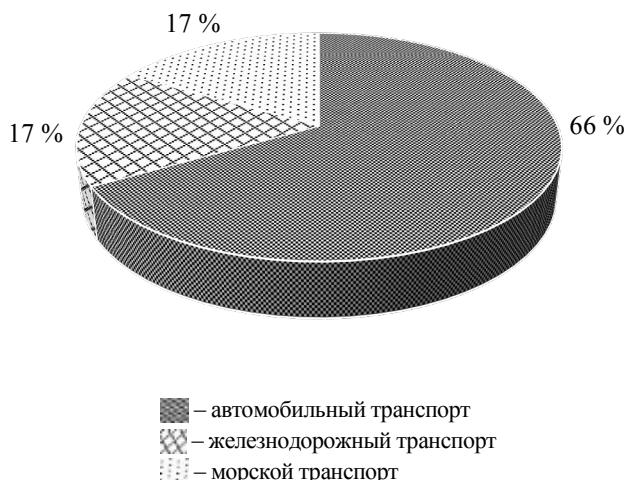


Рис. 6. Распределение использованных видов транспорта на исследуемых маршрутах, %

морской транспорт выполняет основную перевозочную работу – перемещение грузов на дальние расстояния: морской – от порта Шанхай до русских портов (Владивосток, Новороссийск, Санкт-Петербург), железнодорожный – от Москвы до Новосибирска или от Владивостока до Новосибирска. Это связано с тем, что эти виды транспорта при перевозке на дальние расстояния являются самыми дешевыми [10].

Для всех существующих логистических схем, проанализированных в работе, выявлены общие принципы организации. Для доставки продукции от пункта отправления до пункта назначения используются: склады грузоотправителей в Китае (Шанхай); склад перевозчика в Китае (Шанхай); Китайский порт (порт Шанхай); порт Российской Федерации (порты Владивосток, Новороссийск, Санкт-Петербург); склад перевозчика в городе, где расположен порт, или в городе, где осуществляется сортировка груза (Владивосток, Москва); склад перевозчика в Западной Сибири (Новосибирск).

Таким образом, сделан вывод о прямой связи между техническим оснащением пунктов маршрута и выбором грузоотправителя. Поэтому для повышения доли присутствия железнодорожного транспорта в описанных логистических цепях и, соответственно, повышения уровня доходности ОАО «РЖД» в сегменте описанных перевозок необходимо рассмотреть возможность строительства современных терминално-логистических комплексов на территории Российской Федерации, с наличием необходимого программного обеспечения, позволяющего проводить сортировочную работу и консолидировать отправки в зависимости от пунктов назначения. Это мероприятие обеспечит сокращение транспортных издержек клиентов при движении по кратчайшему пути из Китая в Западную Сибирь и тем самым повысит конкурентоспособность грузовых перевозок железнодорожным транспортом по отношению к водному.

Список источников

1. Федеральная таможенная служба : офиц. сайт. URL: <https://customs.gov.ru/> (дата обращения: 21.07.2021).
2. Bardal A. B. Transport Interactions Between Russia and China: Far East // ECO Journal. 2014. № 6. P. 66–81.
3. Способы транспортировки груза из Китая в Россию / А. Г. Прессель, Н. В. Евсеева, Л. В. Горшенин, В. Ф. Прохорова // Общество, экономика, управление. 2020. Т. 5. № 1. С. 36–39. DOI 10.24411/2618-9852-2020-15106.
4. Почта России : офиц. сайт. URL: <https://www.pochta.ru/> (дата обращения: 23.07.2021).
5. Переслегина Т. А., Матяш А. Д. Основные направления развития железнодорожных маршрутов доставки грузов в контейнерах из Китая в Россию // Логистика – евразийский мост : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. (Красноярск, 24–29 апр. 2019 г.) / Краснояр. гос. агр. ун-т. Красноярск : Изд-во Красноярского ГАУ, 2019. С. 313–321.
6. ПЭК : офиц. сайт. URL: <https://pecom.ru/> (дата обращения: 23.07.2021).
7. Mengyuan C., Gorbacheva A. K. International logistics between China and Russia // Логистические системы в глобальной экономике. 2020. № 10. P. 28–30.
8. Наседкина Е. С., Коршунов Д. А. Обзор современных схем и способов транспортировки грузов из Китая в Россию // XIII Прохоровские чтения «Водный транспорт: проблемы возрождения» : сб. ст. участников Тринадцатых Прохоровских чтений (Нижний Новгород, 1 дек. 2017 г.). Н. Новгород : Автор, 2018. С. 71–75.
9. Шефер К. В., Ломакина Н. С. Проектирование транспортно-технологических схем доставки груза из Китая в Россию // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов : материалы 47-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (Комсомольск-на-Амуре, 10–21 апр. 2017 г.). Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2017. С. 1240–1243.
10. Самуилов В. М., Паршина В. С., Серов К. Д. Особенности логистической организации мультимодальных перевозок Россия – Китай // Инновационный транспорт. 2020. № 1 (35). С. 18–23. DOI 10.20291/2311-164X-2020-1-18-23.

References

1. Federal Customs Service: official. website. (In Russ.). URL: <https://customs.gov.ru/>.
2. Bardal A. B. Transport Interactions Between Russia and China: Far East. *ECO Journal*. 2014;(6):66–81. (In Russ.).

3. Pressel A. G., Evseeva N. V., Gorshenin L. V., Prokhorova V. F. Ways of transporting cargo from China to Russia. *Society, economy, management*. 2020;5(1):36–39. (In Russ.). DOI 10.24411/2618-9852-2020-15106.
4. Russian Post: official. website. (In Russ.). URL: <https://www.pochta.ru/>.
5. Pereslegina T. A., Matyash A. D. The main directions of development of railway routes for the delivery of goods in containers from China to Russia. *Logistics – the Eurasian bridge: materials of the XIV International scientific-practical. conf.* (Krasnoyarsk, April 24–29, 2019). Krasnoyarsk State Agrarian University. Krasnoyarsk: Publishing House of the Krasnoyarsk State Agrarian University; 2019. P. 313–321. (In Russ.).
6. PEK: official. website. (In Russ.). URL: <https://pecom.ru/>.
7. Mengyuan C., Gorbacheva A. K. International logistics between China and Russia // Logistic systems in the global economy. 2020;(10):28–30.
8. Nasedkina E. S., Korshunov D. A. Review of modern schemes and methods for transporting goods from China to Russia. *XIII Prokhorov readings “Water transport: problems of revival”*: collection of articles. Art. participants of the Thirteenth Prokhorov Readings (Nizhny Novgorod, December 1, 2017). Nizhny Novgorod: Author; 2018. P. 71–75. (In Russ.).
9. Shefer K. V., Lomakina N. S. Design of transport and technological schemes for the delivery of cargo from China to Russia. conf. students and graduate students (Komsomolsk-on-Amur, April 10–21, 2017). Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-na-Amure state university; 2017. P. 1240–1243. (In Russ.).
10. Samuylov V. M., Parshina V. S., Serov K. D. Features of the logistics organization of multimodal transportation Russia – China. *Innovative transport*. 2020;1(35):18–23. (In Russ.). DOI 10.20291/2311-164X-2020-1-18-23.

Информация об авторах

Е. М. Бондаренко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения.

В. А. Гладунов – студент 3-го курса, факультет «Управление процессами перевозок» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

E. M. Bondarenko – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Logistics, Commercial Work and Rolling Stock, Siberian State Transport University.

V. A. Gladunov – 3rd year student, Department of Transportation Process Management, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 17.09.2021; одобрена после рецензирования 24.09.2021; принята к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 17.09.2021; approved after reviewing 24.09.2021; accepted for publication 17.01.2022.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 625.143.541
doi 10.52170/1815-9265_2022_60_58

Расчет прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале с учетом износа древесины

Максим Сергеевич Чусовитин

ООО «НОВАТЕК-ТРАНСЕРВИС», п. Пуровск, Россия, chusmaksimus@mail.ru

Аннотация. На железнодорожных путях промышленного транспорта, особенно на технологических путях металлургических заводов, где все чаще применяется специализированный подвижной состав (например, чугуновозы, шлаковозы и др.), в 2–2,5 раза увеличивается нагрузка на ось по сравнению с нормативными нагрузками на магистральном железнодорожном транспорте. Повышенная осевая нагрузка увеличивает интенсивность образования углублений на верхнем пласте деревянной шпалы под подкладкой и приводит к развитию трещин от воздействия прикрепителей и рельсовых подкладок на деревянных шпалах и, как следствие, к изгибу рельсовых подкладок и преждевременному выходу из эксплуатации как рельсовых подкладок, так и деревянных шпал по причине механического износа.

Опыт эксплуатации железнодорожных путей и стрелочных переводов на промышленных железнодорожных путях, по которым обращается подвижной состав с осевыми нагрузками 30–50 тс/ось, показал, что часть рельсовых подкладок выходит из строя задолго до истечения нормативного срока их эксплуатации, а деревянные шпалы и брусья имеют чрезвычайно малые сроки службы и изымаются, как правило, не из-за гниения, а из-за механического износа под подкладками.

Таким образом, острой проблемой в области текущего содержания верхнего строения железнодорожного пути на путях как промышленного, так и магистрального транспорта является увеличение срока службы рельсовых подкладок, а также деревянных шпал и брусьев в различных условиях эксплуатации.

В данной статье произведен расчет прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале с учетом износа древесины и переменного сечения рельсовой подкладки. Получены значения прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале с учетом износа древесины в зависимости от применяемой нагрузки. Применение данной методики позволяет более точно определить запас прочности рельсовой подкладки с различными размерами на проектной стадии.

Ключевые слова: деревянная шпала, прогиб, рельсовая подкладка, прочность, вертикальные перемещения

Для цитирования: Чусовитин М. С. Расчет прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале с учетом износа древесины // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 58–67. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_58.

TRANSPORT

Original article

Calculation of rail plate deflections on a wooden sleeper, taking into account the wear of wood

Maksim S. Chusovitin

ООО НОВАТЕК-TRANSSERVICE, Пуровск, Россия, chusmaksimus@mail.ru

Abstract. On the railway tracks of industrial transport, especially on the technological tracks of metallurgical plants, where the use of specialized rolling stock (for example: iron trucks, slag trucks, etc.) is becoming increasingly widespread, that has already led to an axle load 2–2.5 times higher than the standard loads on mainline rail transport. The increased axial load increases the intensity of the formation of depressions in the upper layer under the rail plate and leads to the development of cracks from the impact of fasteners and rail plates on wooden sleepers, which leads to bending of the rail plates and premature decommissioning of both rail plates and wooden sleepers due to mechanical wear.

The experience of operating railway tracks and switches on industrial railway tracks, along which rolling stock with axial loads of 30–50 tf/axle turns, has shown that some of the rail plates fail long before the expiration of their

standard service life, and wooden sleepers and bars have extremely short service lives and are withdrawn, as a rule, not by rotting, but by mechanical wear under the plates.

Thus, an acute problem in the field of the current maintenance of the railway track upper structure both on the tracks of industrial transport and on the tracks and mainline transport is the increase in the service life of rail plates, as well as wooden sleepers and bars in various operating conditions.

In this article, the deflections of the rail plate on a wooden sleeper are calculated taking into account the wear of wood and taking into account the variable cross-section of the rail plate. The values of deflections of the rail plate on a wooden sleeper are obtained, taking into account the wear of wood, depending on the applied load. The use of this technique for assessing the strength of rail plates allows you to more accurately determine the margin of safety of a rail plate with different sizes at the design stage.

Keywords: wooden sleeper, deflection, rail plate, strength, vertical movement

For citation: Chusovitin M. S. Calculation of rail plate deflections on a wooden sleeper, taking into account the wear of wood. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):58–67. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_58.

Традиционные методы расчета рельсовых прокладок на прочность используют упрощенную расчетную схему подкладки постоянного поперечного сечения, опирающейся на плоское основание, равномерно упругое по всей длине [1–3].

В статье [4] были проведены теоретические расчеты рельсовой подкладки на новой деревянной шпале, т. е. на поверхности которой не имеется износа. Данные, полученные теоретическим путем, были подтверждены в ходе лабораторных испытаний (табл. 1).

Основной причиной выхода из строя деревянных шпал и брусьев на железнодорожных путях и стрелочных переводах магистральных и промышленных железнодорожных путей является механический износ под рельсовыми подкладками [5].

Произведем расчет прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале с учетом износа древесины в зависимости от ее вогнутой формы под подкладкой (т. е. на деревянной

шпале, имеющей износ древесины в зоне рельсовой подкладки).

Расчет будет произведен для следующих видов нагрузки: 5, 10, 15 т.

Итак, взяв за основу расчетную схему, указанную на рис. 1, и следующие данные: расчетная нагрузка $P = 5$ т, коэффициент постели шпал $k(x) = 100 \text{ кг}/\text{см}^3$, модуль продольной упругости стали $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, – произведем расчеты по известным формулам [6–9], используя дифференциальные зависимости.

За основу метода было принято основное точное уравнение изогнутой оси балки:

$$\frac{d^2y}{dx^2} \left/ \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \right. = \frac{M_z}{EI_z}. \quad (1)$$

Запишем уравнение (1) в упрощенной форме, пренебрегая величиной в скобках, малой по сравнению с единицей:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M_z}{EI_z}. \quad (2)$$

Таблица 1

**Результаты лабораторных испытаний и теоретических расчетов прогибов
рельсовой подкладки сечением 0,165 м, мм**

Способ получения данных	Приложенная нагрузка P , т		
	5	10	15
Расчет	0,9	1,8	2,7
Эксперимент*	1,4	1,9	2,3

* Прогибы измерялись штангенциркулем на новой деревянной шпале.

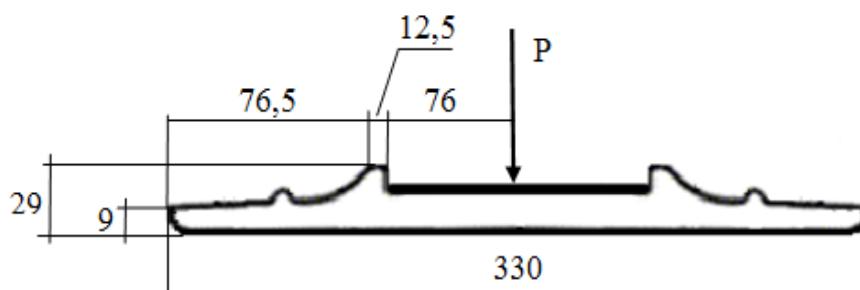


Рис. 1. Расчетная схема (размеры в мм)

Из уравнения (2) методом последовательного интегрирования можно получить любую характеристику напряженно-деформированного состояния балки на упругом основании:

– поперечная сила

$$Q_i = \int_0^i q dx; \quad (3)$$

– изгибающий момент

$$M_i = \int_0^i Q dx; \quad (4)$$

– угол поворота

$$\Theta_i = \int_0^i \frac{M dx}{EI(x)}; \quad (5)$$

– прогиб

$$Y_i = \int_0^i \frac{\Theta dx}{EI(x)}. \quad (6)$$

Произведем расчеты следующих параметров:

1. Поперечные силы (сечение $i = 0,03825$ м)

$$Q_i = \int_0^{0,03825} q dx = \int_0^{0,03825} 148\,636,4 dx = \\ = 148\,636,4(0,03825 - 0) = 5\,685,3 \text{ Н.}$$

2. Момент сил (сечение $i = 0,03825$ м)

$$M_i = \int_0^{0,03825} Q dx = \int_0^{0,03825} q x dx = \\ = 148\,636,4 \cdot 0,03825^2 / 2 - 148\,636,4 \cdot 0^2 / 2 = \\ = 108,73 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

3. Угол поворота (сечение $i = 0,127$ м). Так как рельсовая подкладка симметричная и нагрузка прикладывается по оси симметрии, сечение $i = l/2 = 0,33/2$ будет иметь угол поворота $\Theta_i = 0$ рад. Расчет углов будем производить, определив нулевое значение оси O_x по оси симметрии рельсовой подкладки.

$$\Theta_i = \int_0^i \frac{M dx}{EI(x)} = \int_{-0,076}^0 \frac{qx^2}{2EI(x)} = \\ = \frac{148\,636,4(-0,076)^3}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,12094 \cdot 10^{-8}} - \\ - \frac{148\,636,4 \cdot 0^3}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,12094 \cdot 10^{-8}} = \\ = -0,003838 \text{ рад.}$$

4. Прогиб подкладки (сечение $i = 0,03825$ м)

$$Y_i = \int_0^i \frac{\Theta dx}{EI(x)} = \int_0^{0,03825} \frac{qx^3}{6EI(x)} = \\ = \frac{148\,636,4 \cdot 0,03825^4}{6 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 0,12094 \cdot 10^{-8}} - \\ - \frac{148\,636,4 \cdot 0^4}{6 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 0,12094 \cdot 10^{-8}} = \\ = 0,0000516 \text{ м.}$$

Таким образом произведен расчет параметров прогибов каждого сечения рельсовой подкладки при нагрузке 5 т (табл. 2).

Так же выполним расчет для нагрузки P , равной 10 и 15 т. Обобщение результатов теоретического расчета прогибов рельсовой подкладки для трех сечений приведено в табл. 3.

Теперь перейдем ко второму этапу расчета рельсовой подкладки с учетом данных, полученных при расчете первого этапа, – результатов прогибов рельсовой подкладки на новой деревянной шпале.

Возьмем за основу следующие данные: расчетная нагрузка $P = 5$ т; коэффициент постели шпал $k(x) = 100 \text{ кг}/\text{см}^3$; модуль продольной упругости стали $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Выполним перерасчет распределения интенсивности реактивного отпора основания:

$$q_i = k(x)(Y_i - Y_{0i}), \quad (7)$$

где $k(x)$ – коэффициент постели шпалы; Y_i – прогиб рельсовой подкладки на изношенной деревянной шпале; Y_{0i} – прогиб новой рельсовой подкладки, равный нулю.

Выполним расчеты следующих параметров:

1. Интенсивность реактивного отпора основания (сечение $i = 0,03825$ м)

$$q_i = k(x)(Y_i - Y_{0i}) = 10^8 (0,0000516147 - 0) = \\ = 5\,161,47 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

2. Поперечные силы (сечение $i = 0,03825$ м)

$$Q_i = \int_0^{0,03825} q dx = \int_0^{0,03825} 5\,161,47 dx =$$

$$= 5\,161,47(0,03825 - 0) = 197,43 \text{ Н.}$$

3. Момент сил (сечение $i = 0,03825$ м)

$$M_i = \int_0^{0,03825} Q dx = \int_0^{0,03825} q x dx = \\ = 5\,161,47 \cdot 0,03825^2 / 2 - 5\,161,47 \cdot 0^2 / 2 = \\ = 3,77578 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Таблица 2

Расчет прогибов рельсовой подкладки при нагрузке в 5 т на новой деревянной шпале

X_i , м	q_i , Н/м	Q_i , Н	M_i , Н·м	$J(x)$, см	Θ_i , рад	Y_i , м
0,00000	148 636,4	0,0	0,0000000	0,129094	-0,046800	0,0000000
0,03825	148 636,4	5 685,3	108,7321449		-0,009234	0,0000516
0,07650	148 636,4	11 370,7	434,9285795		-0,003844	0,0008215
0,07650	148 636,4	11 370,7	434,9285795	4,318885	-0,003844	0,0008215
0,08275	148 636,4	12 299,7	508,8983949		-0,003839	0,0008215
0,08900	148 636,4	13 228,6	588,6743182		-0,003838	0,0008215
0,08900	148 636,4	13 228,6	588,6743182	1,416667	-0,003838	0,0008215
0,12700	148 636,4	18 876,8	1 198,677955		-0,000480	0,0008261
0,16500	148 636,4	24 525,0	2023,312500		0,000000	0,0008945
0,16500	148 636,4	-24 525,0	2023,312500	1,416667	0,000000	0,0008945
0,20300	148 636,4	-18 876,8	1 198,677955		0,000480	0,0008261
0,24100	148 636,4	-13 228,6	588,6743182		0,003838	0,0008215
0,24100	148 636,4	-13 228,6	588,6743182	4,318885	0,003838	0,0008215
0,24725	148 636,4	-12 299,7	508,8983949		0,003839	0,0008215
0,25350	148 636,4	-11 370,7	434,9285795		0,003844	0,0008215
0,25350	148 636,4	-11 370,7	434,9285795	0,129094	0,003844	0,0008215
0,29175	148 636,4	-5 685,3	108,7321449		0,009234	0,0000516
0,33000	148 636,4	0,0	0,0000000		0,046800	0,0000000

Примечание. X_i – координата сечения подкладки; q_i – распределенная нагрузка; Q_i – поперечная сила; M_i – изгибающий момент; $J(x)$ – момент инерции; Θ_i – угол поворота; Y_i – прогиб подкладки.

Таблица 3

Обобщенные результаты теоретического расчета прогибов рельсовой подкладки для трех сечений, мм

Сечение подкладки, м	Приложенная нагрузка P , т		
	5	10	15
0,08275	0,8215	1,6431	2,4646
0,16500	0,8945	1,7889	2,6834
0,24725	0,8215	1,6431	2,4646

4. Угол поворота (сечение $i = 0,127$ м). Так как рельсовая подкладка симметричная и нагрузка прикладывается по оси симметрии, сечение $i = l/2 = 0,33/2$ будет иметь угол поворота $\Theta_i = 0$ рад. Расчет углов будем производить, определив нулевое значение оси O_x по оси симметрии рельсовой подкладки.

По формуле (7) найдем q_i для сечения $i = 0,165$ м:

$$q_i = k(x)(Y_i - Y_{0i}) = 10^8 (0,0008215493 - 0) = 82 154,93 \text{ Н/м.}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \Theta_i &= \int_0^i \frac{Mdx}{EI(x)} = \int_{-0,076}^0 \frac{qx^2}{2EI(x)} = \\ &= \frac{82 154,93(-0,076)^3}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,129094 \cdot 10^{-8}} - \\ &- \frac{82 154,93 \cdot 0^3}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,129094 \cdot 10^{-8}} = -0,002121 \text{ рад.} \end{aligned}$$

5. Прогиб подкладки (сечение $i = 0,03825$ м)

$$\begin{aligned} Y_{2i} &= \int_0^i \frac{\Theta dx}{EI(x)} = \int_0^{0,03825} \frac{qx^3}{6EI(x)} = \\ &= \frac{5161,47 \cdot 0,03825^4}{6 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 0,129094 \cdot 10^{-8}} - \\ &- \frac{5161,47 \cdot 0^4}{6 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 0,129094 \cdot 10^{-8}} = \\ &= 0,0000017923 \text{ м.} \end{aligned}$$

Таким образом произведен расчет параметров прогибов каждого сечения рельсовой подкладки при нагрузке в 5 т (табл. 4).

Так же выполним расчет для приложенной нагрузки P , равной 10 и 15 т. Далее перейдем к третьему этапу – вычислению искомого прогиба рельсовой подкладки на деревянной шпале.

При нагрузке $P = 5$ т произведем расчет.

1. Итоговый прогиб (сечение $i = 0,03825$ м) определим как

$$Y_{i,\text{итог}} = Y_i + Y_{2i} = 0,0000516 + 0,00000179235 = 0,0000533924 \text{ м.}$$

Таблица 4

Расчет прогибов рельсовой подкладки при нагрузке 5 т на изношенной деревянной шпале

X_i , м	q_i , Н/м	Q_i , Н	M_i , Н·м	$J(x)$, см	Θ_i , рад	Y_i , м
0,00000	0,00	0,00	0,00000	0,129094	-0,002125	0,00000000000
0,03825	5 161,47	197,43	3,77578		-0,002125	0,00000179235
0,07650	82 153,18	6 284,72	240,39047		-0,002125	0,00045407090
0,07650	82 153,18	6 284,72	240,39047	4,318885	-0,002125	0,00045407090
0,08275	82 153,29	6 798,18	281,27489		-0,002122	0,00045407152
0,08900	82 154,93	7 311,79	325,37460		-0,002121	0,00045408057
0,08900	82 154,93	7 311,79	325,37460	1,416667	-0,002121	0,00045408057
0,12700	82 610,7	10 491,56	666,21399		-0,000267	0,00045661373
0,16500	89 447,33	14 758,81	1 217,60178		0,000000	0,00049438744
0,16500	89 447,33	-14 758,81	1 217,60178	1,416667	0,000000	0,00049438744
0,20300	82 610,7	-10 491,56	666,21399		0,000267	0,00045661373
0,24100	82 154,93	-7 311,79	325,37460		0,002121	0,00045408057
0,24100	82 154,93	-7 311,79	325,37460	4,318885	0,002121	0,00045408057
0,24725	82 153,29	-6 798,18	281,27489		0,002122	0,00045407152
0,25350	82 153,18	-6 284,72	240,39047		0,002125	0,00045407090
0,25350	82 153,18	-6 284,72	240,39047	0,129094	0,002125	0,00045407090
0,29175	5 161,47	-197,43	3,77578		0,002312	0,00000179235
0,33000	0,00	0,00	0,00000		0,002125	0,00000000000

Примечание. X_i – координата сечения подкладки; q_i – распределенная нагрузка; Q_i – поперечная сила; M_i – изгибающий момент; $J(x)$ – момент инерции; Θ_i – угол поворота; Y_i – прогиб подкладки.

2. Определим, на сколько процентов увеличился прогиб рельсовой подкладки на изношенной деревянной шпале (сечение $i = 0,03825$ м):

$$\Delta = \frac{Y_{i,\text{итог}} - Y_i}{Y_{i,\text{итог}}} \cdot 100 \% = \\ = \frac{0,0000533924 - 0,0000516}{0,0000533924} \cdot 100 \% = 3,36 \%.$$

Таким образом произведены расчет итогового прогиба и определение разницы между прогибом рельсовой подкладки на новой шпале и прогибом рельсовой подкладки на изношенной шпале в процентном выражении для каждого сечения рельсовой подкладки (табл. 5, рис. 2).

При нагрузке $P = 10$ т произведем расчет.

1. Итоговый прогиб (сечение $i = 0,03825$ м) определим как

$$Y_{i,\text{итог}} = Y_i + Y_{2i} = 0,0001032 + 0,0000035847 = \\ = 0,0000106842 \text{ м.}$$

2. Определим, на сколько процентов увеличился прогиб рельсовой подкладки на изношенной деревянной шпале (сечение $i = 0,03825$ м):

$$\Delta = \frac{Y_{i,\text{итог}} - Y_i}{Y_{i,\text{итог}}} \cdot 100 \% = \\ = \frac{0,0000106842 - 0,0001032}{0,0000106842} \cdot 100 \% = 3,36 \%.$$

Таким образом произведены расчет итогового прогиба и определение разницы между прогибом рельсовой подкладки на новой шпале и прогибом рельсовой подкладки на изношенной шпале в процентном выражении для каждого сечения рельсовой подкладки (табл. 6, рис. 3).

При нагрузке $P = 15$ т выполним расчет.

1. Итоговый прогиб (сечение $i = 0,03825$ м) определим как

$$Y_{i,\text{итог}} = Y_i + Y_{2i} = 0,0001548 + 0,00000538 = \\ = 0,00016018 \text{ м.}$$

2. Определим, на сколько процентов увеличился прогиб рельсовой подкладки на изношенной деревянной шпале (сечение $i = 0,03825$ м):

$$\Delta = \frac{Y_{i,\text{итог}} - Y_i}{Y_{i,\text{итог}}} \cdot 100 \% = \\ = \frac{0,00016018 - 0,0001548}{0,00016018} \cdot 100 \% = 3,36 \%.$$

Таким образом произведены расчет итогового прогиба и определение разницы между прогибом рельсовой подкладки на новой шпале и прогибом рельсовой подкладки на изношенной шпале в процентном выражении для каждого сечения рельсовой подкладки (табл. 7, рис. 4).

При анализе информации, указанной выше, получаем, что прогиб рельсовой подкладки на

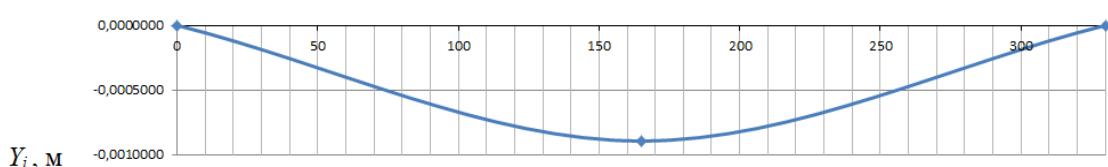
Таблица 5

Сравнение результатов прогиба рельсовой подкладки на новой и изношенной деревянной шпале при нагрузке 5 т

$X_i, \text{м}$	$Y_i, \text{м}$	$Y_{i2}, \text{м}$	%	$Y_{i,\text{итог}}, \text{м}$
0,00000	0,0000000	0,000000000000	0,00	0,000000000000
0,03825	0,0000516	0,0000179235	3,36	0,0000533924
0,07650	0,0008215	0,00045407090	35,60	0,001275571
0,07650	0,0008215	0,00045407090	35,60	0,001275571
0,08275	0,0008215	0,00045407152	35,60	0,001275572
0,08900	0,0008215	0,00045408057	35,60	0,001275581
0,08900	0,0008215	0,00045408057	35,60	0,001275581
0,12700	0,0008261	0,00045661373	35,60	0,001282714
0,16500	0,0008945	0,00049438744	35,60	0,001388887
0,16500	0,0008945	0,00049438744	35,60	0,001388887
0,20300	0,0008261	0,00045661373	35,60	0,001282714
0,24100	0,0008215	0,00045408057	35,60	0,001275581
0,24100	0,0008215	0,00045408057	35,60	0,001275581
0,24725	0,0008215	0,00045407152	35,60	0,001275572
0,25350	0,0008215	0,00045407090	35,60	0,001275571
0,25350	0,0008215	0,00045407090	35,60	0,001275571
0,29175	0,0000516	0,0000179235	3,36	0,0000533924
0,33000	0,0000000	0,000000000000	0,00	0,000000000000

Примечание. X_i – координата сечения рельсовой подкладки; Y_i – прогиб рельсовой подкладки, рассчитанный на первом этапе; Y_{i2} – прогиб рельсовой подкладки после окончания второго этапа расчета; % – разность в процентном отношении между величинами прогибов рельсовой подкладки, рассчитанными для каждого ее сечения новой и изношенной деревянной шпалы; $Y_{i,\text{итог}}$ – конечный прогиб рельсовой подкладки в любом ее сечении, являющийся итогом суммирования двух величин: прогиба рельсовой подкладки, полученного на первом этапе расчета Y_i , и прогиба рельсовой подкладки, полученного на втором этапе расчета.

a)



б)

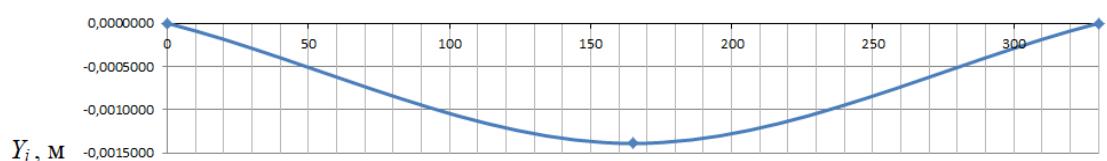


Рис. 2. Эпюра прогибов рельсовой подкладки при нагрузке 5 т (по оси X_i – длина рельсовой подкладки, по оси Y_i – величина прогиба рельсовой подкладки в сечении i):
a – на новой деревянной шпале; б – на изношенной деревянной шпале

изношенной деревянной шпале превышает прогиб на новой деревянной шпале на величину до 36 %. То есть фактически напряжения в рельсовой подкладке на изношенной деревянной шпале превышают напряжения в рельсовой подкладке на новой деревянной шпале, что не учитывают традиционные методы расчета рельсовых подкладок на прочность. Следовательно, размеры сечений существующих рельсовых

подкладок не соответствуют условиям прочности под расчетной нагрузкой. Прочность под расчетной нагрузкой определялась на основе сравнения значения максимального напряжения с допустимой величиной по формуле

$$\delta_{\max} \leq [\delta_c], \quad (8)$$

где δ_{\max} – величина максимального напряжения изгиба в данном сечении рельсовой под-

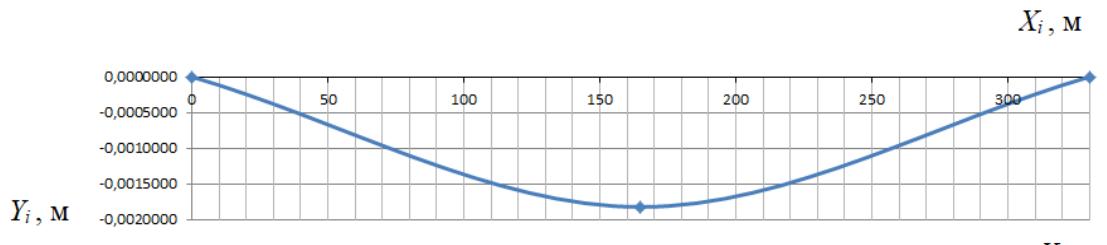
Таблица 6

Сравнение результатов прогиба рельсовой подкладки на новой и изношенной деревянной шпале при нагрузке 10 т

$X_i, \text{м}$	$Y_i, \text{м}$	$Y_{i2}, \text{м}$	%	$Y_{i,\text{итог}}, \text{м}$
0,00000	0,0000000	0,00000000000	0,00	0,0000000
0,03825	0,0001032	0,0000035847	3,36	0,000107
0,07650	0,0016431	0,0009081417	35,60	0,002551
0,07650	0,0016431	0,0009081417	35,60	0,002551
0,08275	0,0016431	0,0009081430	35,60	0,002551
0,08900	0,0016431	0,0009081611	35,60	0,002551
0,08900	0,0016431	0,0009081611	35,60	0,002551
0,12700	0,0016522	0,0009132274	35,60	0,002565
0,16500	0,0017889	0,0009887748	35,60	0,002778
0,16500	0,0017889	0,0009887748	35,60	0,002778
0,20300	0,0016522	0,0009132274	35,60	0,002565
0,24100	0,0016431	0,0009081611	35,60	0,002551
0,24100	0,0016431	0,0009081611	35,60	0,002551
0,24725	0,0016431	0,0009081430	35,60	0,002551
0,25350	0,0016431	0,0009081417	35,60	0,002551
0,25350	0,0016431	0,0009081417	35,60	0,002551
0,29175	0,0001032	0,0000035847	3,36	0,000107
0,33000	0,0000000	0,00000000000	0,00	0,0000000

Примечание. X_i – координата сечения рельсовой подкладки; Y_i – прогиб рельсовой подкладки, рассчитанный на первом этапе; Y_{i2} – прогиб рельсовой подкладки после окончания второго этапа расчета; % – разность в процентном отношении между величинами прогибов рельсовой подкладки, рассчитанными для каждого ее сечения новой и изношенной деревянной шпалы; $Y_{i,\text{итог}}$ – конечный прогиб рельсовой подкладки в любом ее сечении, являющийся итогом суммирования двух величин: прогиба рельсовой подкладки, полученного на первом этапе расчета Y_i , и прогиба рельсовой подкладки, полученного на втором этапе расчета.

a)



б)

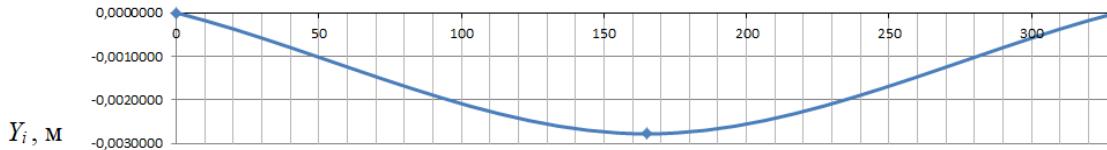


Рис. 3. Эпюра прогибов рельсовой подкладки при нагрузке 10 т (по оси X_i – длина рельсовой подкладки, по оси Y_i – величина прогиба рельсовой подкладки в сечении i):
a – на новой деревянной шпале; б – на изношенной деревянной шпале

кладки, МПа; $[\delta_c]$ – величина предельно допустимого напряжения изгиба в данном сечении рельсовой подкладки, МПа.

В пункте 5.2 ГОСТ 32694–2014 «Подкладки костыльного скрепления железнодорожного пути. Технические условия» [10] указано, что допускается изготавливать рельсовые подкладки из полос, прокатанных из сталей Ст4пс, Ст4кп, Ст4сп, Ст5. Максимально

предельное напряжение $[\delta_c]$ для стали Ст5 составляет 630 МПа. Тогда коэффициент запаса 1,5 $[\delta_c] = 945$ МПа.

Растягивающие напряжения в нижних волокнах подкладки от изгиба могут быть вычислены следующим образом:

$$\delta_{\max} = \frac{M_n}{W}, \quad (9)$$

$$W = \frac{l_n h^2}{6}, \quad (10)$$

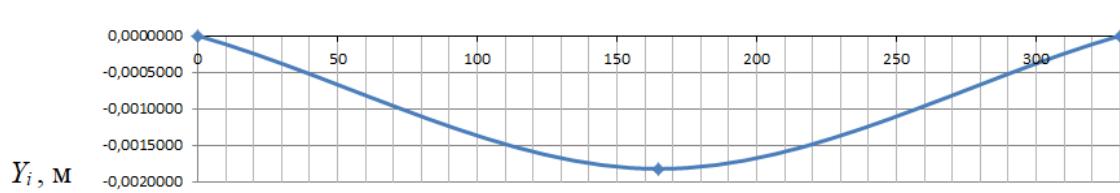
Таблица 7

Сравнение результатов прогиба рельсовой подкладки на новой и изношенной деревянной шпале при нагрузке 15 т

X_i , м	Y_i , м	Y_{i2} , м	%	$Y_{i,\text{итог}}$, м
0,00000	0,0000000	0,00000000	0,00	0,00000000
0,03825	0,0001548	0,00000538	3,36	0,00016018
0,07650	0,0024646	0,00136221	35,60	0,00382681
0,07650	0,0024646	0,00136221	35,60	0,00382681
0,08275	0,0024646	0,00136221	35,60	0,00382681
0,08900	0,0024646	0,00136224	35,60	0,00382684
0,08900	0,0024646	0,00136224	35,60	0,00382684
0,12700	0,0024783	0,00136984	35,60	0,00384814
0,16500	0,0026834	0,00148316	35,60	0,00416656
0,16500	0,0026834	0,00148316	35,60	0,00416656
0,20300	0,0024783	0,00136984	35,60	0,00384814
0,24100	0,0024646	0,00136224	35,60	0,00382684
0,24100	0,0024646	0,00136224	35,60	0,00382684
0,24725	0,0024646	0,00136221	35,60	0,00382681
0,25350	0,0024646	0,00136221	35,60	0,00382681
0,25350	0,0024646	0,00136221	35,60	0,00382681
0,29175	0,0001548	0,00000538	3,36	0,00016018
0,33000	0,0000000	0,00000000	0,00	0,00000000

Примечание. X_i – координата сечения рельсовой подкладки; Y_i – прогиб рельсовой подкладки, рассчитанный на первом этапе; Y_{i2} – прогиб рельсовой подкладки после окончания второго этапа расчета; % – разность в процентном отношении между величинами прогибов рельсовой подкладки, рассчитанными для каждого ее сечения новой и изношенной деревянной шпалы; $Y_{i,\text{итог}}$ – конечный прогиб рельсовой подкладки в любом ее сечении, являющийся итогом суммирования двух величин: прогиба рельсовой подкладки, полученного на первом этапе расчета Y_i , и прогиба рельсовой подкладки, полученного на втором этапе расчета.

a)



б)

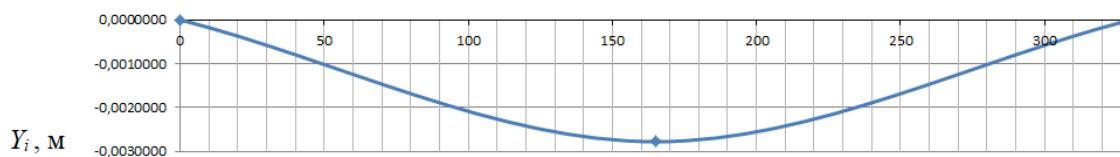


Рис. 4. Эпюра прогибов рельсовой подкладки при нагрузке 15 т (по оси X_i – длина рельсовой подкладки, по оси Y_i – величина прогиба рельсовой подкладки в сечении i):
a – на новой деревянной шпале; б – на изношенной деревянной шпале

где M_n – изгибающий момент в каждом сечении рельсовой подкладки, Н·м; W – момент сопротивления расчетного сечения рельсовой подкладки, мм^3 ; l_n – длина рельсовой подкладки в расчетном сечении, мм; h – толщина рельсовой подкладки в расчетном сечении, мм.

В данном расчете пренебрежем отверстиями в рельсовых подкладках ввиду незначительности их влияния на итоговый результат.

При нагрузке 10 т на новой деревянной шпале в сечении 0,165 м

$$\delta_{\max} = \frac{4046625}{330 \cdot 10^2 / 6} = 735,75 \text{ МПа.}$$

При нагрузке 10 т на изношенной деревянной шпале в сечении 0,165 м

$$\delta_{\max} = \frac{5503410,0}{330 \cdot 10^2 / 6} = 1000,2 \text{ МПа.}$$

Из данного расчета видно, что реальные напряжения изгиба, воспринимаемые рельсовой подкладкой при обычных эксплуатационных условиях, на изношенной деревянной шпале превышают предельно допустимые значения. При конструировании рельсовых подкладок определения их прочности по уровню изгибных напряжений недостаточно

для того, чтобы судить о правильности и целесообразности назначенных конструктивных размеров. Необходимо сопоставить рассматриваемые варианты рельсовых подкладок по их основному назначению: степени снижения давления от рельса на деревянную шпалу и уменьшения интенсивности механического износа.

Список источников

1. Абросимов В. И., Фролов Л. Н., Лисков А. И. Расчет стрелочной подкладки на прочность // Труды ЛИИЖТа. Л. : Транспорт, 1969. Вып. 296. С. 29–34.
2. Исследование деревянных шпал и скреплений для них / под ред. Г. М. Шахунянца. М. : Транспорт, 1968. 91 с. (Труды МИИТа; вып. 272).
3. Исследование работы подкладок стрелочных переводов при осевых нагрузках 30–50 тонн. Научно-технический отчет по теме № 22(20-72). Ленинград, 1973. (Из архива Ленпромтранспроекта; инв. № 2783-73).
4. Чусовитин М. С., Малышев К. С. Испытание рельсовой подкладки на деревянной шпале // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2016. Т. 13, вып. 3. С. 388–395.
5. Чусовитин М. С. Проблема механического износа деревянных шпал под рельсовыми подкладками // Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития» / Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2020. С. 345–349.
6. Говоров В. В., Дороничева С. А., Чусовитин М. С. Увеличение срока службы деревянных шпал // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2018. Т. 15, вып. 2. С. 183–193.
7. Титов В. П. Перемещения и деформации в конструкциях железнодорожного пути // Вестник ВНИИЖТ. 1994. Вып. 6. С. 8–16.
8. Тихонов А. Н., Васильева А. Б., Свешников А. Г. Дифференциальные уравнения : учебник для вузов. 4-е изд. М. : Физматлит, 2005. 253 с.
9. Путь и путевое хозяйство промышленных железных дорог / В. Ф. Яковлев, Б. А. Евдокимов, В. Е. Парунакян, А. Н. Перцев / под. ред. В. Ф. Яковleva. М. : Транспорт, 1990. 341 с.
10. ГОСТ 32694–2014. Подкладки костыльного скрепления железнодорожного пути. Технические условия // Консорциум «Кодекс» : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200112875> (дата обращения: 22.11.2021).

References

1. Abrosimov V. I., Frolov L. N., Liskov A. I. Calculation of the switch lining for strength. *Proceedings of LIIZhT*. L.: Transport, 1969;(296):29–34. (In Russ.).
2. Shakhunyants G. M., ed. Research of wooden sleepers and fastenings for them. M.: Transport; 1968. 91 p. (Proceedings of MIIT; issue 272). (In Russ.).
3. Investigation of the operation of turnout linings with axial loads of 30–50 tons. Scientific and technical report on the topic No. 22(20-72). Leningrad, 1973. (From the Lenpromtransproekt archive; Inv. no. 2783-73).
4. Chusovitin M. S., Malyshev K. S. Testing a rail lining on a wooden sleeper. *Bulletin Petersburg State University of Communications*. St. Petersburg: PGUPS; 2016;13(3):388–395. (In Russ.).
5. Chusovitin M. S. The problem of mechanical wear of wooden sleepers under rail linings. *Collection of scientific papers of the IV International Scientific and Practical Conference “Transport and Logistics: Spatial and Technological Synergy of Development”*. Rost. state University of Communications. Rostov on Don; 2020. P. 345–349. (In Russ.).
6. Govorov V. V., Doronicheva S. A., Chusovitin M. S. Increasing the service life of wooden sleepers. *Bulletin Petersburg State University of Communications*. St. Petersburg: PGUPS; 2018;15(2):183–193. (In Russ.).
7. Titov V. P. Displacements and deformations in railway track structures. *Vestnik VNIIZhT*. 1994;(6):8–16. (In Russ.).
8. Tikhonov A. N., Vasilyeva A. B., Sveshnikov A. G. Differential Equations: Textbook for Universities. 4th ed. M.: Fizmatlit; 2005. 253 p. (In Russ.).
9. Yakovlev V. F., Evdokimov B. A., Parunakyan V. E., Pertsev A. N.; Yakovleva V. F., ed. Way and track facilities of industrial railways. M.: Transport; 1990. 341 p. (In Russ.).

10. GOST 32694–2014. Linings of the crutch fastening of the railway track. Specifications. *Consortium “Kodeks”*: electronic fund of legal and normative-technical documents. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200112875>.

Информация об авторе

M. S. Чусовитин – заместитель главного инженера по производству ООО «НОВАТЭК-ТРАНССЕРВИС».

Information about the author

M. S. Chusovitin – Deputy Chief Engineer for Production at OOO NOVATEK-TRANSERVICE.

Статья поступила в редакцию 18.10.2021; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 18.10.2021; approved after reviewing 10.12.2021; accepted for publication 17.01.2022.

ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 656.073

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_68

Обоснование целесообразности создания распределительного центра в условиях взаимодействия разных видов транспорта

Анна Павловна Грефенштейн

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, anna_020295@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена оценке влияния городского распределительного центра на суммарное количество доставок и скопление грузового автотранспорта при разных вариантах организации ввода-выхода внешнего грузопотока.

Подход, рассмотренный в статье, основывается на том, что каждый клиент (получатель, отправитель) выступает в роли генератора, который вносит определенный вклад в общее количество грузового трафика. В работе произведена оценка изменения удельного вклада каждого клиента и суммарного количества доставок при расположении центра в рассматриваемом районе, когда внешний грузопоток обслуживается автомобильным или железнодорожным транспортом. Расчеты показали, что в первом случае технология не будет способствовать улучшению работы из-за концентрации логистической деятельности, а во втором – центр распределения может оказывать положительное воздействие.

В работе сформулировано ключевое правило: если эффект от консолидации грузов при доставке клиентам превышает эффект от концентрации грузовых транспортных средств в окрестности городского распределительного центра, тогда проект уместен в таком районе, в котором получатели и отправители не координируют доставки иным путем.

Ключевые слова: распределительный центр, городская логистика, доставка, перевозка, груз, виды транспорта

Для цитирования: Грефенштейн А. П. Обоснование целесообразности создания распределительного центра в условиях взаимодействия разных видов транспорта // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 68–75. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_68.

TRANSPORT

Original article

Justification of urban consolidation centre expediency with interaction transport modes

Anna P. Grefenshteyn

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia, anna_020295@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the influence of the creation of an urban consolidation centre on the accumulation of trucks in different scenarios of organizing the input and output of external freight traffic.

The article is based on the fact that each customer (recipient and sender) acts as a generator, which makes a certain contribution to the total amount of freight traffic. The work evaluates the change in the specific contribution of each customer and the total number of deliveries when the centre is located in the area under consideration, when the external freight traffic is served by road or rail. Calculations showed that in the first case, the technology will not cause improvements in the area due to the concentration of logistics activities, and in the second case, the consolidation centre can be efficient.

The article formulates the key principle: if the effect of consolidation of goods during the last-mile delivery of the exceeds the effect of freight vehicles concentration near the city consolidation centre, then the project is effective in an area where customers do not coordinate deliveries in any other way.

Keywords: consolidation centre, urban logistics, delivery, transportation, cargo, transport modes

For citation: Grefenshteyn A. P. Justification of urban consolidation centre expediency with interaction transport modes. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):68–75. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_68.

Введение

Специфика функционирования транспортно-логистических систем крупных городов неразрывно связана с градостроительными особенностями, дорожно-транспортной инфраструктурой (узлами, сетями и зонами), безопасностью на дорогах, мобильностью горожан, окружающей средой, жизнедеятельностью людей и рядом других внешних факторов. Поэтому разрабатываемые мероприятия по управлению процессами перевозок должны обеспечивать не только эффективность логистической деятельности, но и устойчивое развитие городских территорий [1] с учетом интересов всех сторон, на которые оказывает влияние этот процесс: организаторов перевозок (перевозчиков), обслуживаемых организаций и физических лиц (клиентов), городских властей, жителей города [2]. Описанный подход раскрывается в достаточно новой для российской науки концепции *городской логистики* (иначе – city logistic, сити-логистика, муниципальная логистика) [3, 4].

Важно отметить, что системы внутригородских перевозок по мере своего развития становятся сложнее за счет увеличения числа и трансформации структуры грузопотоков, роста количества пунктов их генерации (поглощения) при одновременном уменьшении мощности каждой отдельно взятой струи грузопотока [5]. Эти процессы обуславливают необходимость координации деятельности организаторов перевозок и консолидации доставляемых партий грузов [3, 6].

В городской логистике принципы координации и консолидации воплощаются в терминальной технологии перевозок с созданием городского распределительного центра (ГРЦ) или их сети. Несмотря на то что идея ГРЦ восходит к 1970-м годам и известны успешные проекты такого типа в Германии [7], многие попытки их реализации оказались неудачными [8]. В связи с этим в данном вопросе необходима систематизация существующей научно-методологической информации и предшествующего опыта для выявления условий рациональности новой концепции. В предыдущем исследовании автора [9] была выполнена оценка влияния ГРЦ на изменение суммарного пробега автомобилей. Данная работа развивает отмеченное направление, ее цель определена как оценка влияния ГРЦ на скопление автомобильного транспорта.

Обзор литературы

Многие современные исследования оценивают возможность расширения области применения отличных от автомобильных систем транспорта. В связи с этим далее рассмотрены работы, посвященные *альтернативным* проектам по организации городских перевозок.

Авторы статьи [10] предложили метод и доказали положительное влияние строительства *подземной транспортно-логистической системы для транспортировки контейнеров* на загрузку улиц (до 28 %) и выбросы в окружающую среду (до 40 %) на примере Шанхая.

Другой коллектив авторов [11] разработал метод оценки использования городского пассажирского железнодорожного транспорта для грузовых перевозок на примере Пекина. Модели, учитывающие влияние внешних факторов на продвижение идеи, доказали, что проекты с более высоким финансированием и провозной способностью позволяют максимально сократить скопление транспорта, загрязнения и аварии на улицах и дорогах.

Авторы статьи [12] с помощью программного обеспечения SIMUL8 проанализировали возможность перевозки городских грузов по железной дороге в Великобритании. Результаты показали, что использование по-новому малоинтенсивных железнодорожных линий позволяет решить не только проблему растущего загрязнения CO₂ и другими парниковыми газами, но и проблему энергоэффективности за счет повышения производительности железнодорожных линий.

В работе [13] всесторонне рассмотрены интермодальные автомобильно-железнодорожные перевозки. Доказано, что городской контекст железнодорожных перевозок положительно влияет на функционирование транспортных систем, но жизнеспособность идеи определяется прежде всего заинтересованностью ответственных лиц в продвижении новой концепции многовидовых городских перевозок.

Таким образом, целесообразность использования рельсового транспорта в городском грузодвижении обосновывается в первую очередь оценкой внешних улучшений, которые принесет отказ от автомобилей, а не экономической эффективностью нового проекта.

Основная часть

Исследование R. M. Mepparambath, L. Cheah и C. Courcoubetis [14] позволяет определить снижение суммарного количества доставок¹ на рассматриваемой территории за счет консолидации грузов разных клиентов в одном транспортном средстве (ТС) в рамках одной поездки.

Подход основывается на идее, что каждый клиент (получатель, отправитель) выступает в роли генератора, который вносит определенный удельный вклад в общее количество грузового трафика. Спрос каждого клиента на требуемое количество поставок и, соответственно, количество заявок на доставку определяются выбранной им моделью управления запасами.

Тогда цель ГРЦ – при полном удовлетворении спроса, не меняя требуемого количества поставок в рамках дня, сократить удельный вклад и общее количество грузовых поездок в жилых и коммерческих районах города. Это, в свою очередь, уменьшит загромождение пространства и скопление ТС в местах погрузки и выгрузки на улично-дорожной сети вдоль тротуаров или на них, тем самым снизит помехи дорожному и пешеходному движению [15].

Опишем физический смысл заложенного принципа на конкретном примере (рис. 1). Пусть получателям s_1 и s_2 (пара магазинов в одном здании) ТС в течение дня привозят по одной партии товаров, тогда удельный вклад в общее количество доставок у каждого из них равен единице (s_1 и s_2 генерируют по одной грузовой поездке, а вместе – две, рис. 1, а). Если бы s_1 и s_2 скоординировали свою деятельность, то их мог

бы обслужить один грузовик за раз, тогда удельный вклад каждого снизился бы до 0,5 (в этом случае s_1 и s_2 генерируют «по половине» поездки, а вместе – одну (см. рис. 1, б)).

Таким образом, зная, консолидируют ли в настоящее время поставки клиенты, сколько партий грузов можно объединить в одном грузовом автомобиле при создании ГРЦ, а также долю клиентов, готовых применить новую технологию, можно посчитать эффект на *последней милю* от такого центра [9]. Однако также важно учитывать, что ГРЦ является пунктом погрузки (фиктивным отправителем) и выгрузки (фиктивным получателем), а значит, сам вносит вклад в скопление грузового трафика в таком районе города, где, наоборот, нужно сократить это скопление. Так, на ГРЦ заканчиваются внешние поставки грузов, а также обратные рейсы от клиентов.

Обратные рейсы соответствуют ранее выполненным прямым, поэтому вклад ГРЦ в общее количество обратных поездок можно определить эквивалентно прямым (рис. 2, а).

Порядок учета внешних поставок опишем на примере (см. рис. 2, б). Пусть до введения терминальной технологии получателей s_2 и s_3 обслуживал один перевозчик одним ТС (выполнения две доставки), теперь он может выполнить лишь одну доставку до ГРЦ, объединив товары для s_2 и s_3 в грузовом автомобиле, при этом сам ГРЦ для внешнего транспорта выступает в роли фиктивных клиентов \tilde{s}_2 и \tilde{s}_3 , соответствующих реальным s_2 и s_3 .

С учетом вышеизложенного условие целесообразности распределительного центра опре-

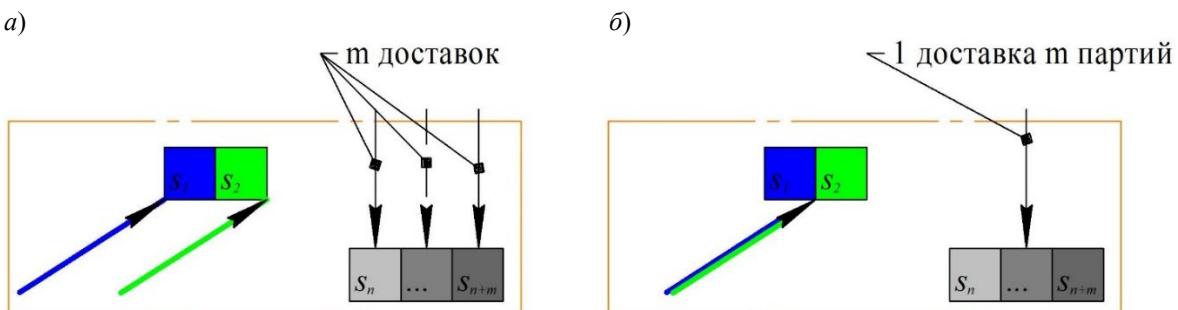


Рис. 1. Графическое представление эффекта от консолидации партий грузов:
а – до консолидации; б – после консолидации

¹ Доставка рассматривается как грузовая поездка от пункта погрузки до пункта выгрузки (или

наоборот), т. е. перемещение, ограниченное только двумя точками – А и Б.

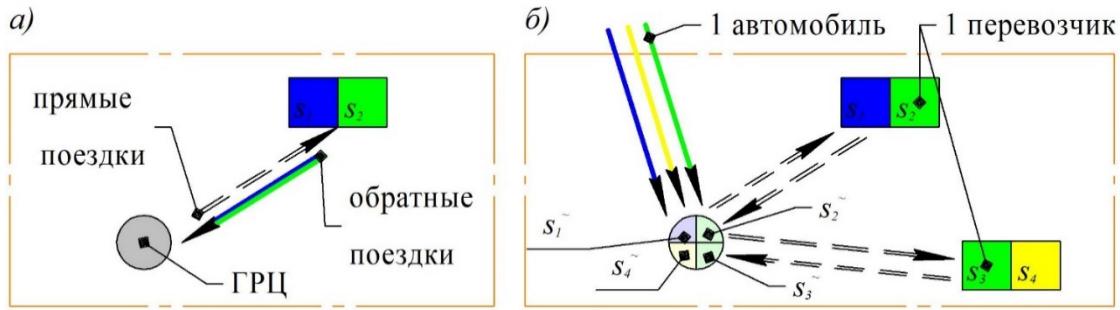


Рис. 2. Иллюстрация учета поездок, заканчивающихся на ГРЦ:
а – обратных; б – внешних

деляется отношением количества доставок после введения такого центра в рассматриваемом районе к количеству доставок до его создания (методом сопоставления «стало/было»).

Если после создания ГРЦ не используются новые виды транспорта и грузовые ТС не меняются на более производительные, расчет R -критерия [14] можно выполнить по формуле

$$R = \frac{\hat{T}_m + \hat{T}_u}{T_m} = \\ = \alpha \left(\frac{2k}{\varphi} + \frac{k}{1 + \alpha(h - 1)} \right) + \\ + (1 - \alpha) \frac{k}{1 + (1 - \alpha)(k - 1)}, \quad (1)$$

где \hat{T}_m , T_m – суммарное количество доставок клиентам после и до введения ГРЦ соответственно, шт.; \hat{T}_u – суммарное количество доставок ГРЦ (обратные и внешние), шт.; α – уровень участия, $0 \leq \alpha \leq 1$; φ – уровень консолидации, партий; k – среднее количество клиентов в одном

пункте, поставки которым объединяются (до введения ГРЦ), шт.; h – среднее количество клиентов в разных пунктах, поставки которым осуществляются одним ТС (до введения ГРЦ), шт.

Сокращение доставок должно быть максимальным, т. е.

$$R < 1, R \rightarrow \min. \quad (2)$$

При $R \geq 1$ проект не приведет к улучшениям из-за концентрации грузовых средств.

Проиллюстрируем на рис. 3 физический смысл некоторых переменных, использованных в выражениях (1) и (2).

Если до введения ГРЦ грузовой автомобиль в рамках i -й доставки обслуживает двух клиентов, находящихся в одном пункте, то $k_{i,s} = 2$ (см. рис. 3, а). Если до введения ГРЦ грузовое ТС обслуживает рамках i -го маршрута² три промежуточных пункта (см. рис. 3, а), тогда $h_{i,s} = 3$. В модели считается, что поездки, организованные ГРЦ, маятниковые (см. рис. 3, б).

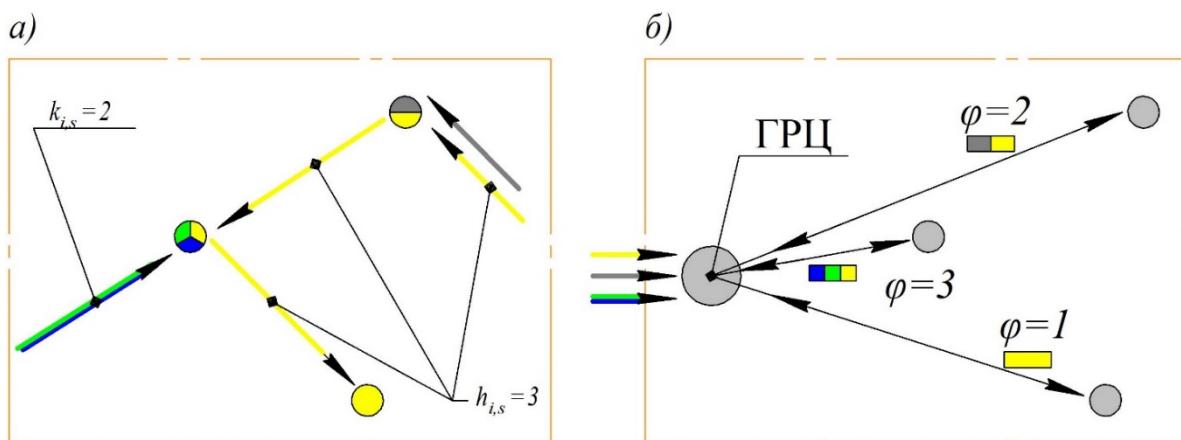


Рис. 3. Графическое представление описанного подхода:
а – до создания ГРЦ; б – после создания ГРЦ

² Маршрут рассматривается как грузовая поездка от начального центрального пункта до возвращения в него (с промежуточными точками заезда).

вращения в него (с промежуточными точками заезда).

Расчет критерия $R = f(\alpha, \varphi)$ по формуле (1) при разных k и h позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, если каждое грузовое ТС обслуживает лишь одного клиента и доставляет товары только в один пункт назначения, т. е. $h = k = 1$, то после создания ГРЦ увеличится концентрация логистической деятельности. Иными словами, если до введения ГРЦ в исследуемом районе были аккумулированы автомобили, обслуживающие клиентов, то теперь в нем будут сконцентрированы еще и грузовики, обслуживающие внешние грузопотоки, а также обратные рейсы.

Описанная тенденция распространяется на все случаи, когда $h = k$. Таким образом, если клиенты в одном пункте доставки (например, несколько магазинов в одном торговом центре) уже обслуживаются одним ТС перевозчика, т. е. $k > 1$ (см. рис. 2, а и 3, а), то предлагаемый проект не целесообразен и не приведет к улучшениям. То есть $R = f(\alpha, \varphi) \geq 1$ при $h = k \in N$.

Во-вторых, если перевозчик (одна машина) обслуживает более одного пункта назначения в рассматриваемом районе, но в каждом промежуточном пункте лишь одного клиента, т. е. $h > k$, $k = 1$, то при определенных α и φ может быть достигнут положительный эффект за счет таких перевозчиков, которые совершают несколько доставок в h пунктов назначения, а впоследствии смогут доставить h партий грузов лишь до ГРЦ за раз (см. рис. 3).

Пример проверки условия (1) при $k = 1$ и $h = 3$ представлен в таблице. Расчеты показывают, что для достижения условия $R < 1$ потребуется консолидировать не менее четырех партий при вовлечении в новую технологию

от 20 до 50 % всех получателей и отправителей в районе, что на начальных этапах оказывается крайне затруднительным. Это объясняет необходимость государственной, муниципальной и (или) частной поддержки проекта.

В-третьих, последующие расчеты продемонстрировали положительное влияние увеличения h на критерий R . Этот факт позволяет выдвинуть гипотезу, что внешние поставки до (от) ГРЦ целесообразно обслуживать грузовым транспортом большой грузоподъемности (грузовместимости) и провозной способности [16].

На практике это может быть реализовано путем создания ГРЦ на базе складских объектов бывших промышленных предприятий, которые вследствие перестройки в экономике страны после 90-х гг. во многих городах России либо закрылись, либо сузили деятельность. В таком случае внешние поставки до (от) центра распределения могут обслуживаться железнодорожным транспортом, в том числе с использованием подъездных путей промышленно-складских зон. Подробно данная идея рассмотрена в [6].

Для оценки влияния ГРЦ в условиях взаимодействия разных видов транспорта на скопление грузовых автомобилей была изменена формула (1). Таким образом, расчет R -критерия для автомобильно-железнодорожных перевозок с ГРЦ можно выполнить следующим образом:

$$R = 2\alpha \frac{k}{\varphi} + (1 - \alpha) \frac{k}{1 + (1 - \alpha)(k - 1)}. \quad (3)$$

Полученный графический результат при разных k изображен на рис. 4, проекции поверхностей $R = f(\alpha, \varphi)$ – на рис. 5. Представленные графики демонстрируют, что при $k > 1$ (см. рис. 5, б) ГРЦ не способен кардинально

Значения $R = f(\alpha, \varphi)$ при $k = 1$ и $h = 3$

Уровень участия α	Уровень консолидации φ , партий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,1	1,18	1,08	1,05	1,03	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01	1,00
0,2	1,34	1,14	1,08	1,04	1,02	1,01	1,00	0,99	0,99	0,98
0,3	1,49	1,19	1,09	1,04	1,01	0,99	0,97	0,96	0,95	0,95
0,4	1,62	1,22	1,09	1,02	0,98	0,96	0,94	0,92	0,91	0,90
0,5	1,75	1,25	1,08	1,00	0,95	0,92	0,89	0,88	0,86	0,85
0,6	1,87	1,27	1,07	0,97	0,91	0,87	0,84	0,82	0,81	0,79
0,7	1,99	1,29	1,06	0,94	0,87	0,83	0,79	0,77	0,75	0,73
0,8	2,11	1,31	1,04	0,91	0,83	0,77	0,74	0,71	0,69	0,67
0,9	2,22	1,32	1,02	0,87	0,78	0,72	0,68	0,65	0,62	0,60
1,0	2,33	1,33	1,00	0,83	0,73	0,67	0,62	0,58	0,56	0,53

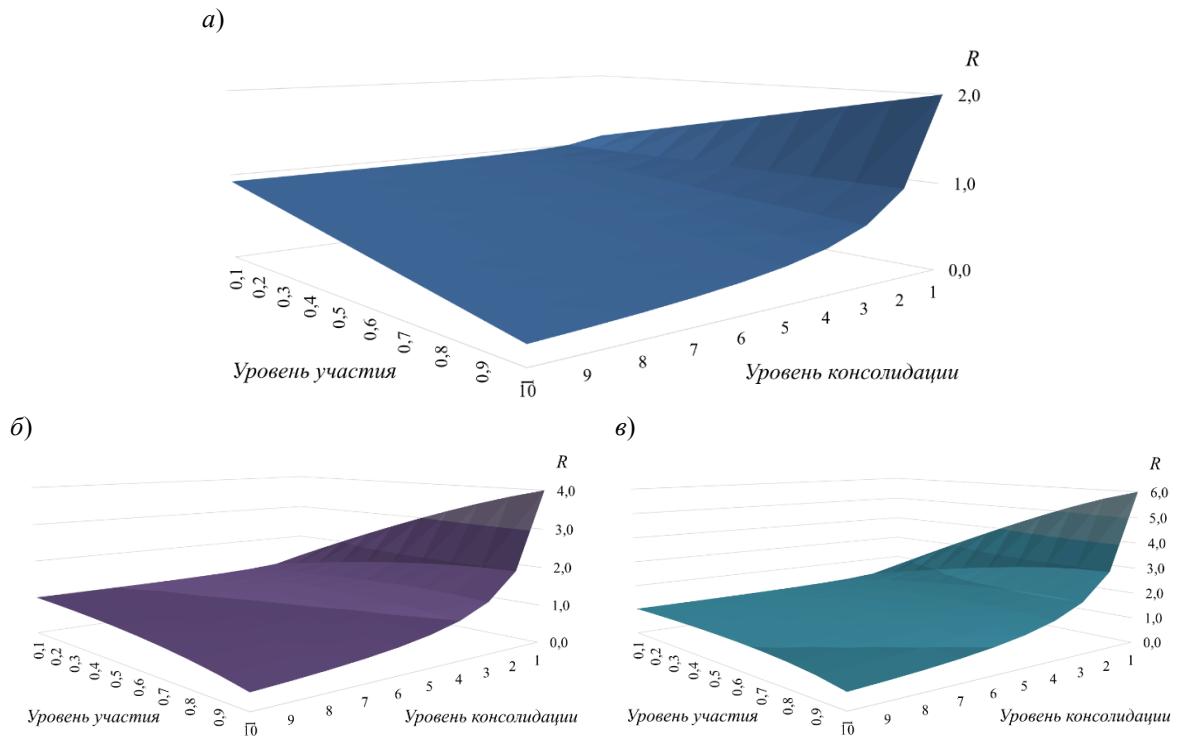


Рис. 4. Изменение $R = f(\alpha, \varphi)$ после создания ГРЦ в условиях взаимодействия разных видов транспорта:

a – при $k = 1$; *b* – при $k = 2$; *c* – при $k = 3$

улучшить ситуацию, но при $k = 1$ (см. рис. 5, *a*) у проекта появляется большой потенциал. Иллюстрации (см. рис. 4, *a* и 5, *a*) свидетельствуют о положительном влиянии ГРЦ с разными видами транспорта и демонстрируют, что выгода от технологии достигается при объединении

свыше двух партий грузов при любом уровне участия клиентов в ней.

Стоит отметить, что в абстрактном расчетном примере для нахождения критического уровня φ его значение варьировалось от 1 до 10 (см. рис. 4 и 5). Однако при использовании

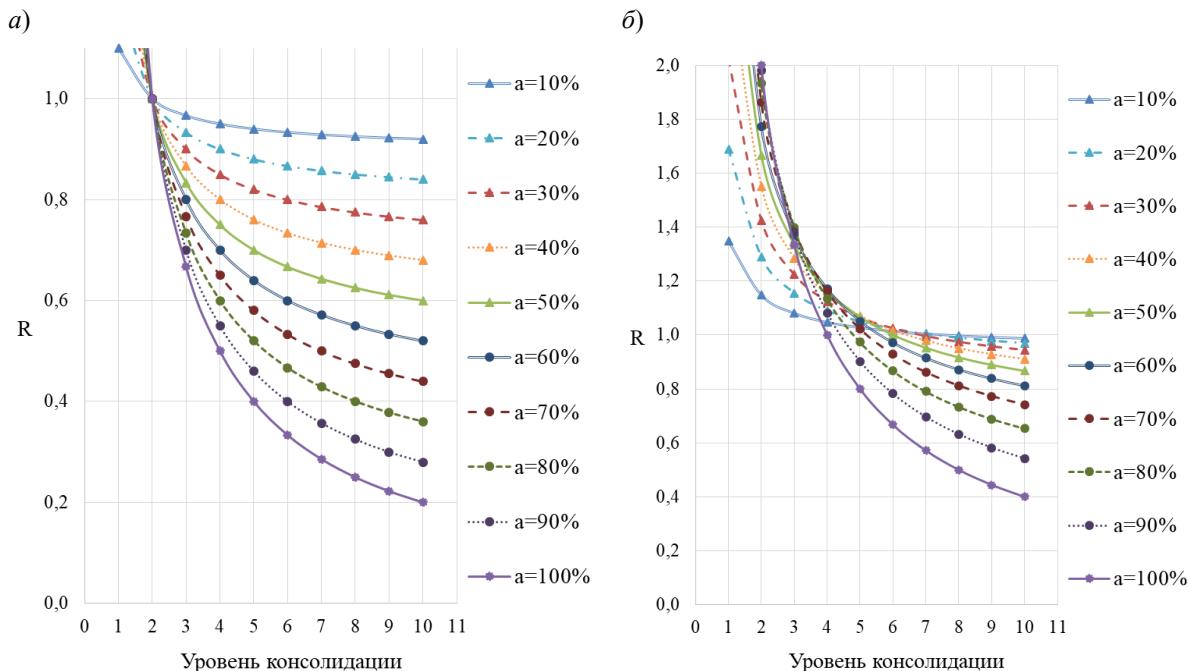


Рис. 5. Влияние уровня консолидации φ на R при разных уровнях участия α :

a – при $k = 1$; *b* – при $k = 2$

предложенной методики на практике при определении реально возможного ф необходи́мо учитывать ограничения по грузоподъёмности используемых ТС и объемно-массовые характеристики перевозимых грузов.

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить условия целесообразности обслуживания распределительного центра разными видами транспорта методом оценки влияния такого *автомобильно-железнодорожного сотрудничества* на скопление грузовых ТС и на суммарное количество доставок в анализируемом районе города. Для этого ранее известная модель [14] была адаптирована под случай взаимодействия двух видов транспорта, в частности ввода-вывода грузов по железнодорожным линиям.

Важной особенностью является то, что при расположении ГРЦ внутри границ города невозможно исключить скопление возвратных ТС у центра консолидации. В связи с этим важной чертой наличия ГРЦ является одновременное его *полярное* (положительное и от-

рицательное) влияние на количество средств транспорта.

Проведенные расчеты в данной статье и предыдущее исследование [9] позволили сформулировать ключевое правило: если положительный эффект от консолидации грузов при доставке *последней мили* превышает отрицательный эффект концентрации грузовых ТС в окрестности ГРЦ, то проект целесообразен в таком районе, в котором получатели и отправители не координируют свою деятельность иным путем.

В статье продемонстрирован большой потенциал примененной методики. Она позволяет визуализировать полученные расчеты в любом удобном для пользователя виде: в таблицах, поверхностях (объемных фигурах) или двумерных (плоских) графиках. Произведенные расчеты и полученные выводы позволяют внести дополнительный вклад в данную область знаний и могут быть использованы в качестве рекомендаций в научно-методической, технической и справочной литературе, а также при обосновании принимаемых решений в сфере логистики.

Список источников

1. Стратегии «устойчивого транспорта»: лучшие мировые практики / В. М. Комаров, В. А. Коцюбинский, В. В. Акимова [и др.]. М., 2019. 68 с.
2. Felix K., Marlin W. U., Dirk C. M. Cooperative Traffic Control Management for City Logistic Routing // Transportation Research Procedia. 2015. № 10. Р. 673–682.
3. Сыздыкаева Б. У., Раимбеков Ж. С., Сейдуалин Д. А. Организация грузовых перевозок в системе городской логистики товародвижения: зарубежный опыт // Бюллетень науки и практики. Нижневартовск : Наука и практика, 2018. Т. 4, № 7. С. 388–398.
4. Роженко М. К. Городская логистика: тренды и вызовы // Корпоративная логистика. 2018. № 4 (84), август. С. 52–59.
5. Рахмангулов А. Н., Копылова О. А. Размещение региональных логистических центров : монография // Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2015. 172 с.
6. Псеровская Е. Д., Грефенштейн А. П. Проблема развоза грузов в крупных городах с участием разных видов транспорта // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2020. № 1. С. 34–40.
7. Chwesiuk K., Kijewska K., Iwan S. Urban consolidation centres for medium-size touristic cities in the Westpomeranian Region of Poland // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2010. Vol. 2, № 3. Р. 6264–6273.
8. A game-theoretic multi-stakeholder model for cost allocation in urban consolidation centres / Fr. Ciardiello, A. Genovese, S. Luo [et al.]. Annals of Operations Research. 2021. Vol. 289. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04013-3>.
9. Псеровская Е. Д., Грефенштейн А. П. Оценка эффективности распределительного центра при разных вариантах консолидации грузопотоков // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 22–27.
10. Effects of underground logistics system on urban freight traffic: A case study in Shanghai, China / D. Hai, Ju. Xu, Zh. Duan [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 260. 121019 p.
11. Using system dynamics to analyze the development of urban freight transportation system based on rail transit: A case study of Beijing / Hu. Wanjie, D. Jianjun, H. Bon-gang [et al.] // Sustainable Cities and Society. 2020. Vol. 53. 101923 p.
12. Potti P., Marinov M., Sweeney E. A Simulation Study on the Potential of Moving Urban Freight by a Cross-City Railway Line // Sustainability. 2019. Vol. 11, № 21. P. 1–19.
13. Behrends S. Burden or opportunity for modal shift? – Embracing the urban dimension of intermodal road-rail transport // Transport Policy. 2017. Vol. 59. P. 10–16.
14. Mepparambath R. M., Cheah L., Courcoubetis C. A theoretical framework to evaluate the traffic impact of urban freight consolidation centres // Transportation Research. Pt. E. 2021. № 145. P. 1–15.

15. Влияние парковок на транспортные задержки в крупных городах / А. П. Грефенштейн, С. Н. Павлов, Ю. В. Павлова, И. И. Валов // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 1 (70). С. 105–111.
16. Kijewska K., Iwan S., Korczak J. Challenges to increase the sustainable urban freight transport in South Baltic Region – LCL project // Transportation Research Procedia. 2019. Vol. 39. P. 170–179.

References

1. Komarov V. M., Kotsyubinsky V. A., Akimova V. V. [et al.]. Strategies of “sustainable transport”: the best world practices. M.; 2019. 68 p. (In Russ.).
2. Felix K., Marlin W. U., Dirk C. M. Cooperative Traffic Control Management for City Logistic Routing. *Transportation Research Procedia*. 2015;(10):673–682.
3. Syzdykbaeva B. U., Raimbekov Zh. S., Seydualin D. A. Organization of freight transportation in the system of urban logistics of goods movement: foreign experience. *Bulletin of science and practice*. Nizhnevartovsk: Science and Practice. 2018;4(7):388–398. (In Russ.).
4. Rozhenko M. K. Urban logistics: trends and challenges. *Corporate logistics*. 2018;4(84):52–59. (In Russ.).
5. Rakhmangulov A. N., Kopylova O. A. Placement of regional logistics centers: monograph. Magnitogorsk: Publishing House of Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov; 2015. 172 p. (In Russ.).
6. Pserovskaya E. D., Grefenshtein A. P. The problem of cargo delivery in large cities with the participation of different types of transport. *Fundamental and applied problems of transport*. 2020;(1):34–40. (In Russ.).
7. Chwesiuk K., Kijewska K., Iwan S. Urban consolidation centres for medium-size touristic cities in the Westpomeranian Region of Poland. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2010;2(3):6264–6273.
8. Ciardiello Fr., Genovese A., Luo S. [et al.]. A game-theoretic multi-stakeholder model for cost allocation in urban consolidation centres. *Annals of Operations Research*. 2021;289. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04013-3>.
9. Pserovskaya E. D., Grefenshtein A. P. Evaluation of the efficiency of the distribution center for different options for consolidating cargo flows. *Transport of the Urals*. 2021;3(70):22–27. (In Russ.).
10. Hai D., Xu Ju., Duan Zh. [et al.]. Effects of underground logistics system on urban freight traffic: A case study in Shanghai, China. *Journal of Cleaner Production*. 2020;(260):121019.
11. Wanjie Hu., Jianjun D., Bon-gang H. [et al.]. Using system dynamics to analyze the development of urban freight transportation system based on rail transit: A case study of Beijing. *Sustainable Cities and Society*. 2020;(53):101923.
12. Potti P., Marinov M., Sweeney E. A Simulation Study on the Potential of Moving Urban Freight by a Cross-City Railway Line. *Sustainability*. 2019;11(21):1–19.
13. Behrends S. Burden or opportunity for modal shift? – Embracing the urban dimension of intermodal road-rail transport. *Transport Policy*. 2017;(59):10–16.
14. Mepparambath R. M., Cheah L., Courcoubetis C. A theoretical framework to evaluate the traffic impact of urban freight consolidation centres. *Transportation Research. Pt. E*. 2021;(145):1–15.
15. Grefenshtein A. P., Pavlov S. N., Pavlova Yu. V., Valov I. I. Effect of parking on transport delays in large cities. *Bulletin of Transport of the Volga Region*. 2020;1(70):105–111. (In Russ.).
16. Kijewska K., Iwan S., Korczak J. Challenges to increase the sustainable urban freight transport in South Baltic Region – LCL project. *Transportation Research Procedia*. 2019;(39):170–179.

Информация об авторе

А. П. Грефенштейн – аспирант, преподаватель кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

A. P. Grefenshtein – post-graduate student, lecturer of the Department of Logistics, Commercial Work and Rolling Stock, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 03.11.2021; одобрена после рецензирования 23.11.2021; принята к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 03.11.2021; approved after reviewing 23.11.2021; accepted for publication 17.01.2022.

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 625.143.482
doi 10.52170/1815-9265_2022_60_76

Совершенствование производственного процесса терmitной сварки рельсов

Эдуард Сергеевич Сидоров

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

Аннотация. Термитный способ сварки рельсов в настоящее время применяется для соединения железнодорожных рельсов, элементов стрелочных переводов и ремонта бесстыкового пути. Широкое распространение такого метода сварки связано с относительно невысокой стоимостью рельсовых соединений. Недостатком термитной сварки рельсов является значительная продолжительность технологического процесса получения рельсовых соединений, которая составляет порядка 159...189 мин.

В данной статье предложена технология шлифования термитных сварных швов в горячем состоянии, позволяющая сократить продолжительность процесса получения сварных соединений рельсов до 74...76 мин. Рекомендуется вместо двух операций шлифования, предварительного и окончательного, выполнять одну в температурном интервале 600...560 °C. Выбор температурного интервала 600...560 °C базируется на результатах экспериментальных исследований, изложенных в данной статье. Шлифование сварных швов производили при разных температурах в диапазоне 850...560 °C. Затем оценивали твердость поверхности головки рельса, микротвердость в поперечном сечении, износостойкость и шероховатость поверхности катания в зоне сварного шва. Также были проведены микроструктурные исследования поверхностного слоя сварных швов. Согласно полученным результатам шлифование в интервале 600...560 °C приводит к повышению твердости поверхности катания в зоне сварного шва на 2...4 HRC. Измерения микротвердости в поперечном сечении показали, что толщина слоя с повышенной твердостью достигает 1...1,5 мм. Износостойкость образцов, шлифованных в температурном интервале 600...560 °C, была выше, чем других.

Апробация предлагаемой технологии подтвердила, что термитные сварные швы, шлифование которых выполняли в температурном интервале 600...560 °C, соответствуют требованиям технических условий на сварку рельсов термитным способом.

Ключевые слова: термитная сварка рельсов, сварные соединения рельсов, шлифование сварных швов, шлифование горячего металла, твердость сварных швов, износостойкость поверхности катания

Для цитирования: Сидоров Э. С. Совершенствование производственного процесса термитной сварки рельсов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 76–85. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_76.

TRANSPORT

Original article

Improving the technology of thermite rail welding

Eduard S. Sidorov

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

Abstract. Thermite welding used for connection rails, railroad switch elements and railroad repairs. The widespread use of this welding method is associated with the relatively low cost of receiving rail joints. The disadvantage of thermite welding of railways is the duration of the technological process for obtaining railway connections that is about 159...189 minutes.

This article proposes a technology for grinding thermite welds in a hot state, which makes it possible to reduce the duration of the process of obtaining welded rail joints to 74...76 minutes. It is recommended instead of two grinding operations, preliminary and final, to perform one grinding operation of thermite welds in the temperature range 600...560 °C. The temperature range 600...560 °C is based on the results of the experimental studies described in article. Grinding of welded joints was carried out at different temperatures in the range 850...560 °C. According to the results obtained, grinding in the range of 600...560 °C leads to an increase in the hardness of the tread surface in the weld zone by 2...4 HRC. Measurements of microhardness in the cross section showed that the

thickness of the layer with increased hardness reaches 1...1,5 mm. The wear resistance of samples ground in the temperature range of 600...560 °C was higher than that of other samples.

Approbation of the proposed technology confirmed that thermite welds, which were ground in a temperature range of 600...560 °C, meet the requirements of technical specifications for thermite welding of rails.

Keywords: thermite rail welding, rail welded joints, weld grinding, grinding of hot metal, weld hardness, wear resistance of the rail surface

For citation: Sidorov E. S. Improving the efficiency of the asphalt concrete mixture compaction with a smooth drum roller. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):76–85. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_76.

Протяженность бесстыкового пути сети железных дорог России постоянно увеличивается. В настоящее время более половины рельсов, уложенных в путь, соединено с помощью сварки. Наиболее широко распространен способ контактной электросварки. Однако получить сварные соединения рельсов в области стрелочных переводов, рельсовых пересечений и кривых малого радиуса возможно только термитным способом.

Одним из основных преимуществ метода термитной сварки является относительно невысокая стоимость получаемых рельсовых соединений в сравнении со стоимостью стыков, сваренных контактной электросваркой. Это связано с тем, что для сварки рельсов в условиях пути контактным способом необходимо использовать путевую рельсосварочную машину, а для соединения рельсов термитным способом достаточно комплекта переносного оборудования, которое может быть доставлено на место проведения работ на легковом автомобиле. Мобильность и невысокая стоимость оборудования для термитной сварки рельсов позволяет сформировать большее количество бригад сварщиков и организовать их параллельную работу. Благодаря этим преимуществам термитная сварка применяется для создания бесстыкового пути на перегонах [1–3].

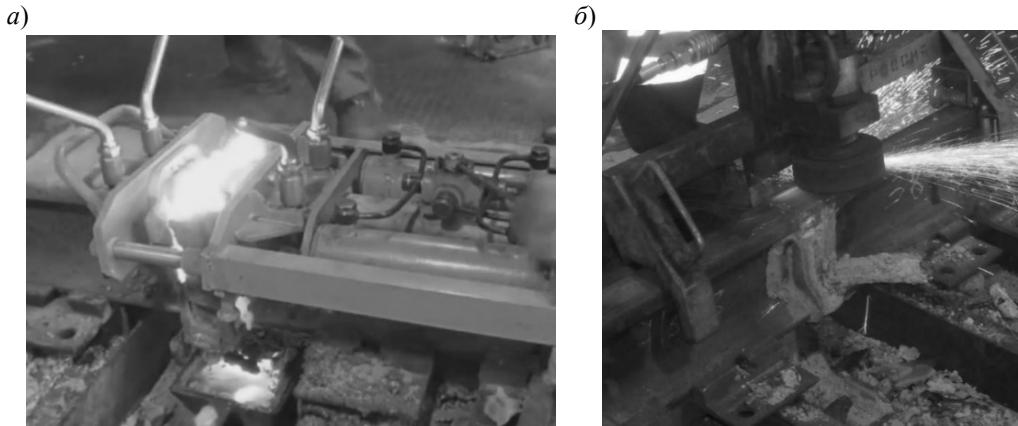
Термитная сварка рельсов выполняется методом промежуточного литья, поэтому технологический процесс включает в себя множество операций, которые условно разделяют на подготовительные, сварочные, послесварочные и контрольные. В результате на сварку одного рельсового стыка требуется достаточно много времени: от 159 до 189 мин. При этом на подготовительные и сварочные операции затрачивается не более 58...60 мин, а наибольшее количество времени отведено на формирование необходимого профиля головки рельса шлифова-

нием. Большая продолжительность работ по соединению рельсов требует организации длительных перерывов в движении поездов [4, 5].

Цель работы заключалась в сокращении продолжительности послесварочной обработки термитных рельсовых соединений за счет совершенствования технологии шлифования сварных швов рельсов.

При термитном способе сварки рельсов сварной шов формируется в результате кристаллизации жидкого металла, залитого в специальную литейную форму, смонтированную на концах соединяемых рельсов. Кристаллизация металла длится 180...240 с. Последующие операции направлены на удаление литейной формы, излишков металла и формирование необходимого профиля головки рельса. Верхнюю часть литейной формы вместе с излишками металла срезают с помощью гидравлического станка (рис. 1, а). После этой операции сварной шов выступает над поверхностью рельсов на 3...4 мм. Затем поверхность катания и боковые грани в области сварного шва шлифуют (см. рис. 1, б) в два этапа. Первый этап – предварительное шлифование шва в горячем состоянии до высоты 1 мм над поверхностью катания соединенных рельсов. Второй этап – окончательное шлифование в холодном состоянии до возвышения шва над рельсами на 0,2...0,8 мм. При этом, согласно технологической инструкции на сварку рельсов термитным способом, время ожидания полного остывания сварного шва, перед окончательным шлифованием, составляет 90...120 мин [4, 5]. Таким образом, большая продолжительность технологического процесса соединения рельсов термитным способом связана с длительным ожиданием остывания металла в зоне сварки.

Для оценки возможностей совершенствования процесса шлифования сварных швов рельсовых соединений были проведены



*Rис. 1. Послесварочная обработка сварного шва термитного рельсового соединения:
а – срезание прибыльной части гидравлическим станком; б – шлифование головки рельса*

наблюдения за процессом сварки рельсов термитным способом в условиях пути. Установлено, что на выполнение операций, предшествующих предварительному шлифованию, может потребоваться неодинаковое количество времени, так как они выполняются сварщиками вручную. В результате температура поверхности головки сварного шва к моменту выполнения операции предварительного шлифования может снижаться до 850...600 °C.

Анализ литературы [6, 7] о влиянии шлифования на механические свойства сталей показал, что шлифование металлов в горячем состоянии способствует измельчению микроструктуры поверхностного слоя, повышению его износостойкости, снижению остаточных напряжений и увеличению производительности процесса механической обработки. Однако в данных источниках отсутствуют сведения о влиянии шлифования в горячем состоянии на механические свойства термитных сварных швов.

Чтобы оценить влияние шлифования в горячем состоянии на механические свойства сварных швов термитных рельсовых соединений были проведены экспериментальные исследования, в рамках которых выполняли сварку рельсов термитным способом по технологической инструкции и производили шлифование головки рельса в зоне сварного шва в разных температурных интервалах: 850...750, 800...700, 700...630 и 600...560 °C. Из полученных соединений были вырезаны образцы сварных швов, проведены измерения твердости металла поверхности катания с помощью твердомера HB RV-187.5, микротвердости

в поперечном сечении поверхностного слоя сварных швов – с помощью твердомера Wolpert 402MVD и определена износостойкость поверхности катания сварных швов на машине испытательной МИ № 164. Кроме того, проведены микроструктурные исследования с помощью микроскопа металлографического Axio Observer Z1m при увеличении 500 крат и измерена шероховатость поверхности катания цифровым профилометром Mahr MarSurf PS1.

Согласно результатам исследования твердость поверхности катания сварных швов зависит от температуры, при которой производили шлифование. Твердость сварных швов, для которых шлифование не выполняли, составила от 32 до 33 HRC (рис. 2). Шлифование в температурном интервале 850...750 °C приводило к повышению твердости на 1...2 HRC до значений 33...34 HRC. Наиболее высокую твердость (34...36 HRC) имели сварные швы, шлифованные в температурном интервале 600...560 °C. В интервалах температур 800...700 и 700...630 °C наблюдалось снижение твердости до 31...25 HRC.

При измерении микротвердости в поперечном сечении сварных швов было установлено, что шлифование в горячем состоянии приводит к изменению твердости только в поверхностном слое, толщина которого достигает 1...1,5 мм. Формирование поверхностного слоя с повышенной твердостью возможно за счет шлифования в температурных интервалах 850...750 и 600...560 °C (рис. 3). Наиболее высокую твердость 360...350 HV обеспечивает шлифование в температурном интервале 600...560 °C.

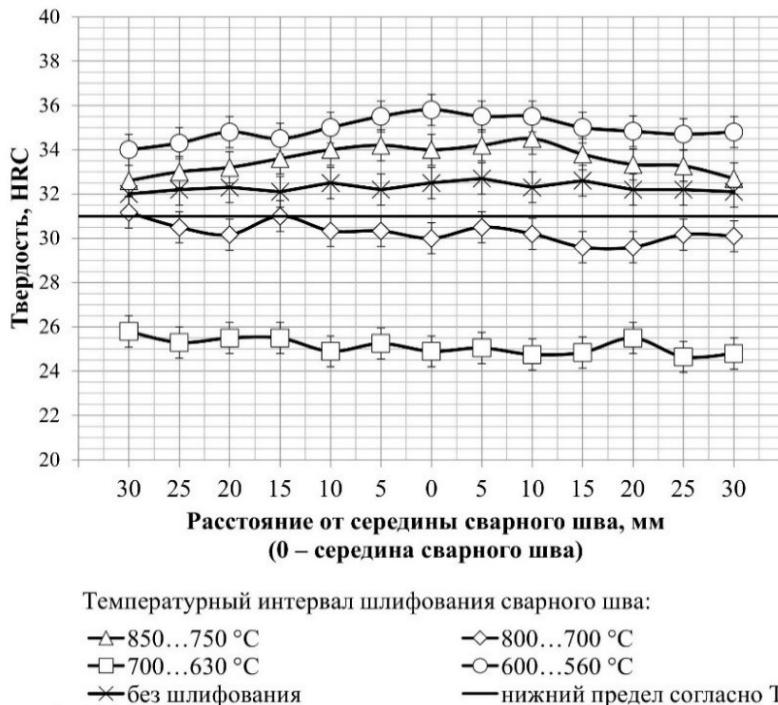


Рис. 2. Распределение значений твердости металла поверхности катания по длине сварных швов после шлифования в разных температурных интервалах

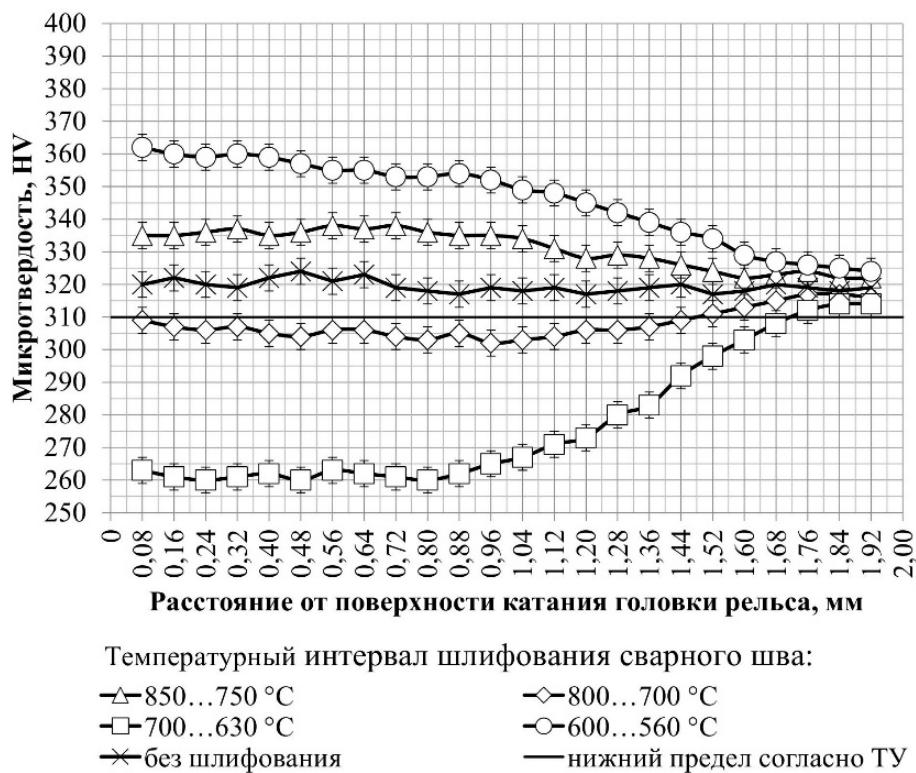


Рис. 3. Изменение значений микротвердости металла по глубине поверхностного слоя головки рельса сварных швов после шлифования в разных температурных интервалах

Испытания сварных швов рельсов на износостойкость проводили в соответствии с ГОСТ 30480–97 [8]. При испытаниях использовали инденторы в виде ролика диаметром 37,45 мм из закаленной стали ШХ15 и образцы сварных

швов, шлифованных в разных температурных интервалах, прямоугольного сечения. Для каждого образца использовали новый индентор. Испытания проводили по методу «врезания» ролика в поверхность катания сварных швов при

трении скольжения. Ролик вращался с частотой 200 об/мин и прижимался к поверхности сварного шва с усилием 50 кг.

Наименьшей износостойкостью обладали сварные швы рельсовых соединений, шлифование которых производили в температурном интервале 700...630 °C (рис. 4). Глубина внедрения индентора через 5 ч испытаний достигала порядка 1,2 мм. Величина износа поверхности катания сварных швов, шлифованных в температурных интервалах 850...750 и 800...700 °C, составила 1,05...1,1 мм. Наиболее высокую износостойкость обеспечивает шлифование сварных

швов в температурном интервале 600...560 °C. Глубина внедрения индентора в поверхность катания термитных сварных швов не превысила 0,95 мм.

Согласно результатам микроструктурных исследований поверхностного слоя термитных рельсовых соединений структура швов контрольных образцов, которые не подвергали шлифованию в горячем состоянии, представляла собой феррито-цементитную смесь (рис. 5, а). Металл сварных швов, шлифованных в горячем состоянии, имел иную структуру (см. рис. 5, б-д). Это связано с тем, что в

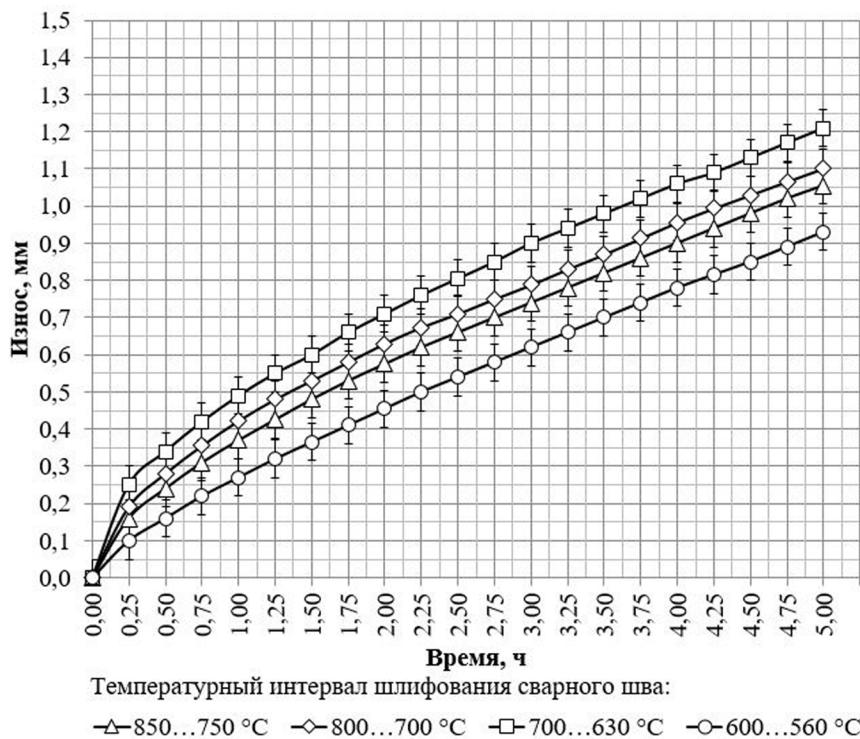


Рис. 4. Изменение глубины внедрения индентора при испытаниях на износостойкость сварных швов, шлифованных в разных температурных интервалах:

— Δ —850...750 °C — \diamond —800...700 °C — \square —700...630 °C — \circ —600...560 °C

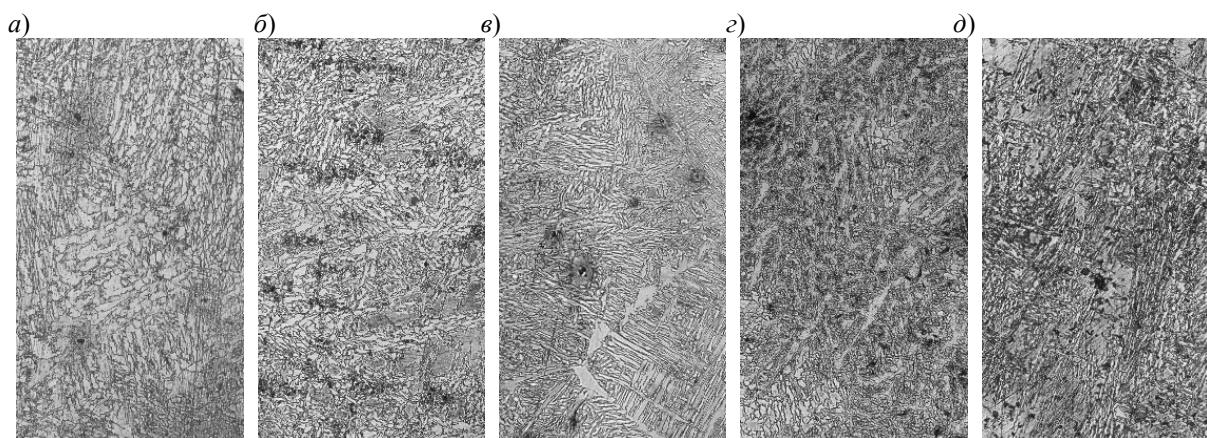


Рис. 5. Микроструктура сварных швов термитных рельсовых соединений:

а – без механической обработки; б – после шлифования в температурном интервале 850...750 °C; в – то же в интервале 800...700 °C; г – то же в интервале 700...630 °C; д – то же в интервале 600...560 °C

процессе шлифования металл деформировался при температурах, лежащих выше линии завершения структурных превращений (Ar_1). В таких условиях одновременно протекают процессы упрочнения (за счет повышения плотности дислокаций) и разупрочнения (в результате динамической рекристаллизации). В зависимости от того, какой из этих процессов преобладает, формируется различная микроструктура, обеспечивающая разные механические свойства металла [9, 10]. При шлифовании в температурном интервале 850...750 °C произошло деформирование аустенита, что привело к формированию дисперсной сорбтообразной структуры и повышению твердости сварных швов. Обработка сварных швов при более низких температурах, в интервале 800...700 °C, сопровождалась деформированием аустенита в процессе его распада, результатом чего стало образование неоднородной феррито-перлитной микроструктуры с пониженной твердостью. Шлифование в температурном интервале 700...630 °C приводило к формированию струк-

туры с участками глобулярного перлита и значительному снижению твердости. Сварные швы, шлифованные в интервале 600...560 °C, имели феррито-перлитную микроструктуру с вытянутыми в результате деформирования зернами. Твердость сварных швов в данном случае наиболее высока, так как при такой температуре отсутствует процесс динамической рекристаллизации и происходит упрочнение металла за счет повышения плотности дислокаций. Таким образом, наиболее однородную микроструктуру, обеспечивающую повышение твердости, возможно получить за счет шлифования термитных сварных швов рельсовых соединений в температурном интервале 600...560 °C.

Измерения шероховатости поверхности катания сварных швов, шлифованных в разных температурных интервалах, показали, что чем выше температура обрабатываемого металла, тем выше значения шероховатости. В температурном интервале 600...560 °C значения шероховатости составляли 0,7...0,9 мкм, а в интервале 850...750 °C – порядка 2,3...2,5 мкм (рис. 6).

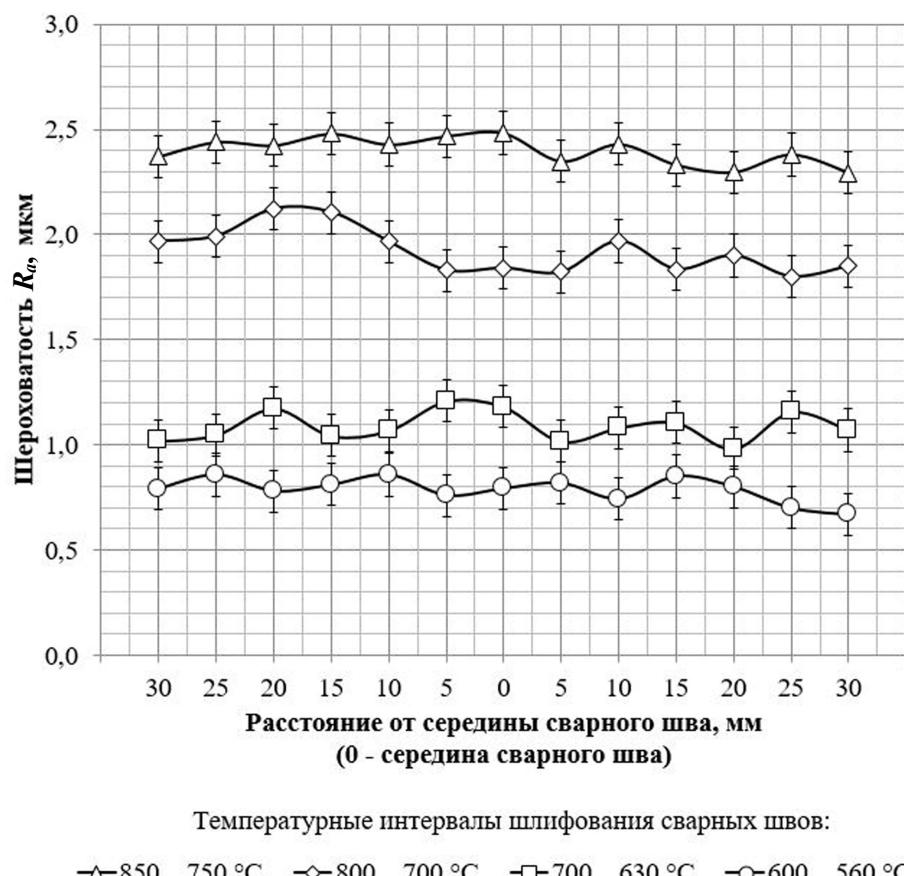


Рис. 6. Шероховатость поверхности катания сварных швов после шлифования в разных температурных интервалах

Согласно результатам экспериментальных исследований шлифование сварных швов термитных рельсовых соединений в интервале температур 600...560 °C обеспечивает наилучшие показатели твердости и износостойкости поверхности катания в зоне сварного шва. Так как твердость металла сварного шва рельсовых соединений ниже, чем твердость рельсов, в процессе эксплуатации в зоне сварного шва может происходить смятие металла и наблюдаться повышенный износ. Поэтому повышение твердости и износостойкости сварных швов рельсовых соединений является актуальной задачей.

Окончательное шлифование в холодном состоянии сопровождается повторным нагревом поверхности катания и снятием верхнего слоя металла в зоне сварного шва. При этом положительный эффект от шлифования в температур-

ном интервале 600...560 °C устраняется и твердость снижается на 2...4 HRC до значений 32...33 HRC.

На основе полученных результатов было предложено объединить операции предварительного и окончательного шлифования (рис. 7), т. е. выполнять одну операцию шлифования в температурном интервале 600...560 °C, формируя при этом окончательный профиль рельса. Ранее было установлено, что фактически предварительное шлифование производят при разных температурах в диапазоне 850...600 °C. Чтобы обеспечить шлифование в интервале 600...560 °C, необходимо ввести обязательный контроль температуры поверхности сварного шва перед началом шлифования с помощью пирометра. Если температура поверхности выше 600 °C, следует дождаться, когда она

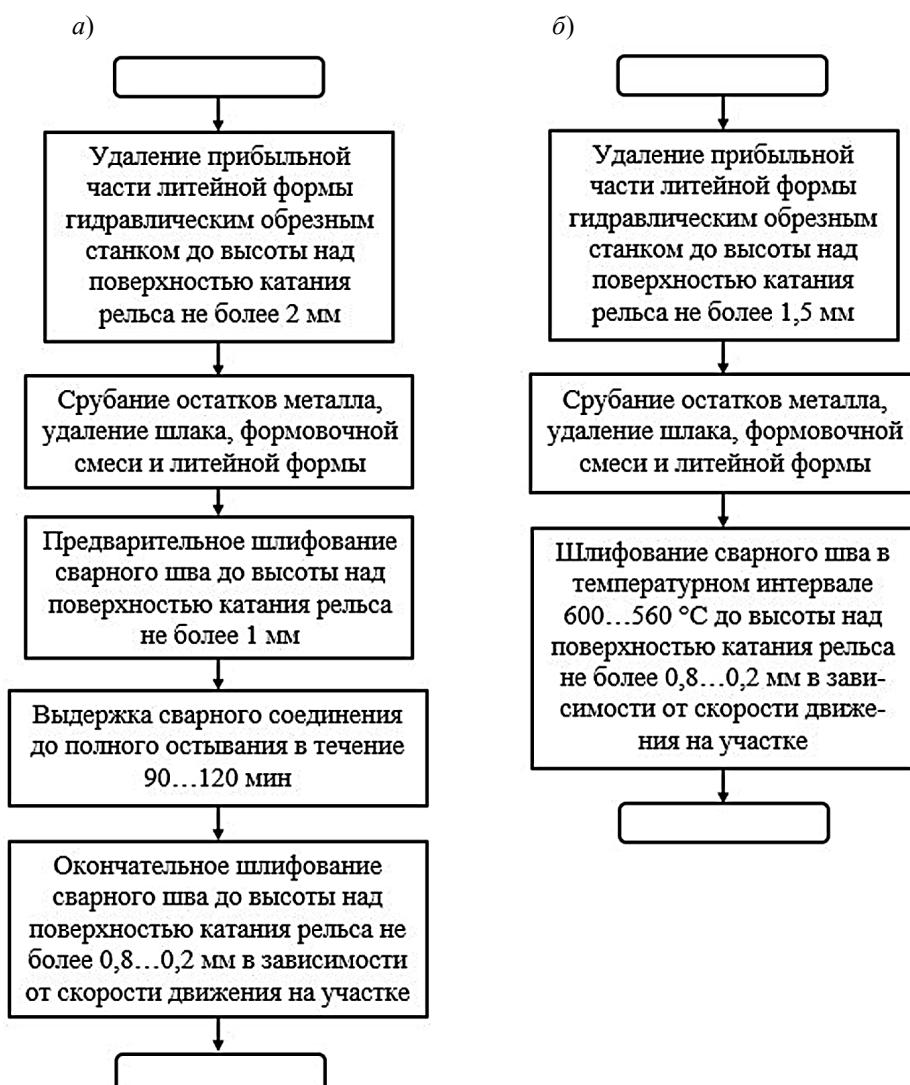


Рис. 7. Схема существующего (a) и предлагаемого (б) технологического процесса механической обработки сварных швов термитных рельсовых соединений

снизится до необходимой, и начать шлифование сварного шва. Экспериментально определено, что время снижения температуры поверхности сварного шва с 850 до 600 °C составляет порядка 5...7 мин. Продолжительность существующего технологического процесса соединения рельсов термитным способом составляет 159...189 мин. Из них 90...120 занимает ожидание остывания сварного шва между операциями предварительного и окончательного шлифования. В предлагаемом технологическом процессе одна операция шлифования и ожидание остывания сварного шва перед ее выполнением составляет не более 5...7 мин. В результате общая продолжительность работ по соединению рельсов термитным способом уменьшается с 159...189 до 74...76 мин.

Предлагаемая технология прошла апробацию. Испытания были проведены по методике, изложенной в технических условиях на сварку рельсов термитным способом. Для сварных соединений рельсов, полученных по предлагаемой технологии, были определены показатели твердости, прочности, пластичности и геометрические параметры головки рельса в области сварного соединения.

Согласно результатам измерения твердости поверхности катания рельсовых соединений,

шлифованных по предлагаемой технологии, твердость сварных швов составляла порядка 35...36 HRC (рис. 8). В зоне термического влияния, около границ сплавления, присутствовали участки с повышенной до 37...38 HRC твердостью. На расстоянии 10...15 мм от границ сплавления твердость снижалась и составляла порядка 34...36 HRC. Таким образом, твердость сварных швов, шлифованных по предлагаемой технологии, близка к твердости соединяемых рельсов.

Показатели прочности и пластичности определяли на специализированном гидравлическом прессе МПС-300, предназначенном для проведения испытаний на статический поперечный трехточечный изгиб полнопрофильных сварных соединений рельсов. Образцы устанавливали на две опоры, расположенные на расстоянии 1 м друг от друга. Нагрузку прикладывали к головке рельса в зоне сварного шва через ролик диаметром 50 мм до момента разрушения рельсового соединения. Показателем прочности при проведении таких испытаний принято считать значение максимальной разрушающей нагрузки в кН, а показателем пластичности – наибольшее значение стрелы прогиба в мм. По результатам оценки показателей прочности и пластичности термитных рельсовых стыков, полученных по предлагаемой технологии, значения разрушаю-



Рис. 8. Твердость поверхности катания в области сварных соединений, полученных по предлагаемой технологии

щей нагрузки составили в среднем 1 554,25 кН, что выше минимального допустимого значения 1 340 кН. Величина стрелы прогиба сварного шва относительно опор пресса перед разрушением рельсовых соединений составляла в среднем 17,5 мм, что также выше минимального допустимого значения 16 мм [5].

Оценка прямолинейности рельсовых соединений, выполненных по предлагаемой технологии, показала, что все сварные соединения соответствуют требованиям технических условий [5]. В зоне сварных швов отсутствовали дефекты шлифования и впадины. Величина воз-

ышения сварного шва над поверхностью катания головки рельса не превышала 0,2 мм.

Предлагаемый технологический процесс шлифования сварных швов основан на данных экспериментальных исследований, прошел апробацию, обеспечивает сокращение времени получения термитных рельсовых соединений на 52...60 % и повышение твердости поверхности катания в зоне сварного шва на 6...12 %. Получаемые рельсовые соединения соответствуют требованиям технических условий на сварку рельсов термитным способом.

Список источников

1. Генкин И. З. Сварные рельсы и стрелочные переводы // Путь и путевое хозяйство. 2000. № 12. С. 14–20.
2. Пасько С. В., Тихомирова Л. Б., Болотова О. В. Алюминотермитная сварка рельсов методом промежуточного литья по технологии фирмы «СНАГА» : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. 100 с.
3. Орлов С. Е. Алюминотермитная сварка рельсов на отечественных железных дорогах // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 10. С. 26–28.
4. ТИ 0921-002-59033294–2017. Технологическая инструкция по термитной сварке рельсов методом промежуточного литья с технологическим зазором соединяемых рельсов шириной от 24 до 26 мм по технологии ЗАО «СНАГА». М. : СНАГА, 2017. 40 с.
5. ТУ 0921-337-01124323–2016. Рельсы железнодорожные, сваренные термитным способом. Технические условия. М. : ВНИИЖТ, 2016. 39 с.
6. Бойко Н. И., Фисенко К. С. Исследование качества поверхности наплавленного металла цилиндрической детали обработанной в горячем состоянии // Инженерный вестник Дона. 2012. № 2. С. 51–55.
7. Шальнов В. А. Шлифование и полирование лопаток газотурбинных двигателей. М. : Оборонгиз, 1958. 350 с.
8. ГОСТ 30480–97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования. М. : Изд-во стандартов, 1998. 12 с.
9. Исследование структуры и механических свойств алюминотермитных сварных соединений рельсов / Л. Б. Тихомирова, А. С. Ильиных, М. С. Галай, Э. С. Сидоров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия : Металлургия. 2016. Т. 16, № 3. С. 90–95.
10. Тушинский Л. И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-е, 1990. 306 с.

References

1. Genkin I. Z. Welded rails and turnouts. *Way and track management*. 2000;(12):14–20. (In Russ.).
2. Pasko S. V., Tikhomirova L. B., Bolotova O. V. Aluminothermic welding of rails by the method of intermediate casting according to the technology of the company “SNAGA”: textbook. allowance. Novosibirsk: Publishing House of SGUPS; 2010. 100 p. (In Russ.).
3. Orlov S. E. Aluminothermic welding of rails on domestic railways. *Way and track management*. 2016;(10):26–28. (In Russ.).
4. TI 0921-002-59033294–2017. Technological instructions for thermite welding of rails by the method of intermediate casting with a technological gap of the connected rails with a width of 24 to 26 mm according to the technology of ZAO SNAGA. M.: SNAGA; 2017. 40 p.
5. TU 0921-337-01124323-2016. Railway rails welded by thermite method. Specifications. M.: VNIIZhT; 2016. 39 p. (In Russ.).
6. Boyko N. I., Fisenko K. S. Investigation of the quality of the surface of the deposited metal of a hot-treated cylindrical part. *Don Engineering Gazette*. 2012;(2):51–55. (In Russ.).
7. Shalnov V. A. Grinding and polishing of blades of gas turbine engines. M.: Oborongiz; 1958. 350 p. (In Russ.).

8. GOST 30480–97. Ensuring product durability. Test methods for wear resistance. General requirements. M.: Publishing house of standards; 1998. 12 p. (In Russ.).
9. Tikhomirova L. B., Ilinykh A. S., Galay M. S., Sidorov E. S. Study of the structure and mechanical properties of aluminothermic welded joints of rails. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy.* 2016;16(3):90–95. (In Russ.).
10. Tushinsky L. I. Theory and technology of metal alloy hardening. Novosibirsk: Nauka, Sib. department; 1990. 306 p. (In Russ.).

Информация об авторе

Э. С. Сидоров – преподаватель кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

E. S. Sidorov – Lecturer of the Department Technology of transport engineering and machine operation, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 26.01.2022; одобрена после рецензирования 27.01.2022; принятa к публикации 27.01.2022.

The article was submitted 26.01.2022; approved after reviewing 27.01.2022; accepted for publication 27.01.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 86–94.
The Siberian Transport University Bulletin. 2022. No. 1 (60). P. 86–94.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.159.2

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_86

Риски использования пылеватых песков в качестве искусственных оснований

Елена Петровна Брагарь^{1✉}, Дмитрий Владимирович Рачков²,
Яков Александрович Пронозин³

^{1, 2, 3} Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

¹ bragarep@tyuiu.ru[✉]

² rachkovdv@tyuiu.ru

³ pronozinja@tyuiu.ru

Аннотация. Разработка котлованов, траншей под фундаменты гражданских зданий и промышленных сооружений в сложных водонасыщенных глинистых грунтах зачастую приводит к расструктуриванию грунта и значительному снижению его прочностных и деформационных характеристик. В качестве способа строительства на таких грунтах в некоторых случаях прибегают к устройству искусственных песчаных оснований. Однако нарушение технологии производства работ и использование непригодного для этой цели материала может являться причиной сверхнормативных осадок возводимых сооружений. Выполненный авторами анализ отечественной нормативной литературы показал, что строительные нормы допускают устройство искусственных насыпей из материалов различной фракции – от глинистой до щебеночной.

В статье рассматривается реальный пример аварийной ситуации на объекте промышленного строительства в городе Тобольске, а именно на подкрановых путях козловых кранов длиной более 300 м. Зафиксированные сверхнормативные неравномерные деформации основания достигали 240 мм. Для создания искусственного основания был выбран местный пылеватый песок, специфические свойства которого не были учтены в процессе проектирования. В рамках комплексного анализа данной ситуации выполнено лабораторное моделирование поведения пылеватого песка.

Целью настоящего исследования являлось определение зависимости коэффициента уплотнения пылеватого песка от траектории нагружения и процесса водонасыщения, а также выявление доли деформации просадочности от конечной деформации.

Установлено, что просадка искусственного основания, выполненного из пылеватого песка, составляет около 12 % от фактической деформации основания. При этом деформациянского основания от полной эксплуатационной нагрузки с учетом процесса водонасыщения составляет приблизительно 30 %. Получена зависимость конечного коэффициента уплотнения от начального, которая может быть применена для определения требуемого коэффициента уплотнения пылеватых песков при их использовании на объектах строительства. Приведена альтернативная методика устройства искусственных песчаных оснований для получения максимального коэффициента уплотнения грунта, широко используемого в пределах региона.

Ключевые слова: искусственное основание, пылеватый песок, просадочность грунта, лабораторное моделирование, коэффициент уплотнения

Для цитирования: Брагарь Е. П., Рачков Д. В., Пронозин Я. А. Риски использования пылеватых песков в качестве искусственных оснований // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 86–94. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_86.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Risks of using artificial sand base in difficult geotechnical conditions

Elena P. Bragar^{1✉}, Dmitry V. Rachkov², Yakov A. Pronozin³

^{1, 2, 3} Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

¹ bragarep@tyuiu.ru[✉]

² rachkovdv@tyuiu.ru

³ pronozinja@tyuiu.ru

Abstract. Excavation of pits, trenches for foundations of civil buildings and industrial structures in saturated clayey soils often leads to soil structural change and great decrease in the soil strength and deformation characteristics. In some cases, an artificial sand base is used as a method for construction on saturated clayey soils. However, technology violations and unsuitable material used during construction can be the reason for excess settlement of the erected facilities. The analysis of domestic regulatory literature performed by the authors showed that building codes allow the construction of artificial embankments from materials of various fractions - from clayey to crushed stone.

The study includes a real example of an emergency situation at gantry crane railways with three hundred meters in length in the town of Tobolsk. The observed excess non-uniform base deformations were up to 240 mm. The artificial base was made using local sand with specific properties such as subsidence and frost heaving, which were not taken into account in the design process. The base properties of the silty sand were analyzed in a laboratory study.

The purpose of this study was to determine the dependence of the compaction coefficient of silty sand on the loading trajectory and the process of water saturation, as well as to identify the proportion of the subsidence deformation from the final deformation.

It has been established that the subsidence of an artificial base made of silty sand is about 12% of the actual deformation of the base. In this case, the deformation of the artificial base from the full operational load, taking into account the process of water saturation, is approximately 30%. The dependence of the final compaction coefficient on the initial one is obtained, which can be used to determine the required compaction coefficient of silty sands when they are used at construction sites. An alternative technique for arranging artificial sand bases to obtain the maximum soil compaction coefficient, which is widely used within the region, is presented.

Keywords: artificial base, silty sand, soil subsidence, laboratory modeling, compaction factor

For citation: Bragar E. P., Rachkov D. V., Pronozin Ya. A. Risks of using artificial sand base in difficult geotechnical conditions. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):86–94. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_86.

Введение

Развитие города Тобольска в последние годы сопровождается ростом объемов строительства промышленного комплекса. Разработка котлованов, траншей под фундаменты гражданских зданий и промышленных сооружений в сложных водонасыщенных глинистых грунтах зачастую приводит к расструктуриванию грунта и большому снижению прочностных и деформационных его характеристик [1]. Ситуацию осложняют неблагоприятные грунтовые условия – заболоченность территории, возможность подтопления, достаточно суровые климатические условия.

Проектные решения по ведению строительства на таких территориях для сохранения природной структуры грунта нередко включают устройство искусственных песчаных оснований, причем иногда мощность устройства подушек может достигать 2 м и более. Высокая стоимость привозных материалов для создания искусственных насыпей заставляет строителей использовать местные материалы. Это само по себе является рациональным, однако неучет специфических свойств данных материалов, например пылеватых песков, повышает риск возникновения неблагоприятных процессов (просадочности, пучинистости), что нередко ведет к затруднению эксплуатации объектов и даже может стать причиной аварийной ситуации.

Одна из таких ситуаций возникла при эксплуатации подкрановых путей козловых кранов большой грузоподъемности, длиной более 300 м. В первый год после строительства, практически без нагрузки, на всем их протяжении выявились осадки величиной от 50 до 240 мм, что привело к недопустимым значениям неравномерности высотных отметок подкрановых путей. В качестве искусственного основания подкрановых путей был использован местный песок, добываемый из карьера, расположенного вблизи площадки строительства. В соответствии с лабораторными исследованиями данный песок классифицируется как пылеватый средней плотности, с содержанием органических включений, неоднородный.

Исследованиями свойств грунтов, используемых в качестве искусственных оснований, занимались как отечественные ученые: М. Ю. Абелев, В. И. Крутов, Р. А. Мангушев, Р. А. Усманов, В. В. Конюшков, С. В. Ланько, Н. Я Денисов., И. П. Иванов [2–7], так и зарубежные: D. L. Galloway, Z. Ouyang и др. [8, 9]. В работах данных авторов установлены основные требования, предъявляемые к грунтам искусственных оснований.

Произведенный анализ отечественной нормативной документации показал, что устройство искусственных насыпей возможно из материалов от глинистой до щебеночной фракции:

1) СП 116.13330.2012 [10]: для приспособления конструкций фундаментов и надземной части зданий к неравномерным деформациям возможно устройство под сооружением сплошных подсыпок из непучинистых грунтов (крупного песка, гравия, щебня);

2) СП 104.13330.2016 [11]: инженерная защита территории от подтопления предусматривает песчано-гравийную засыпку. В качестве материала засыпки следует применять песок с частицами крупностью 0,5–2 мм или песчано-гравийную (щебеночную) смесь с крупностью частиц 0,5–5 мм (СП 103.13330 [12]), т. е. пески средней крупности, крупные и гравелистые по ГОСТ 25100–2020 [13];

3) СП 78.13330.2012 [14]: отсыпка насыпей производится из глинистых грунтов или песков пылеватых при оптимальной влажности грунта до требуемого коэффициента уплотнения.

Важнейшим показателем при устройстве песчаных искусственных оснований является коэффициент уплотнения, который для подобных искусственных сооружений должен быть не менее 0,95.

В условиях Тюменской области пылеватые пески используют часто в качестве искусственных оснований сооружений ввиду близкого расположения их месторождений к строительным

площадкам. В настоящей работе были оценены риски применения таких песков на примере реального объекта, где, как уже говорилось, были зафиксированы сверхнормативные неравномерные деформации основания.

Комплексный анализ данной ситуации включал проведение исследований по лабораторному моделированию поведения пылеватого песка, а его результаты могут быть использованы для определения требуемого коэффициента уплотнения пылеватых песков при их применении на объектах строительства.

Цель исследования – определить зависимость коэффициента уплотнения пылеватого песка, используемого для искусственных оснований, от траектории нагружения и процесса водонасыщения, а также выявить долю деформации просадочности от конечной деформации на примере реального объекта строительства в г. Тобольске.

Материалы и методы исследования

Грунт для исследования был отобран из шурпов, расположенных непосредственно под конструкцией подкрановых путей. Напластование грунтовнского и естественного основания представлено на рис. 1. Коэффициент уплотнения песканского основания согласно проектной документации был равен 0,98,

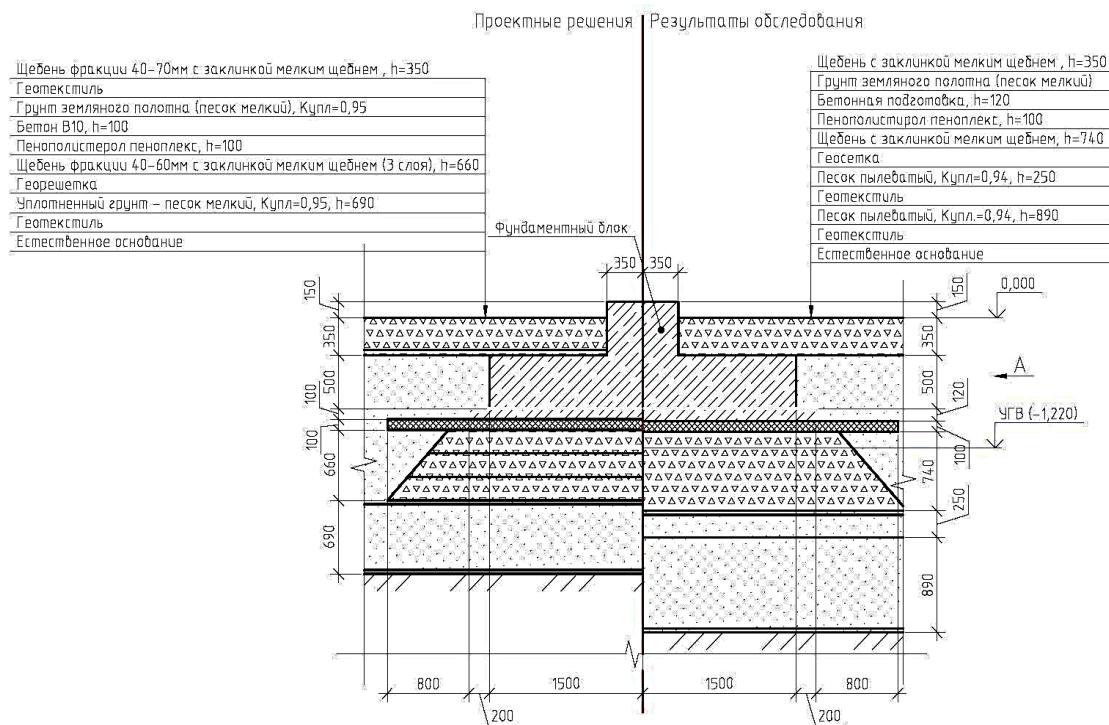


Рис. 1. Схема шурфа

согласно исполнительной документации – 0,95. Стоит отметить, что реализованное решение устройства искусственного основания не соответствует проектному, в частности, зафиксировано увеличение толщины песчаной подушки в среднем почти на 45 см в связи с необходимостью выемки слоя торфа, подошва которого располагалась на различных глубинах. Естественное основание представлено мягкотекущими и текучепластичными глинами. При этом расчетная конечная осадка естественного основания от суммарных нагрузок, включая крановую, не превышает 50 мм, на начальной стадии эксплуатации – 25–30 мм.

Лабораторное определение относительной просадочности ε_{sl} при замачивании грунта водой проводилось, согласно ГОСТ 23161–2012 [15], в приборах компрессионного сжатия. Относительная просадочность определялась на образцах, начальная влажность которых:

- является нулевой ($\approx 0\text{--}2\%$);
- равна природной влажности грунта (10–12 %) при выполнении работ по устройству искусственного основания (данные приняты согласно исполнительной документации).

В рамках проведенных лабораторных экспериментов были рассмотрены две схемы испытания (рис. 2), моделирующие возможные сценарии воздействия на искусственное основание.

Схема А: ступенчатое нагружение образцов до давления, равного 50 кПа (осредненное бытовое давление σ_{zg}), насыщение образца

водой и последующее ступенчатое нагружение до давления, равного 150 кПа (суммарное от бытового нагружения и дополнительного от конструкции крана: $\sigma_{zg} + \sigma_{zp}$).

Схема Б: ступенчатое нагружение образцов до давления, равного 150 кПа (суммарное от бытового нагружения и дополнительного от конструкции крана: $\sigma_{zg} + \sigma_{zp}$), и проведение процесса полного водонасыщения образца.

По результатам испытаний определялись конечные значения (после испытания) плотности грунта ρ , влажности грунта W , плотности скелета грунта ρ_d и коэффициента уплотнения K_{upl} . Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Результаты исследования

Результаты определения относительной просадочности представлены в табл. 2. За контролируемый параметр принят коэффициент уплотнения, так как его значение являлось основным критерием качества выполнения работ по устройству искусственного основания при их приемке.

На рис. 3 представлены результаты определения характеристик просадочности грунта, рассмотрены варианты испытания грунта по схемам А и Б.

На рис. 4 приведены результаты лабораторных исследований по определению конечной относительной деформации грунта для каждой из рассматриваемых схем испытаний грунта.

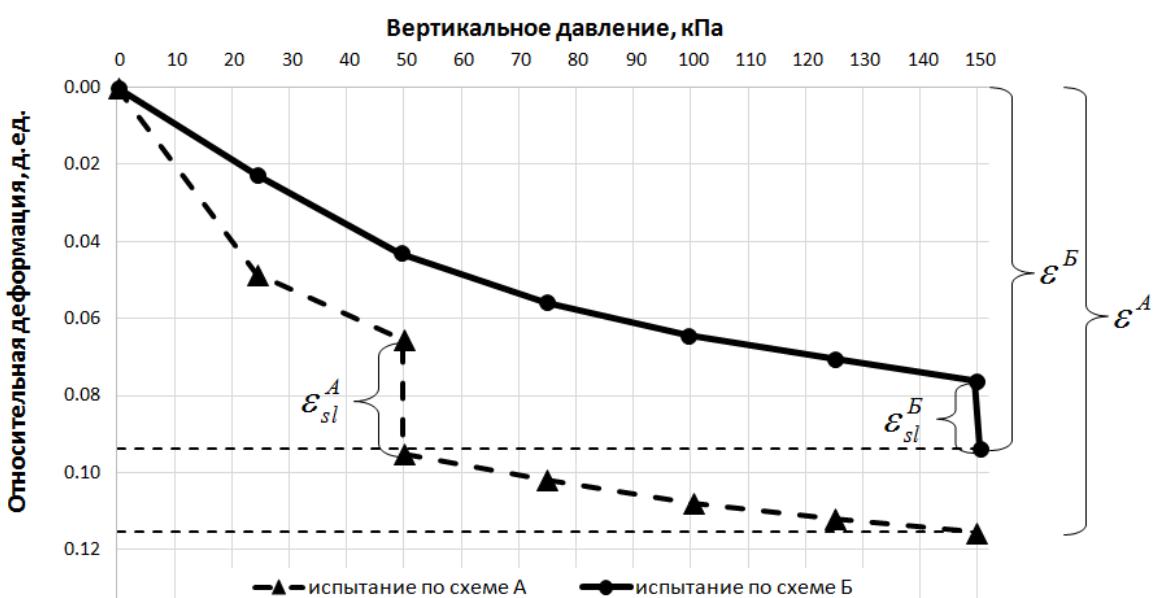


Рис. 2. Случаи моделирования поведения песка искусственного основания

Таблица 1

Результаты определения характеристик грунта

Характеристика грунта	Испытание													
	№ 1		№ 2		№ 3		№ 4		№ 5		№ 6		№ 7	
	НЗ	КЗ	НЗ	КЗ	НЗ	КЗ	НЗ	КЗ	НЗ	КЗ	НЗ	КЗ	НЗ	КЗ
Плотность грунта ρ , г/см ³	1,16	1,86/ 1,66	1,32	1,82/ 1,79	1,49	2,10/ 2,12	1,28	1,07/ 1,09	1,48	1,75/ 1,84	1,65	1,94/ 1,97	1,79	2,27/ 2,18
Влажность грунта W , %	0,00	30,83/ 26,05	0,00	24,17/ 24,60	0,00	24,42/ 26,08	10,58	26,76/ 27,20	11,97	25,55/ 26,27	10,81	25,96/ 24,63	10,6	26,76/ 25,70
Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³	1,16	1,42/ 1,31	1,32	1,46/ 1,43	1,49	1,69/ 1,68	1,16	1,40/ 1,42	1,32	1,40/ 1,46	1,49	1,54/ 1,58	1,62	1,79/ 1,73
Коэффициент уплотнения $K_{упл}$, д. е.	0,70	0,86/ 0,79	0,80	0,88/ 0,86	0,90	1,02/ 1,01	0,70	0,84/ 0,86	0,80	0,84/ 0,88	0,90	0,93/ 0,95	0,98	1,08/ 1,04

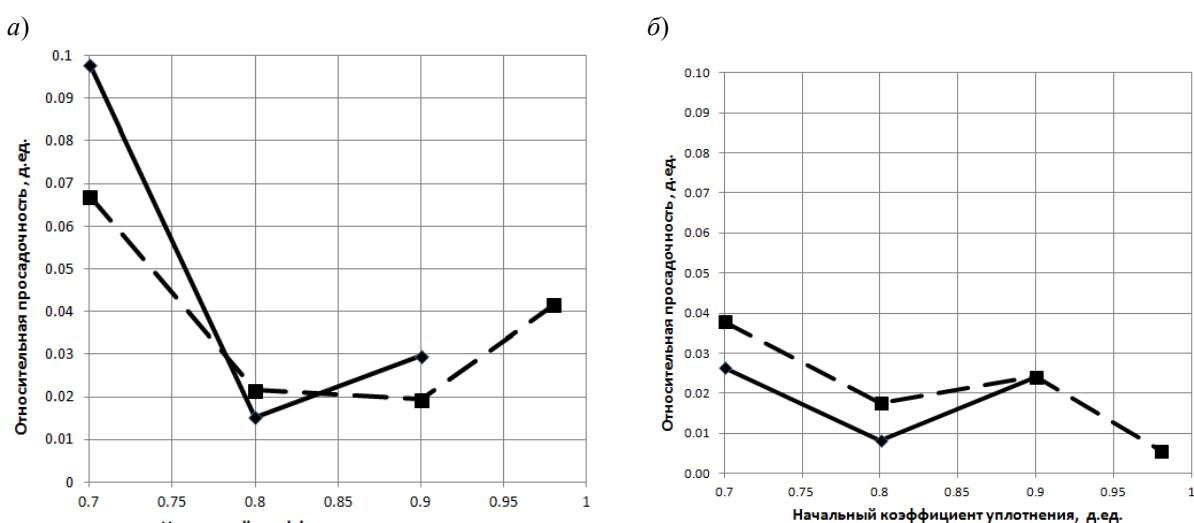
Примечания. 1. В таблице НЗ – начальное значение; КЗ – конечное значение.

2. В числителе приведены конечные значения, полученные по схеме А, в знаменателе – по схеме Б.

Таблица 2

Результаты определения характеристик просадочности грунта

Испытание	Схема А			Схема Б		
	Относ. просадочность грунта ε_{sl} , д. ед.	Относ. деформация грунта ε , д. ед.	Просадка / общая деформация слоя толщиной $t = 1\ 140$ мм, мм	Относ. просадочность грунта ε_{sl} , д. ед.	Относ. деформация грунта ε , д. ед.	Просадка / общая деформация слоя толщиной $t = 1\ 140$ мм, мм
1	0,098	0,187	111,7 / 213,2	0,026	0,120	29,6 / 136,8
2	0,015	0,102	17,1 / 116,3	0,008	0,079	9,1 / 90,1
3	0,030	0,115	34,2 / 131,1	0,024	0,090	27,4 / 102,6
4	0,067	0,177	76,4 / 201,8	0,038	0,188	43,3 / 214,3
5	0,022	0,056	25,1 / 63,8	0,018	0,094	20,5 / 107,2
6	0,019	0,037	21,7 / 42,2	0,024	0,063	27,4 / 71,8
7	0,036	0,103	41,0 / 117,4	0,006	0,037	6,8 / 42,2



Начальное значение влажности: $w=0\%$ — \blacktriangle ; $w=11\%$ — \blacksquare

Рис. 3. Результаты определения характеристик просадочности грунта:
а – испытание по схеме А; б – испытание по схеме Б

По результатам натурного обследования шурфов установлено, что значение коэффициента уплотнения после приложения нагрузки на грунтовый массив лежит в диапазоне от 0,93 до 0,96. Это соответствует значениям

начального коэффициента уплотнения в диапазоне от 0,87 до 0,92 (рис. 5). Следует отметить, что начальный и конечный коэффициенты уплотнения грунта искусственного основания в реальных условиях соответствуют

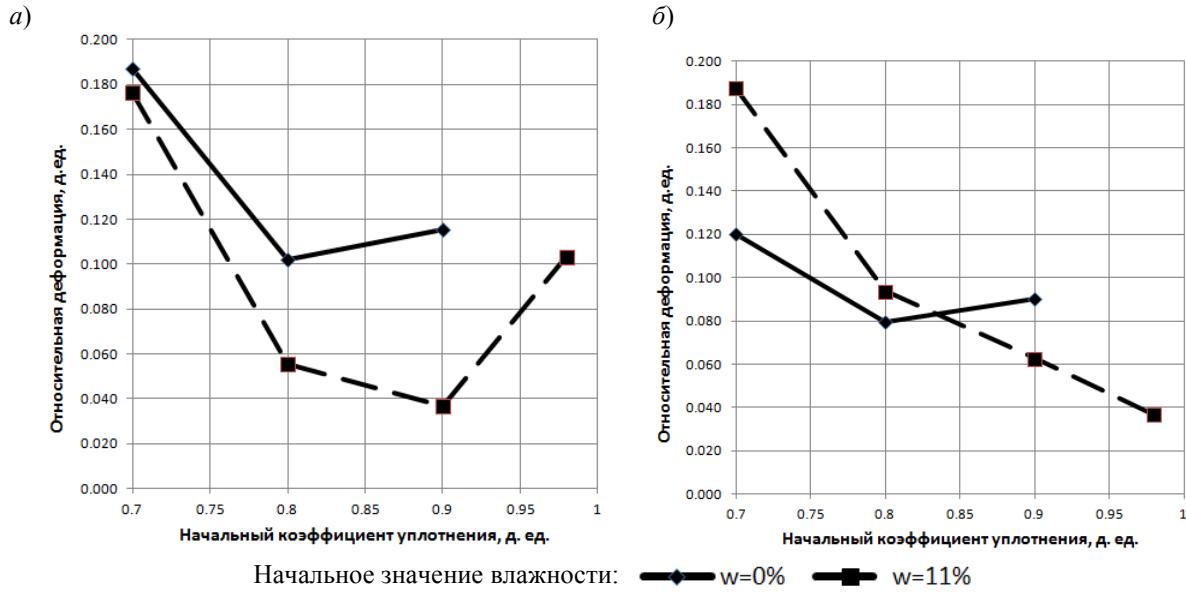


Рис. 4. Результаты определения конечной относительной деформации грунта:
а – испытание по схеме А; б – испытание по схеме Б

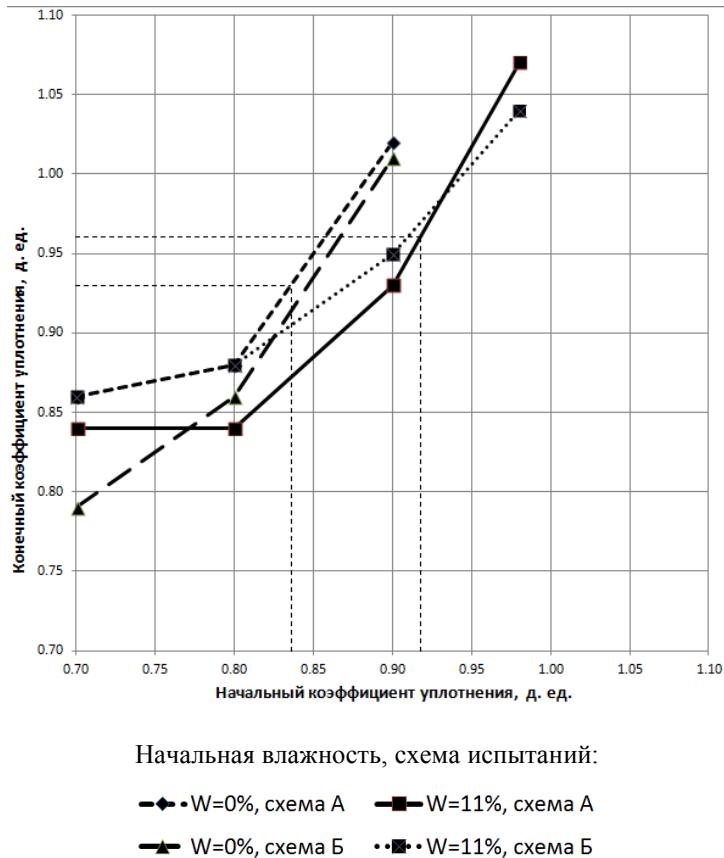


Рис. 5. Зависимость конечного коэффициента уплотнения от начального при различных значениях влажности и схемах испытаний

значениям характеристик грунта в лабораторном испытании № 6 по схеме Б (при значениях начальной влажности 10–12 %, водонасыщении грунтового массива после приложения полной нагрузки).

Лабораторное моделирование поведения пылеватого песка при водонасыщении и нагружении по различным потенциально возможным схемам показало, что коэффициент уплотнения не мог быть равен 0,98 при приемке строительных работ. Если начальный коэффициент уплотнения был равен 0,98 (расчетный коэффициент уплотнения), прогнозируемый коэффициент уплотнения во время проведения обследования (после насыщения и приложения полной нагрузки) должен быть равен 0,97–1,0 (см. рис. 5).

В табл. 2 показано, что просадка искусственного песчаного основания при водонасыщении с расчетной толщиной 690 мм составляет около 17 мм. Суммарная деформация искусственного песчаного основания проектной толщиной 690 мм от среднего бытового давления, процесса водонасыщения и крановой нагрузки должна составлять почти 45 мм.

Кроме того, просадка искусственного основания во время водонасыщения при фактической толщине 1 140 мм составляет около 27 мм; суммарная деформация от среднего бытового давления, процесса водонасыщения и крановой нагрузки – почти 72 мм.

Описанные выше испытания позволили получить график зависимости конечного коэффициента уплотнения от начального значения (см. рис. 5).

Полученная зависимость (см. рис. 5) может быть применена в строительной практике при использовании в качестве искусственных оснований пылеватых песков с целью определения конечного коэффициента уплотнения грунта при возможном водонасыщении грунтов основания.

Так, относительно рассматриваемой ситуации на объекте строительства полученная закономерность позволяет сделать следующие выводы:

1. При приемке работ коэффициент уплотнения $K_{упл}$ не мог быть равен значению, представленному в актах приемки работ (0,98), так как на момент обследования его значение со-

ставляло 0,93–0,96 (при учете деформирования основания от дополнительной нагрузки и процессов замачивания основания).

2. Значение начального коэффициента уплотнения $K_{упл}$ находилось в пределах 0,87–0,92, что соответствует лабораторному испытанию № 6 по схеме Б.

Согласно действующим нормативным документам работы по устройству искусственных оснований следует производить при влажности, близкой к оптимальной. Однако соблюдать влажностный режим грунта в условиях строительной площадки не всегда представляется возможным. Вследствие вышеизложенного на основании лабораторного моделирования было установлено, что для достижения высокого значения коэффициента уплотнения $K_{упл}$ (около 0,95–0,98) потенциально просадочного грунта нет необходимости доводить его значение до максимально возможного в момент производства работ. Рекомендуется обеспечить значение, близкое к $K_{упл} = 0,8$, а затем произвести водонасыщение. После выполнения финишной планировки, которая необходима из-за неравномерностей при просадке искусственного основания, осуществить дальнейшее строительство и передачу полезной дополнительной нагрузки на основание.

Предложенный вариант является альтернативным для получения максимального коэффициента уплотнения грунта, широко используемого для формирования искусственных оснований в пределах региона.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Была получена зависимость конечного коэффициента уплотнения от начального при различных значениях влажности и схемах испытаний. Данная зависимость может быть применена в строительной практике при использовании в качестве искусственных оснований пылеватых песков с целью определения конечного коэффициента уплотнения грунта при возможном водонасыщении грунтов основания.

2. Относительно рассматриваемой ситуации на объекте строительства подкрановых путей в г. Тобольске было установлено, что при начальном коэффициенте уплотнения, равном 0,98

(проектное значение коэффициента уплотнения), прогнозное значение коэффициента уплотнения на момент обследования (после замачивания и приложения полезной нагрузки) должно находиться в пределах 0,97–1,0. В результате лабораторного моделирования поведения пылеватого песка было выявлено, что при приемке работ коэффициент уплотнения $K_{упл}$ не мог составлять 0,95 (что было указано в исполнительной документации), так как на момент обследования данное значение составило 0,93–0,96, и это, подчеркнем, уже после завершения деформирования основания от дополнительной нагрузки и процессов замачивания основания.

3. Значение начального коэффициента уплотнения, согласно проведенным исследованиям, лежит в пределах 0,87–0,92, что соответствует лабораторному испытанию № 6 по схеме Б. В таком случае значение просадки основания при фактической толщине 1 140 мм составит около 12 % (27 мм) от фактической деформации основания, значение осадки от полной эксплуатационной нагрузки – около 30 % (72 мм).

4. Просадка слоя искусственного основания в виде пылеватого песка при замачивании мощностью 690 мм составляет приблизительно 17 мм, общая деформация от собственного веса насыпи, процессов замачивания и полезной нагрузки – около 45 мм.

5. Осадка основания до 240 мм, кроме указанных выше составляющих, сформировалась по причине выполнения работ в зимнее время, с нарушением технологии, неопределенными боковыми граничными условиями работы искусственного основания, возможными процессами суффозии, а также динамическим воздействием кранового оборудования.

Таким образом, применение местных строительных материалов, диктуемое экономическими мотивами, должно быть конструктивно и технологически обоснованным. Особую роль играет учет климатических и гидро-геологических условий, а также крайне важна культура производства. Несоблюдение данных требований и условий может приводить к затратам на усиление основания, сопоставимым со стоимостью строительства.

Список источников

1. Pronozin Y. A. and Bragar E. P. Changes in soil properties at base unloading of deep foundation pit // Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction. Vol. 2019. P. 290–295.
2. Крутов В. И., Ковалев А. С., Ковалев В. А. Проектирование и устройство оснований и фундаментов на просадочных грунтах. М. : АСВ, 2013. 544 с.
3. Абелев М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. М. : Стройиздат, 1983. 248 с.
4. Абелев Ю. М. Основы проектирования и строительства на просадочных грунтах. М. : Стройиздат, 1979. 271 с.
5. Методы подготовки и устройства искусственных оснований : учеб. пособие / Р. А. Мангушев, Р. А. Усманов, В. В. Конюшков, С. В. Ланько. М. : АСВ, 2012. 286 с.
6. Денисов Н. Я. О природе просадочных явлений в лёссовидных суглинках. М. : Сов. наука, 1946. 176 с.
7. Иванов И. П. О предварительной оценке просадочности лёссовых пород // Зап. ЛГИ. 1958. Т. 34, № 2. С. 214–220.
8. Seepage effects of groundwater and its make-up water on triggering ground subsidence / Z. Ouyang, M. Cai, C. Li and M. Xie // Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material. 2006. Vol. 13 (1). P. 11–15.
9. Galloway D. L. and Burbey T. J. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction // Hydrogeology Journal. 2011. Vol. 19 (8). P. 1459–1486.
10. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения : дата введ. 2013-01-01 : утв. приказом М-ва регион. развития Рос. Федерации 30 июня 2012 г. № 274.
11. СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления : дата введ. 2017-06-17 : утв. приказом М-ва стр-ва и жилищно-коммунал. хоз-ва Рос. Федерации от 16 дек. 2016 г. № 964/пр.
12. СП 103.13330. Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод : дата введ. 2013-01-01 : утв. приказом М-ва регион. развития Рос. Федерации 30 июня 2012 г. № 269.
13. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. М. : Стандартинформ, 2020. 38 с.

14. СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги : дата введ. 2013-07-01 : утв. приказом М-ва регион. развития Рос. Федерации от 30 июня 2012 г. № 272.
15. ГОСТ 23161–2012. Грунты. Метод лабораторного определения характеристик просадочности. М. : Стандартинформ, 2019. 12 с.

References

1. Pronozin Y. A. and Bragar E. P. Changes in soil properties at base unloading of deep foundation pit. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction*. 2019:290–295.
2. Krutov V. I., Kovalev A. S., Kovalev V. A. Design and arrangement of foundations and foundations on subsidence soils. M.: ASV; 2013. 544 p. (In Russ.).
3. Abelev M. Yu. Construction of industrial and civil structures on weak water-saturated soils. M.: Stroyizdat; 1983. 248 p. (In Russ.).
4. Abelev Yu. M. Fundamentals of design and construction on subsidence soils. M.: Stroyizdat; 1979. 271 p. (In Russ.).
5. Methods of preparation and arrangement of artificial foundations: textbook. allowance / R. A. Mangushev, R. A. Usmanov, V. V. Konyushkov, S. V. Lanko. M.: ASV; 2012. 286 p. (In Russ.).
6. Denisov N. Ya. On the nature of subsidence phenomena in loess-like loams. M.: Sov. science; 1946. 176 p. (In Russ.).
7. Ivanov I. P. On a preliminary assessment of the subsidence of loess rocks. *Western Leningrad Mining Institute*. 1958;34(2):214–220. (In Russ.).
8. Ouyang Z., Cai M., Li C. and Xie M. Seepage effects of groundwater and its make-up water on triggering ground subsidence. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*. 2006;13(1):11–15.
9. Galloway D. L. and Burbey T. J. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*. 2011;19(8):1459–1486.
10. SP 116.13330.2012. Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. Basic provisions: date entered. 2013-01-01: approved by order of the Ministry region. development Russian Federation June 30, 2012. No. 274. (In Russ.).
11. SP 104.13330.2016. Engineering protection of the territory from flooding and flooding: date of entry. 2017-06-17: approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services. Farm Russian Federation of 16 Dec. 2016. No. 964/pr. (In Russ.).
12. SP 103.13330. Protection of mine workings from underground and surface waters: date of entry. 2013-01-01: approved by order of the Ministry region. development Russian Federation June 30, 2012. No. 269. (In Russ.).
13. GOST 25100–2020. Soils. Classification. M.: Standartinform; 2020. 38 p. (In Russ.).
14. SP 78.13330.2012. Highways: date of entry. 2013-07-01: approved by order of the Ministry region. development Russian Federation dated June 30, 2012. No. 272. (In Russ.).
15. GOST 23161–2012. Soils. Method for laboratory determination of the characteristics of subsidence. M.: Standartinform; 2019. 12 p. (In Russ.).

Информация об авторах

- Е. П. Брагарь* – аспирант, ассистент кафедры «Строительное производство» Тюменского индустриального университета.
- Д. В. Рачков* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство» Тюменского индустриального университета.
- Я. А. Пронозин* – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительное производство» Тюменского индустриального университета.

Information about the authors

- E. P. Bragar* – post-graduate student, assistant of the Construction Operation Department, Tyumen Industrial University.
- D. V. Rachkov* – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Construction Operation Department, Tyumen Industrial University.
- Ya. A. Pronozin* – Doctor of Engineering, Professor of the Construction Operation Department, Tyumen Industrial University.

Статья поступила в редакцию 01.10.2021; одобрена после рецензирования 20.10.2021; принятая к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 01.10.2021; approved after reviewing 20.10.2021; accepted for publication 17.01.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 625.084

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_95

Повышение эффективности уплотнения асфальтобетонной смеси гладковальцовным катком

Евгений Алексеевич Шишkin^{1✉}, Александр Андреевич Смоляков²

^{1, 2} Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

¹ 004655@pnu.edu.ru✉

² 2012003170@pnu.edu.ru

Аннотация. От качества выполнения операции уплотнения асфальтобетонного покрытия, выполняемой в процессе строительства автомобильной дороги дорожным катком, зависит долговечность сооружения в целом. В ходе уплотнения сопротивление асфальтобетонного слоя деформированию возрастает, что обусловлено непрерывным охлаждением материала, а также увеличением его плотности с каждым проходом катка. В то же время максимальное удельное давление под вальцом дорожного катка ограничено его конструктивными параметрами. Поэтому каждый каток может эффективно выполнять операцию уплотнения в определенном диапазоне физико-механических характеристик слоя.

Задачей исследования является повышение эффективности уплотнения асфальтобетонной смеси гладковальцовным дорожным катком за счет расширения технологических границ применения машины. Для решения указанной задачи рассмотрен процесс взаимодействия гладкого вальца с асфальтобетонным слоем. Для описания поведения асфальтобетонного слоя в процессе нагружения принята модель Кельвина. При рассмотрении равновесия сил, действующих по площади контакта вальца с уплотняемым материалом, с учетом начальных условий получена система нелинейных алгебраических уравнений, позволяющая определить длину дуги контакта вальца с материалом. В результате исследования функции удельного давления под вальцом катка получено уравнение для определения значения максимального удельного давления под вальцом катка. На основе полученных теоретических результатов было проведено динамическое моделирование уплотнения асфальтобетонной смеси вальцом катка.

Анализ результатов моделирования позволил сделать вывод о возможности значительного изменения максимального удельного давления под вальцом за счет регулирования скорости движения катка. С учетом разработанной методики предложена система автоматического управления для осуществления непрерывного контроля эффективности уплотнения. Предлагаемая система позволяет повысить эффективность операции уплотнения асфальтобетонной смеси дорожным катком путем поддержания максимального удельного давления под вальцом катка на уровне предела прочности уплотняемого слоя. Варьирование значения максимального удельного давления под вальцом катка осуществляется в зависимости от физико-механических характеристик уплотняемого слоя асфальтобетонной смеси и обеспечивается за счет оперативного изменения скорости движения машины.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, дорожный каток, уплотнение, эффективность, максимальное удельное давление, скорость движения катка, система автоматического управления

Для цитирования: Шишkin Е. А., Смоляков А. А. Повышение эффективности уплотнения асфальтобетонной смеси гладковальцовным катком // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 95–103. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_95.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Improving the efficiency of the asphalt concrete mixture compaction with a smooth drum roller

Eugene A. Shishkin^{1✉}, Alexander A. Smolyakov²

^{1, 2} Pacific National University, Khabarovsk, Russia

¹ 004655@pnu.edu.ru✉

² 2012003170@pnu.edu.ru

Abstract. The durability of the structure as a whole depends on the operation quality of the asphalt concrete pavement compaction performed during the construction of a highway by a road roller. In the course of compaction, the asphalt concrete layer resistance to deformation increases that is due to the continuous cooling of the material, as well as an increase in its density with each passes of the roller. At the same time, the maximum specific pressure under the drum of a road roller is limited by its design parameters. Therefore, each roller can effectively perform the compaction operation within a certain range of physical and mechanical characteristics of the layer.

The objective of the study is to increase the asphalt concrete mixture compaction efficiency by a smooth-drum road roller by expanding the technological boundaries of the machine's application. To solve this problem, the interaction process of a smooth roller with an asphalt concrete layer is considered. To describe the behaviour of the asphalt concrete layer during loading, the Kelvin model is adopted. Considering the balance of forces acting over the area of contact of the roller with the material to be compacted, taking into account the initial conditions, a system of nonlinear algebraic equations was obtained, which makes it possible to determine the arc length of the roller contact with the material. As a study result of the function of the specific pressure under the roller of the roller to the maximum, an equation was obtained to determine the value of the maximum specific pressure under the roller of the roller. On the basis of the obtained theoretical results, a dynamic simulation of the asphalt concrete mixture compaction with a roller of a roller was carried out.

Analysis of the simulation results made it possible to draw a conclusion about the possibility of a significant change in the maximum specific pressure under the drum by regulating the speed of the roller. Taking into account the developed technique, an automatic control system is proposed for continuous monitoring of the compaction efficiency. The proposed automatic control system makes it possible to increase the efficiency of the asphalt concrete mixture compaction by the road roller by maintaining the value of the maximum specific pressure under the roller of the roller at the level of the ultimate strength of the compacted layer. Varying the value of the maximum specific pressure under the roller drum is carried out depending on the physical and mechanical characteristics of the compacted layer of the asphalt concrete mixture and is ensured by promptly changing the speed of the machine.

Keywords: asphalt mixture, road roller, compaction, efficiency, maximum specific pressure, roller speed, automatic control system

For citation: Shishkin E. A., Smolyakov A. A. Improving the efficiency of the asphalt concrete mixture compaction with a smooth drum roller. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):95–103. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_95.

Введение

В качестве верхнего слоя дорожной одежды, от качества которого зависит долговечность сооружения в целом, используют преимущественно покрытие из асфальтобетона. В связи с этим важную роль играет технологическая операция уплотнения данного покрытия, для которой применяют дорожные катки различных типов.

Согласно [1–3] для эффективного уплотнения дорожного покрытия необходимо, чтобы значение максимального удельного давления под вальцом катка было близко к пределу прочности материала, но не превосходило его:

$$0,9\sigma_b < p_{max} < \sigma_b, \quad (1)$$

где σ_b – предел прочности уплотняемого материала, Н/м²; p_{max} – максимальное удельное давление под вальцом катка, Н/м².

В процессе уплотнения сопротивление асфальтобетонной смеси деформированию непрерывно растет, что обусловлено увеличением ее плотности, а также остыанием. В то же время максимальное удельное давление под вальцом дорожного катка ограничено его конструктивными параметрами [4]. Поэтому каждый каток может эффективно выполнять операцию уплот-

нения в определенном диапазоне физико-механических характеристик смеси [5].

Задачей исследования является повышение эффективности уплотнения асфальтобетонной смеси гладковальцовным дорожным катком за счет расширения технологических границ применения машины.

Метод исследования

Рассмотрим элементарную площадку dx , расположенную в зоне контакта вальца со слоем асфальтобетонной смеси (рис. 1).

На указанную площадку действует сила $pBdx$. Условие равновесия сил, действующих по площади контакта вальца с уплотняемым материалом, имеет вид [6]

$$Q - \int_{x_1}^{x_2} p(x) B dx = 0, \quad (2)$$

где Q – вес катка, приходящийся на валец, Н; $p(x)$ – удельное давление, Н/м²; B – ширина вальца, м.

Осадка слоя h в произвольной точке B (рис. 2) с координатой x равна [7]:

$$h = h_0 - \frac{x^2}{2R}, \quad (3)$$

где h_0 – осадка материала, м; x – координата точки B , м; R – радиус вальца, м.

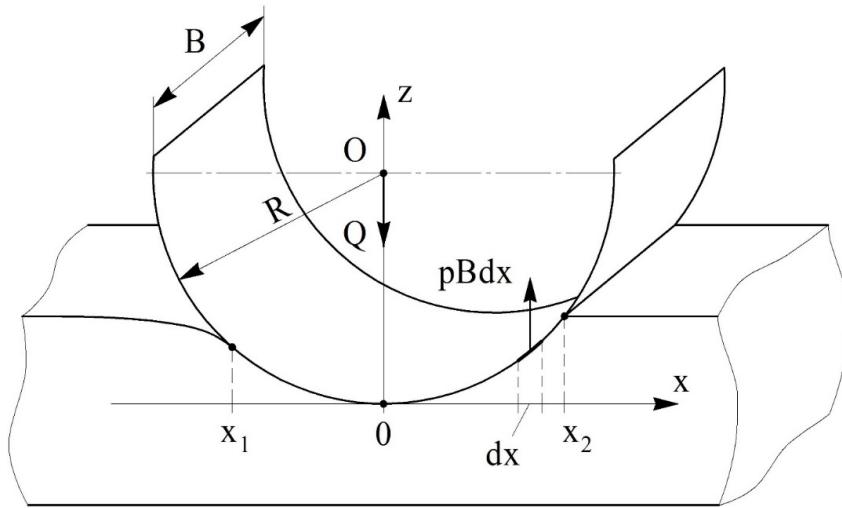


Рис. 1. Схема качения вальца по уплотняемому материалу

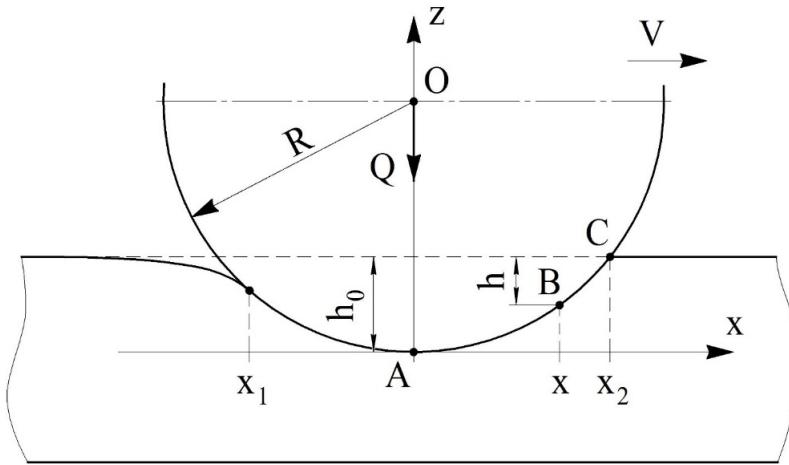


Рис. 2. Схема деформирования материала вальцом катка

Скорость изменения координаты точки B относительно принятой системы координат составит:

$$\frac{dx}{dt} = -V, \quad (4)$$

где V – скорость поступательного движения вальца, м/с.

Дифференцируя уравнение (3), с учетом (4) получим скорость деформирования слоя в точке B :

$$\frac{dh}{dt} = \frac{V}{R} x. \quad (5)$$

Так как в точке C осадка $h(x_2) = 0$, максимальная осадка уплотняемого слоя с учетом (3) равна:

$$h_0 = \frac{x_2^2}{2R}, \quad (6)$$

где x_2 – координата точки C (см. рис. 2), м.

В качестве реологической модели асфальтобетонной смеси примем тело Кельвина [8, 9], за-

кон поведения которого представляет собой следующее дифференциальное уравнение:

$$p(h) = ch + \mu \frac{dh}{dt}, \quad (7)$$

где $p(h)$ – удельное давление, Н/м²; c – модуль жесткости слоя асфальтобетонной смеси, Н/м³; μ – коэффициент внутреннего трения слоя асфальтобетонной смеси, Н·с/м³.

После подстановки выражений (3), (5) в уравнение (7) получим

$$p(x) = c \left(h_0 - \frac{x^2}{2R} \right) + \mu \frac{V}{R} x. \quad (8)$$

Подставив выражение (8) в уравнение (1), после интегрирования получим

$$Q - B \left[c \left(h_0 x_2 - \frac{1}{6R} x_2^3 \right) - c \left(h_0 x_1 - \frac{1}{6R} x_1^3 \right) + \frac{\mu V}{2R} (x_2^2 - x_1^2) \right] = 0. \quad (9)$$

Подставив $p(x_1) = 0$ в уравнение (8), а также с учетом (6) и (9) после преобразований получим следующую систему нелинейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} Q = B \left[\frac{c}{3R} (x_2^3 - x_1^3) + \frac{\mu V}{2R} (x_2^2 + x_1^2) \right], \\ x_2^2 = x_1^2 - \frac{2\mu V}{c} x_1, \end{cases} \quad (10)$$

где $x_1 < 0$, $x_2 > 0$.

Решение системы уравнений (10) позволяет определить длину дуги контакта вальца с уплотняемым материалом. Так как $x_1 \ll R$, $x_2 \ll R$, длину дуги контакта приближенно можно принять равной

$$L \approx |x_1| + x_2. \quad (11)$$

Исследуем функцию удельного давления $p(x)$ на максимум. Для этого продифференцируем уравнение (7):

$$p'(x) = -\frac{c}{R}x + \frac{\mu V}{R}. \quad (12)$$

С учетом того что в точке максимума функции $p'(x)$, получим координату x_{\max} , соответствующую максимальному удельному давлению:

$$x_{\max} = \frac{\mu V}{R}. \quad (13)$$

Важно отметить, что координата x_{\max} всегда положительна, следовательно, максимальное удельное давление находится правее вертикальной оси z (см. рис. 2).

Подставив выражение (13) в (8), получим уравнение для определения значения максимального удельного давления под вальцом катка:

$$p_{\max} = \frac{\mu^2 V^2}{2Rc} + \frac{cx_2^2}{2R}, \quad (14)$$

где $x_2 \approx L/2$.

На основе системы уравнений (10), а также уравнений (6), (11), (14) при помощи средства визуального моделирования Xcos пакета Scilab

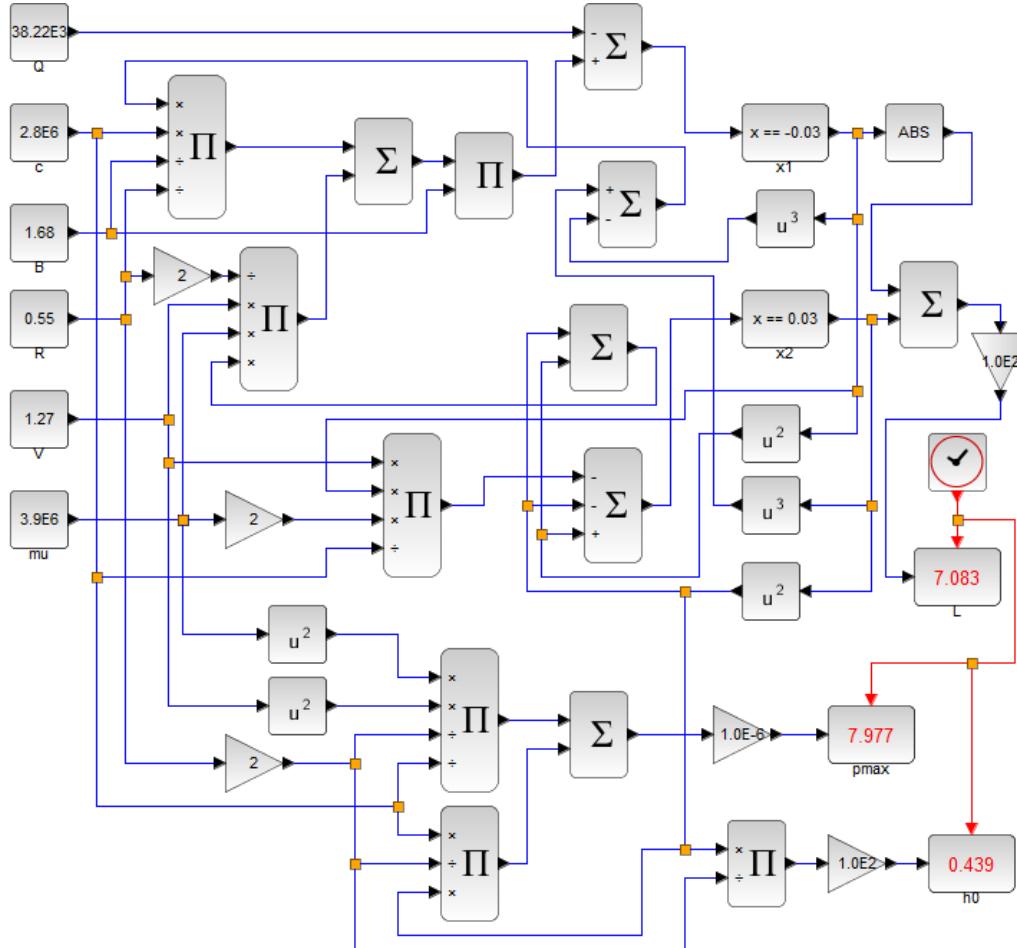


Рис. 3. Динамическая модель уплотнения асфальтобетонной смеси вальцом катка

была составлена динамическая модель, приведенная на рис. 3.

Модель включает в себя:

- блоки «константа»  с помощью которых задаются конструктивные параметры катка, а также физико-механические характеристики уплотняемого слоя;
- блоки математических операций («сумматор» , «умножение» , «усиление» , «возвведение в степень» , «абсолютное значение» , служащие для направления и преобразования сигналов в соответствии с аналитической формой модели;
- блоки «решатель» , используемые для нахождения координат x_1 и x_2 ;
- блоки «дисплей» , служащие для отображения полученных результатов, а именно: значений длины дуги контакта L , максимального удельного давления под вальцом катка p_{\max} , максимальной осадки уплотняемого слоя h_0 ;
- блок «часы активации» , предназначенный для задания моментов времени регистрации результатов моделирования.

Динамическая модель, представленная на рис. 3, была использована для исследования поведения материала, уплотняемого вальцами различных моделей дорожных катков. Моде-

лирование производилось для конкретных параметров уплотняемого материала, т. е. для конкретного прохода катка. В качестве переменной выступала скорость поступательного движения дорожного катка, диапазон изменения которой соответствовал указанному в [10].

Результаты имитационного моделирования

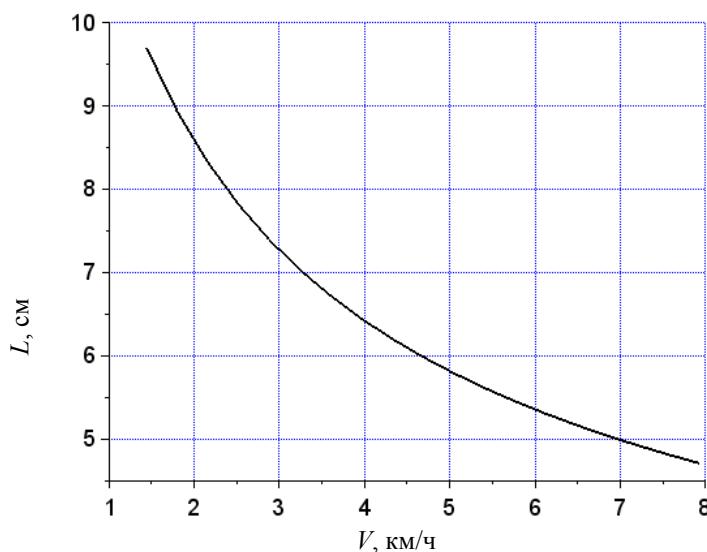
В результате моделирования установлено, что независимо от выбранной модели катка зависимости параметров процесса уплотнения от скорости движения катка аналогичны приведенным на рис. 4–6.

Анализ графика, приведенного на рис. 6, позволяет сделать вывод о возможности значительного изменения максимального удельного давления под вальцом за счет регулирования скорости движения катка V .

Область применения результатов

С учетом разработанной методики задача расширения технологических границ применения дорожного катка может быть решена с помощью системы автоматического управления. Блок-схема предлагаемой системы автоматического управления приведена на рис. 7.

Известны системы автоматического задания траектории движения дорожного катка с учетом степени уплотнения различных участков покрытия [11, 12]. В отличие от известных систем представленная на рис. 7 позволяет управлять процессом уплотнения за счет варьирования рабочей скорости машины.



Rис. 4. Длина дуги контакта вальца с материалом в зависимости от скорости движения катка

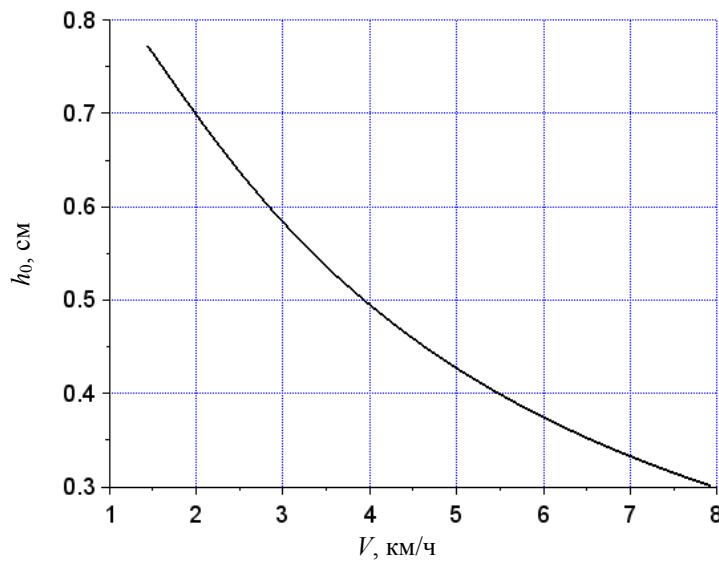


Рис. 5. Максимальная осадка материала под вальцом в зависимости от скорости движения катка

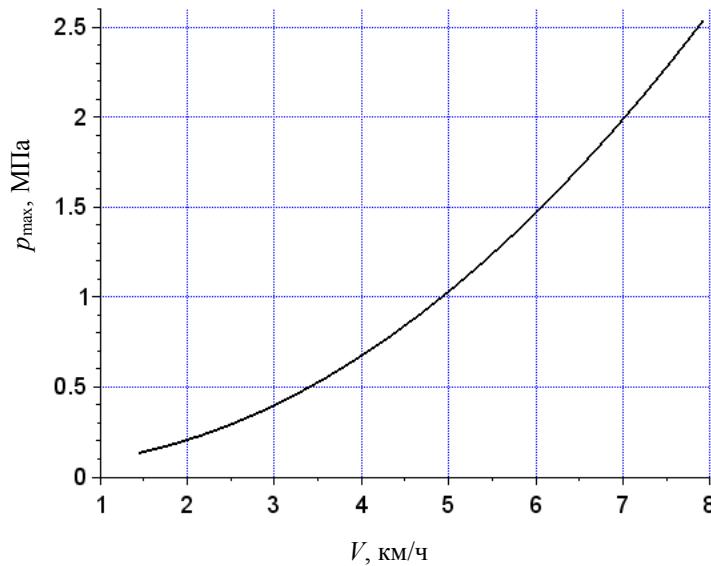


Рис. 6. Максимальное удельное давление под вальцом в зависимости от скорости движения катка

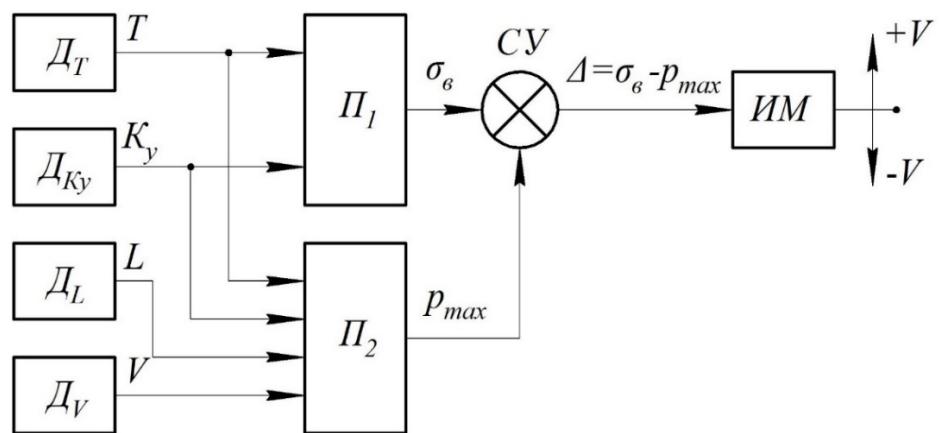


Рис. 7. Блок-схема системы автоматического управления процессом уплотнения

В ходе укатки асфальтобетонной смеси дорожным катком предлагаемая система автоматического управления осуществляет непрерывный контроль выполнения условия (1), а также корректировку скорости движения катка в случае нарушения указанного условия.

Так как максимальное удельное давление p_{\max} под вальцом катка и предел прочности σ_b уплотняемой смеси зависят от ее коэффициента уплотнения K_y и температуры T [13], то необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Для определения максимального удельного давления под вальцом катка p_{\max} в уравнении (14) неизвестными являются модуль жесткости c и коэффициент внутреннего трения μ асфальтобетонной смеси, зависящие от ее коэффициента уплотнения K_y и температуры T . С целью установления зависимости указанных параметров от характеристик материала требуется проведение серии лабораторных экспериментов по сжатию предварительно уплотненных образцов.

Для установления зависимости предела прочности асфальтобетонной смеси σ_b от коэффициента уплотнения K_y и температуры T уплотняемого материала требуется проведение серии лабораторных экспериментов по разрушению предварительно уплотненных образцов. В рамках данной работы перечисленные экспериментальные исследования не проводились. Принцип действия предлагаемой системы автоматического управления заключается в следующем. Процесс уплотнения начинается с первоначально установленной скорости движения катка V_0 . В процессе уплотнения материала с помощью датчиков D_t, D_{Ky}, D_L, D_V измеряют текущие значения сигналов, пропорциональных температуре T и коэффициенту уплотнения K_y асфальтобетонной смеси, длине дуги контакта вальца с материалом L , скорости движения катка V соответственно. На выходах блоков преобразователей P_1 и P_2 формируются сигналы, пропорциональные текущим значениям предела прочности асфальтобетонной смеси σ_b и максимального удельного давления под вальцом p_{\max} соответственно. Указанные сигналы поступают в устройство сравнения CY , где вычисляется приращение $\Delta = \sigma_b - p_{\max}$.

Если приращение $\Delta < 0$, то в исполнительный механизм *ИМ* поступает команда на уменьшение подачи насоса привода хода, в результате чего скорость движения катка уменьшается ($-V$). В противном случае *ИМ* повышает подачу насоса привода хода, увеличивая скорость движения катка ($+V$). Если величина приращения близка к нулю ($\Delta \approx 0$), то *ИМ* не изменяет режим работы, так как эффективность укатки максимальна.

Заключение

Разработанная теоретическая методика, реализованная в предлагаемой системе автоматического управления, позволяет повысить эффективность уплотнения асфальтобетонной смеси дорожным катком путем поддержания максимального удельного давления под вальцом катка на уровне предела прочности уплотняемого слоя. Варьирование максимального удельного давления под вальцом катка осуществляется в зависимости от физико-механических характеристик уплотняемого слоя асфальтобетонной смеси и обеспечивается за счет оперативного изменения скорости движения машины.

Список источников

1. Пермяков В. Б., Беляев К. В. Влияние режимных параметров катков на интенсивность уплотнения асфальтобетонных смесей // Строительные и дорожные машины. 2007. № 1. С. 19–22.
2. Захаренко А. В. Уплотняющее давление вальцов дорожного катка // Строительные и дорожные машины. 2005. № 2. С. 24–26.
3. Иванов В. Н., Трофимова Л. С., Линев Ф. В. Влияние параметров катков на качество уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях // Механизация строительства. 2012. № 8 (818). С. 11–13.
4. Хархута Н. Я., Шестopalов А. А. Выбор типа и режимов работы катков при уплотнении асфальтобетонных смесей // Автомобильные дороги. 1986. № 3. С. 24–25.
5. Носов С. В. Влияние технологических параметров дорожных катков на уплотнение асфальтобетонной смеси // Строительные и дорожные машины. 2001. № 7. С. 5–7.

6. Rechitsky V. S. Theoretical research and analysis of work process of a road roller with local deformation of roll in compaction zone // *FME Transactions*. 2017. Vol. 45, № 4. P. 503–509. DOI 10.5937/fmet1704503V.
7. Johnson K. L. Contact mechanics. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. 510 p. DOI 10.1017/CBO9781139171731.
8. Богомолов В. А., Жданюк В. К., Богомолов С. В. Простейшие звенья линейной пространственной реологической модели асфальтобетона // Автомобильный транспорт. 2010. № 27. С. 157–162.
9. Евтиков С. А., Овчаров А. А., Замараев И. В. Построение механореологических моделей процессов взаимодействия рабочих органов строительно-дорожных машин со средой. СПб. : С.-Петербург. гос. арх.-строит. ун-т, 2011. 59 с.
10. Строительство и реконструкция автомобильных дорог : справ. энцикл. дорожника (СЭД) : в 5 т. / А. П. Васильев, Б. С. Марышев, В. В. Силкин [и др.]. М. : Информавтодор, 2005. Т. 1. 1519 с.
11. Path tracking control of an articulated road roller with sideslip compensation / M. B. Yang, L. Yongming, Z. H. Guangjun and Z. Hao // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 127981–127992. DOI 10.1109/ACCESS.2020.3008455.
12. Wang J. W., Tong P. F. Development of unmanned roller and its application in highway engineering // 20th COTA International Conference of Transportation Professionals. 2020. P. 1583–1590. DOI 10.1061/9780784483053.133.
13. Зубков А. Ф., Однолько В. Г. Технология строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог : монография. М. : Машиностроение, 2009. 224 с.
14. Comprehensive control method of asphalt concrete compaction by road roller / R. Emelyanov, A. Prokopev, Y. Vasiliev [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1889. P. 042059. DOI 10.1088/1742-6596/1889/4/042059.

References

1. Permyakov V. B., Belyaev K. V. Influence of regime parameters of rollers on the intensity of compaction of asphalt concrete mixtures. *Construction and road machines*. 2007;(1):19–22. (In Russ.).
2. Zakharenko A. V. Sealing pressure of road roller rollers. *Construction and road machines*. 2005;(2):24–26. (In Russ.).
3. Ivanov V. N., Trofimova L. S., Linev F. V. Influence of roller parameters on the quality of compaction of asphalt concrete mixtures in road surfaces. *Construction mechanization*. 2012;(818):11–13. (In Russ.).
4. Kharhuta N. Ya., Shestopalov A. A. The choice of the type and modes of operation of rollers during the compaction of asphalt-concrete mixtures. *Car roads*. 1986;(3):24–25. (In Russ.).
5. Nosov S. V. Influence of technological parameters of road rollers on the compaction of asphalt concrete mixture. *Construction and road machines*. 2001;(7):5–7. (In Russ.).
6. Rechitsky V. S. Theoretical research and analysis of work process of a road roller with local deformation of roll in compaction zone. *FME Transactions*. 2017;45(4):503–509. (In Russ.). DOI 10.5937/fmet1704503V.
7. Johnson K. L. Contact mechanics. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. 510 p. DOI 10.1017/CBO9781139171731.
8. Bogomolov V. A., Zhdanyuk V. K., Bogomolov S. V. The simplest links of a linear spatial rheological model of asphalt concrete. *Automobile transport*. 2010;(27):157–162. (In Russ.).
9. Evtyukov S. A., Ovcharov A. A., Zamaraev I. V. Construction of mechanorheological models of the processes of interaction of the working bodies of road construction machines with the environment. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2011. 59 p. (In Russ.).
10. Vasiliev A. P., Maryshev B. S., Silkin V. V. [et al.]. Construction and reconstruction of highways: Ref. encyclo. road builder (SED): in 5 volumes. M.: Informavtodor; 2005. Vol. 1. 1519 p. (In Russ.).
11. Yang M. B., Yong-ming L., Guangjun Z. H., Hao Z. Path tracking control of an articulated road roller with sideslip compensation. *IEEE Access*. 2020;(8):127981–127992. DOI 10.1109/ACCESS.2020.3008455.
12. Wang J. W., Tong P. F. Development of unmanned roller and its application in highway engineering. 20th COTA International Conference of Transportation Professionals. 2020:1583–1590. DOI 10.1061/9780784483053.133.
13. Zubkov A. F., Odnolko V. G. Construction technology of asphalt concrete coatings of automobile roads: monograph. M.: Mashinostroenie; 2009. 224 p. (In Russ.).
14. Emelyanov R., Prokopev A., Vasiliev Y. [et al.]. Comprehensive control method of asphalt concrete compaction by road roller. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;(1889):042059. DOI 10.1088/1742-6596/1889/4/042059.

Информация об авторах

E. A. Шишкин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле» Тихоокеанского государственного университета.

A. A. Смоляков – магистрант кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле» Тихоокеанского государственного университета.

Information about the authors

E. A. Shishkin – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Transportation and Technological Systems in Construction and Mining Department, Pacific National University.

A. A. Smolyakov – a master student of the Transportation and Technological Systems in Construction and Mining Department, Pacific National University.

Статья поступила в редакцию 03.11.2021; одобрена после рецензирования 23.11.2021; принятa к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 03.11.2021; approved after reviewing 23.11.2021; accepted for publication 17.01.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 625.71

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_104

Метод расчета предельной глубины колеи для безопасного движения

Анатолий Сергеевич Александров¹, Татьяна Викторовна Семенова²✉

^{1, 2} Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

¹ aleksandrov00@mail.ru

² stv8@yandex.ru✉

Аннотация. Образование колей на покрытиях дорожных одежд нежесткого типа, в том числе на усовершенствованных асфальтобетонных покрытиях, является проблемой, которую пытаются решить во всем мире. Для этого выполняют исследования по разработке материалов и технологий, позволяющих строить слои дорожной одежды, устойчивые к сдвигу и пластическому деформированию; создают расчетные методики, позволяющие прогнозировать увеличение глубины колеи в процессе эксплуатации дороги; проводят экспериментальные и теоретические исследования, позволяющие определить максимальную глубину колеи при условии сохранения транспортно-эксплуатационных показателей дороги на приемлемом уровне. Совокупность таких исследований позволяет рассчитывать необходимую толщину дорожной одежды при ограничении глубины колеи предельным значением. В таких расчетах глубина колеи, возникающей в результате износа покрытия и остаточных деформаций слоев конструкции, сравнивается с предельным значением. Предельные значения назначаются согласно требованиям норм и стандартов. Анализ предельных значений глубины колеи, рекомендованных разными авторами и применяемых на практике в различных дорожных агентствах, показал, что эти значения отличаются в 1,5–2,5 раза.

В статье представлен метод расчета предельной глубины колеи, позволяющий ограничивать ее значение в зависимости от требуемых значений коэффициента сцепления шины с покрытием, скорости движения по участку дороги, глубины слоя воды в колее и параметров шероховатости покрытия. В основу расчета предельной глубины колеи положен критерий, согласно которому фактическое значение коэффициента сцепления шины с покрытием не может превышать предельного значения.

Ключевые слова: дорога, коэффициент сцепления, предельная глубина колеи, дорожное покрытие

Для цитирования: Александров А. С., Семенова Т. В. Метод расчета предельной глубины колеи для безопасного движения // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 104–116. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_104.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Method for calculating the limit rut depth for safe traffic

Anatoly S. Aleksandrov¹, Tatyana V. Semenova²✉

^{1, 2} Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

¹ aleksandrov00@mail.ru

² stv8@yandex.ru✉

Abstract. Rutting of flexible road pavements including the improved asphalt-concrete ones is a problem that is being solved all over the world. For this purpose, research is being carried out in the direction of developing materials and technologies that make it possible to build layers of pavement that are resistant to shear and plastic deformation. They create calculation methods that allow predicting the increase in the rut depth during the operation of the road. Experimental and theoretical studies are carried out to determine the maximum rut depth, based on the conditions for maintaining the transport and operational indicators of the road at an acceptable level. The combination of such studies allows to calculate the required thickness of the pavement from the condition of limiting the depth of the rut by a limit value. In these calculations, the rut depth resulting from pavement wear and residual deformations of the structural layers is compared with a limit value. Limit values are assigned in accordance with the requirements of norms and standards. Analysis of the limit values of the rut depth recommended by different authors and used in the practice of various road agencies showed that these values differ by a factor of 1,5–2,5.

The article presents a method for calculating the limiting depth of a rut, which makes it possible to limit its values depending on the required values of the coefficient of adhesion of the tire to the surface, the speed of movement along the road section, the depth of the water layer in the rut and the parameters of the roughness of the surface. The basis for calculating the limit rut depth is the criterion according to which the actual value of the coefficient of adhesion of the tire to the surface cannot exceed the limit value. The formulas for calculating the limit rut depth and the calculation results for various conditions of the pavement are given.

Keywords: road, adhesion coefficient, limit rut depth, road pavement

For citation: Aleksandrov A. S., Semenova T. V. Method for calculating the limit rut depth for safe traffic. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):104–116. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_104.

При выпадении жидких атмосферных осадков колея является местом их сосредоточения. По ней вода стекает вниз по уклону, сосредотачиваясь в точках с минимальной высотной отметкой. Отток воды из колеи возможен только в случае ее наполнения водой. Скопление дождевой воды в колее приводит к уменьшению сопротивления скольжению, что проявляется в виде снижения коэффициента сцепления. Этот факт бесспорен, он установлен в трудах известных специалистов А. П. Васильева [1], Ю. В. Кузнецова [2], М. В. Немчинова [3] и неоднократно подтвержден экспериментами [4–8]. В отдельных случаях при высокой скорости движения и достаточно большой глубине слоя стока возникает эффект аквапланирования [9–15]. Одним из направлений в исследованиях этого эффекта является математическое моделирование скорости аквапланирования при воздействии различных факторов.

Анализируя эти математические модели [16–22], отметим, что они развивались по мере накопления экспериментальных данных. Первой математической моделью скорости аквапланирования специалисты считают уравнение Horne's [16], в котором скорость аквапланирования ϑ_h зависит от давления воздуха вшине p . Модель разработана на основе обработки данных экспериментов, выполненных гладкими шинами. Позднее W. B. Horne, T. J. Yager, D. L. Ivey [17] уточнили эту эмпирическую формулу, учтя в ней отношение сторон отпечатка шины ($FAR = \text{ширина} / \text{длина}$). W. Gengenbach [18] получил эмпириическую формулу, в которой скорость аквапланирования связана с нагрузкой на колесо N , толщиной водной пленки, максимальной шириной пятна контакта B и коэффициентом подъемной силы C_l , определяемым эмпирически для конкретной шины. В. М. Gallaway [19] разработал математические зависимости скорости аквапланирования от толщины водной пленки t , которую вычислял для заданных длин водного

потока в плане L , уклона дорожного покрытия i , интенсивности осадков a и средней глубины шероховатости TXD . Дальнейшие исследования, выполненные в этой области, подтвердили зависимость скорости аквапланирования от толщины водной пленки и параметров шины, в результате были предложены различные уравнения [20–22]. Математические формулы для расчета скорости аквапланирования приведены в табл. 1.

Отметим, что аквапланирование характеризуется потерей контакта шины и покрытия. В результате действия на шину подъемной силы воды она контактирует с водной пленкой, а транспортное средство становится неуправляемым. Специалисты дорожной отрасли сопротивление скольжению характеризуют величиной коэффициента сцепления φ шины с покрытием, который определяется отношением сопротивления качению шины F_x к вертикальной нагрузке на ось шины Fh [1–3, 14, 15]. Коэффициент сцепления имеет свои предельные значения, которые сравнивают с фактическими, измеренными при определенных условиях. По величине коэффициента сцепления требования к безопасности движения более строгие, чем по скорости аквапланирования. Поэтому глубина колеи не должна превышать предельных значений, при которых глубина воды, скопившейся в колее, вызывает недопустимое снижение коэффициента сцепления. Таким образом, безопасное движение возможно при выполнении условия ограничения глубины колеи

$$RD \leq RD_{\text{lim}}, \quad (1)$$

где RD и RD_{lim} – фактическая и предельная глубина колеи, мм.

В настоящее время известны модели, связывающие глубину колеи с деформациями, накапливаемыми асфальтобетоном в покрытии, гранулированными материалами в основании и грунтом в земляном полотне. Такие модели приводятся в работах [23–27].

Таблица 1

Расчет скорости аквапланирования

Автор и источник цитирования	Формула для определения скорости аквапланирования ϑ_h , км/ч
W. B. Horne, R. C. Dreher [16]	$\vartheta_h = k\sqrt{p},$ где k – коэффициент, принимаемый в зависимости от единиц измерения ϑ_h и p (если ϑ_h измеряется в км/ч, а p – в кПа, то $k = 6,35$); p – давление в шинах, кПа
W. B. Horne, T. J. Yager, D. L. Ivey [17]	$\vartheta_h = k_1 \cdot 7,95 \sqrt{p(FAR)^{-1}},$ где k_1 – коэффициент приведения единицы измерения скорости от миль/ч к км/ч ($k_1 = 1,60934$)
W. Gengenbach [18]	$\vartheta_h = 508 \sqrt{\frac{N}{BtC_l}},$ где N – нагрузка на колесо, кр* (1 кр = 9,81 Н; 1 Н = 0,102 кр); B – ширина пятна контакта в мм; t – толщина водяной пленки в мм; C_l – коэффициент подъемной силы
B. M. Gallaway и др. [19]	$\vartheta_h = 0,9143 SD^{0,04} p^{0,3} (TD + 0,794)^{0,06} A;$ $A = \max \left\{ \frac{12,639}{t^{0,06}} + 3,507 \left(\frac{22,351}{t^{0,06}} - 4,97 \right) TXD^{0,14} \right\},$ где A – параметр мокрого шероховатого покрытия, являющийся функцией толщины водяной пленки и средней глубины шероховатости; SD – соотношение между скоростью вращения колес на мокром и сухом покрытиях ($\approx 10\%$); TD – глубина протектора шины, мм; t – толщина водяной пленки, мм; TXD – средняя глубина шероховатости, мм
V. Cerezo и др. [20]	$\vartheta_h = 29,4 \frac{p^{0,21}}{\sqrt{FAR}}$
H. R. Pasindu, T. F. Fwa, G. P. Ong [21, 22]	$\vartheta_h = k_1 \frac{10,49 N^{0,1957}}{t^{0,06}}; \quad \vartheta_h = k_1 \frac{4,27 p^{0,5001}}{t^{0,06}} + 2,58 p^{0,4989}$

* Килопонд (кр, лат. pondus) – это единица измерения силы, которая использовалась в ряде европейских государств.

Предложения по определению предельной глубины колеи сделаны в работах [8, 28–36], но регламентированные в них значения предельной глубины колеи существенно отличаются (в два раза и более). Поэтому целью публикации является разработка методики расчета предельной глубины колеи из условия размещения в ней дождевой воды, глубина которой не приводит к критическому уменьшению коэффициента сцепления шины с покрытием.

Сток воды с проезжей части обеспечивается продольными и поперечными уклонами. Поэтому при заполнении колеи водой глубина колеи RD больше, чем глубина воды WD . За счет поперечного уклона лишняя вода вытекает из колеи и транспортируется дальше, например на обочину. Это утверждение можно проиллюстрировать схемой (рис. 1) [12].

Из данной схемы следует, что глубина колеи определяется как сумма глубины воды, находящейся в колее, и части глубины колеи, которая не заполняется водой, d . Величина d представляет собой произведение расстояния от края колеи до точки измерения глубины колеи b_{rut} и уклона i . Безусловно, предельная глубина колеи должна определяться как сумма критической глубины воды WD_{lim} и величины d , соответствующей максимальной глубине колеи. Считая, что в пределах полосы движения расположено две колеи без боковых выпоров, величину b_{rut} можно найти как четвертую часть ширины полосы движения b_{tl} , т. е. $b_{rut} = 0,25b_{tl}$. Тогда предельную глубину колеи, измеряемую в мм, можно вычислить по формуле

$$RD_{lim} = WD_{lim} + 0,25b_{tl} \frac{10^3 i}{10^4} = WD_{lim} + 0,025b_{tl}i. \quad (2)$$

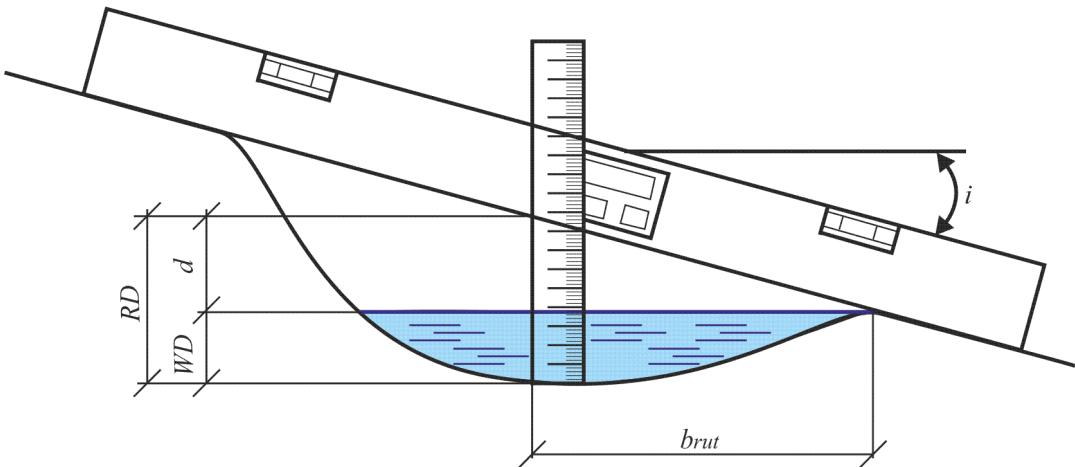


Рис. 1. Измерение колеи [12]:

d – часть глубины колеи, которая не заполняется водой; WD – часть глубины колеи, которая заполняется водой; RD – глубина колеи; i – уклон стока

Траектория течения воды зависит от уклона стока i , который можно определить через поперечный уклон i_c и продольный i_{ls} уклоны. Для расчета уклона стока используем известные формулы:

$$i^2 = i_c^2 + i_{ls}^2; \quad i = \sqrt{i_c^2 + i_{ls}^2}. \quad (3)$$

Условием, гарантирующим безопасность движения, является обеспечение требуемых сцепных качеств мокрого покрытия с шиной и нахождение из этого условия критической глубины воды WD_{lim} . В качестве такого условия примем неравенство, согласно которому фактический коэффициент сцепления ϕ не должен превышать некоторой предельной величины ϕ_{lim} . Поэтому критерий безопасного движения автомобиля по мокрому покрытию запишем в виде

$$\phi \geq \phi_{lim}. \quad (4)$$

Измерения коэффициента сцепления выполняются мобильными приборами при соблюдении определенных правил. В России измерения выполняют при скорости движения прибора 60 ± 2 км/ч и равномерном распределении по поверхности покрытия воды. Расход воды составляет $2,75 \pm 0,1$ л/с. Такой расход позволяет обеспечить в момент блокировки измерительного колеса толщину водной пленки 1 мм. Кроме

того, к измеренной величине коэффициента сцепления прибавляют поправку $\Delta\phi$, учитывающую температуру воздуха при измерении (табл. 2).

Учитывая требования к измерению коэффициента сцепления, предельную величину этого коэффициента ϕ_{lim} задают для определенных условий. К таким условиям относят скорость движения 60 км/ч, температуру воздуха 20 °C, толщину водной пленки 1 мм, тип покрышки шины (с протектором глубиной не менее 1,0 мм или без протектора) и условия движения (легкие, затруднительные, опасные).

Безусловно, при изменении одного из перечисленных факторов, например скорости движения, величина коэффициента сцепления изменится. Поэтому данные факторы необходимо учитывать при регламентации его предельной величины. Экспериментальные данные I. Grabec и F. Švegl [35], Sven van der Sluis [36], а также А. П. Васильева [1] показали, что между величиной коэффициента сцепления и скоростью движения имеется устойчивая взаимосвязь. Эта связь в общем случае выражается полиномом второй степени [36], экспоненциальными и логарифмическими функциями [35].

Таблица 2

Значение температурной поправки $\Delta\phi$ к коэффициенту сцепления

Температура воздуха при измерении, °C	5	10	15	20	25	30	35	40
Температурная поправка $\Delta\phi$	-0,04	-0,03	-0,02	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02

Согласно данным А. П. Васильева [1], переход от коэффициента сцепления φ_{91} , измеренного при одной скорости ϑ_1 к коэффициенту сцепления φ_{92} при другой скорости ϑ_2 можно осуществить по формуле

$$\varphi_{92} = \varphi_{91} - \beta_\varphi (\vartheta_2 - \vartheta_1), \quad (5)$$

где β_φ – параметр, учитывающий изменение коэффициента сцепления в зависимости от скорости движения автотранспортного средства, типа покрытия и его состояния.

Зависимость (5) применена нами для вычисления требуемой величины коэффициента сцепления при различных скоростях движения $\varphi_{lim\ 9}$ на мокром чистом и мокром грязном покрытиях. В этом случае зависимость (5) примет вид

$$\varphi_{lim\ 9} = \varphi_{lim} - \beta_\varphi (\vartheta_2 - 60), \quad (6)$$

где φ_{lim} – требуемое значение коэффициента сцепления, измеренное при скорости движения 60 км/ч.

Результаты расчета предельных коэффициентов сцепления приведены в табл. 3, в которой φ_{lim} принят по разным нормам (0,45; 0,40 и 0,35).

Предельные значения коэффициента сцепления шины с покрытием, представленные в табл. 3, можно использовать в критерии (4). Его применение требует разработки математической модели, учитывающей влияние на

величину коэффициента сцепления как скорости движения, так и других факторов, к которым прежде всего необходимо отнести шероховатость покрытия и его состояние, характеризующееся глубиной слоя стекающей воды.

Известно, что шероховатость на мокром дорожном покрытии необходима для улучшения условий взаимодействия колеса автомобиля с покрытием. В этом случае она образует систему дренирующих ходов, по которым вода отжимается из зоны контакта дорожного покрытия с шиной. Кроме того, шероховатость разрывает пленки воды, обеспечивая контакт шины с поверхностью покрытия. Этот известный факт обуславливает необходимость учета степени шероховатости покрытия при математическом моделировании коэффициента сцепления шины с покрытием.

Шероховатость дорожного покрытия подразделяют на два вида: микро- и макрошероховатость (рис. 2). Микрошероховатость представляет собой шероховатость зерен каменного материала, применяемого для устройства шероховатого покрытия. Макрошероховатостью называют шероховатость дорожного покрытия, она характеризуется тремя параметрами, по величине которых классифицируются покрытия: средней глубиной впадин H , средней высотой выступов R и шагом шероховатости L . Среднюю глубину впадин H определяют методом

Таблица 3

Предельные значения коэффициента сцепления для мокрого чистого асфальтобетонного покрытия ($\beta_\varphi = 0,0035$)

Скорость движения, км/ч						
60	70	80	90	100	110	120
0,45	0,41	0,37	0,33	0,29	0,25	0,21
0,40	0,37	0,33	0,30	0,26	0,23	0,19
0,35	0,32	0,28	0,25	0,21	0,18	0,14

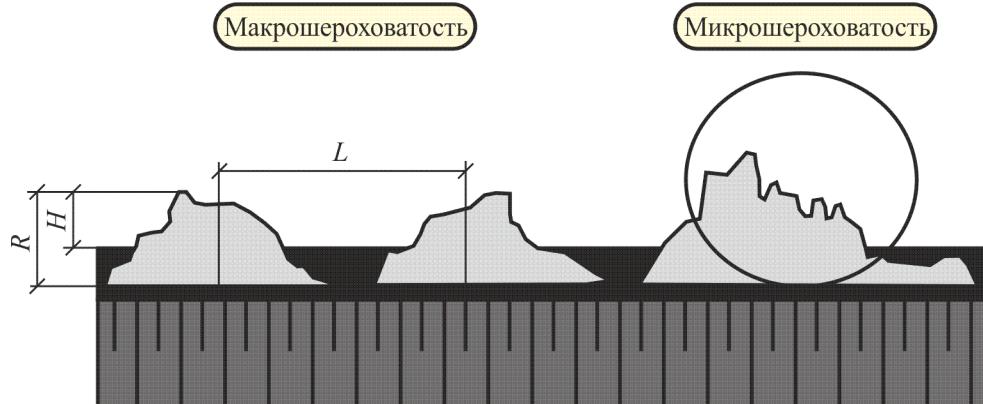


Рис. 2. Виды и параметры шероховатости покрытия

песчаного пятна. Для этого на покрытие высыпают известный объем песка и распределяют его в виде простой геометрической фигуры, например окружности. Песок распределяют так, чтобы его поверхность была бровень с наиболее крупными зернами шероховатости. Далее измеряют геометрические характеристики песчаной фигуры, у окружности измеряют диаметр. После измерений вычисляют площадь фигуры, а затем рассчитывают среднюю глубину впадин H как отношение объема песка к площади. Определение средней высоты выступов R требует снятия слепка с покрытия, для этого используют гипсовые материалы. Метод песчаного пятна применяют на гипсовом слепке, а по отношению объема песка к площади фигуры рассчитывают величину ΔR . Среднюю высоту выступов определяют суммой ΔR и ранее определенной средней глубины впадин H , т. е. $R = H + \Delta R$.

Кроме того, шероховатые покрытия разделяют на типы, к которым относят равномерную шероховатость и шипованную поверхность (рис. 3). Параметры шероховатости измеряются в местах определения коэффициента сцепления.

Величина коэффициента сцепления шины с покрытием измерялась при различных скоростях движения мобильного прибора ϑ , различных параметрах шероховатости покрытия R и разной глубине водного слоя на покрытии WD . При этом глубина водного слоя всегда была такой, чтобы обеспечивалось условие $0 \leq R - WD < R$. Разность $R - WD$ названа активной средней высотой выступов шероховатости R_{act} . Этот параметр характеризует величину выступов шероховатости, не заполненную водой и способную вдавливаться в шину, обеспечивая эффект сцепления мокрого шероховатого покрытия с шиной мобильного имитатора. Параметры микротекстуры в процессе эксперимента не измерялись. В ре-

зультате измерений глубины слоя стока установлено, что ее экспериментальные значения соответствуют теоретическим значениям, вычисляемым по формуле

$$WD = \left(\frac{aL_w n}{30k^{-1} \sqrt[4]{i_c^2 + i_{ls}^2}} \right)^{0,588}, \quad (7)$$

где a – интенсивность дождя, мм/мин; L_w – длина участка стекания воды, мм; n – коэффициент гидравлической шероховатости; k – коэффициент, принимаемый равным при измерении уклона в процентах 10, а в промилле 31,6228; i_{ls} , i_c – продольный и поперечный уклон проезжей части и уклон стока соответственно, % или ‰.

Длина участка стекания воды L_w и коэффициент гидравлической шероховатости n определяются по формулам:

$$L_w = b \sqrt{1 + \left(\frac{i_{ls}}{i_c} \right)^2}; \quad n = \frac{R^{0,2}}{23,3}, \quad (8)$$

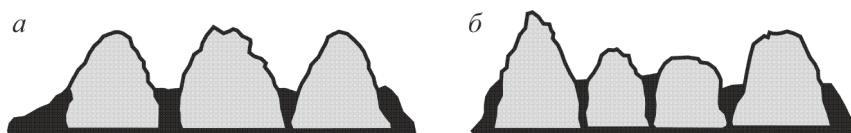
где b – кратчайшее расстояние от точки определения глубины до оси проезжей части, мм; R – средняя высота выступов шероховатости, м.

С учетом формул (8) зависимость (7) примет вид

$$WD = \left(\frac{a}{30k^{-1} \sqrt[4]{i_c^2 + i_{ls}^2}} b \sqrt{1 + \left(\frac{i_{ls}}{i_c} \right)^2} \frac{R^{0,2}}{23,3} \right)^{0,588}. \quad (9)$$

Результаты эксперимента по измерению коэффициента сцепления шины и покрытия прошли статистическую обработку. В результате получена эмпирическая формула:

$$\varphi = \left[0,399 \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} \right)^2 - 1,3591 \frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} + 1,226 \right] \times \exp \left\{ \frac{R - WD}{2R_{lim}} \left[1,2473 \frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} - 0,4861 \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} \right)^2 - 0,598 \right] \right\}, \quad (10)$$



*Rus. 3. Типы и параметры шероховатости покрытия:
а – шероховатое покрытие, характеризующееся приблизительно одинаковым размером зерен шероховатости; б – шипованное покрытие*

где ϑ и ϑ_{lim} – фактическая и предельная ($\vartheta_{lim} = 90$ км/ч) скорость движения по дорогам общего пользования, км/ч; R – средняя высота выступов шероховатости покрытия, мм; R_{lim} – предельные значения средней высоты выступов для гладких покрытий, $R_{lim} = 0,5$ мм; WD – глубина слоя стока, мм.

Формула (10) удобна тем, что из нее несложно определить разность средней высоты выступов шероховатости R и предельной глубины воды WD_{lim} , при которой в зависимости от скорости движения ϑ обеспечиваются требуемые значения коэффициента сцепления $\varphi_{lim\vartheta}$. Выполнив преобразования, получим, что разность $R - WD_{lim}$ определяется по формуле

$$R - WD_{lim} = \frac{2R_{lim}}{1,2473 \frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} - 0,4861 \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} \right)^2 - 0,598} \times \times \ln \left[\frac{\varphi_{lim\vartheta}}{0,399 \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} \right)^2 - 1,3591 \frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} + 1,226} \right]. \quad (11)$$

Из полученного уравнения выразим предельную глубину воды WD_{lim} , при которой в условии (4) возникает предельное состояние $\varphi = \varphi_{lim\vartheta}$:

$$WD_{lim} = R - \frac{2R_{lim}}{1,2473 \frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} - 0,4861 \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} \right)^2 - 0,598} \times \times \ln \left[\frac{\varphi_{lim\vartheta}}{0,399 \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} \right)^2 - 1,3591 \frac{\vartheta}{\vartheta_{lim}} + 1,226} \right]. \quad (12)$$

Формулы (7) и (12) позволяют производить оценку безопасности движения по критерию глубины воды на покрытии. Безопасность движения обеспечивается в том случае, если выполняется условие

$$WD \leq WD_{lim}. \quad (13)$$

Иллюстрации решения задачи о предельной глубине колеи представим в виде графиков и таблиц, отображающих основные полученные зависимости.

Расчет коэффициентов сцепления, значения которых приведены на рис. 4, выполнен по формуле (10). На этом графике приведены предельные значения коэффициента сцепления, в качестве которых приняты наибольшие из представленных в табл. 3.

Данные рис. 4 иллюстрируют проверку безопасности движения по критерию (4). Из анализа этих данных следует, что при скорости

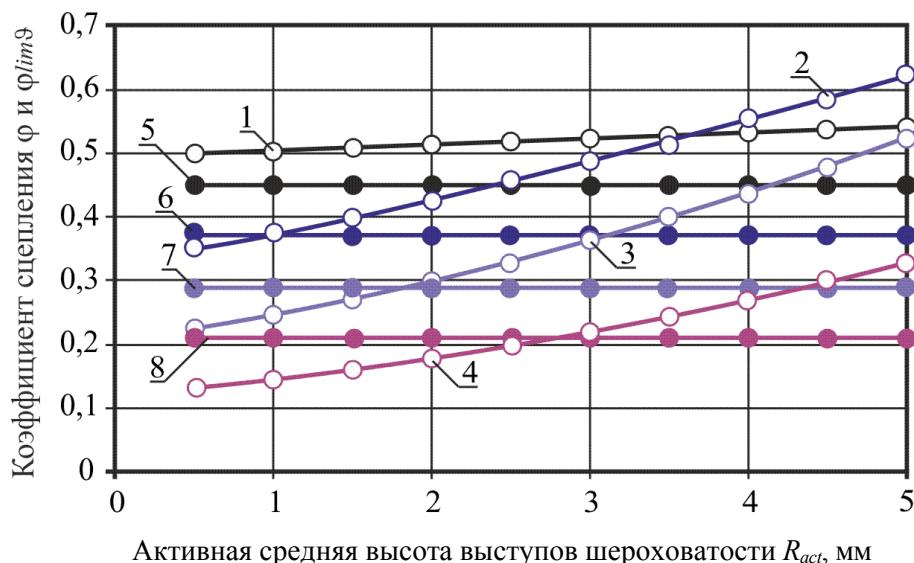


Рис. 4. Зависимость коэффициента сцепления шины с покрытием от скорости движения и активной средней высоты выступов шероховатости:

1–4 – фактический коэффициент сцепления φ при скорости 60, 80, 100 и 120 км/ч соответственно;
5–8 – предельный коэффициент сцепления $\varphi_{lim\vartheta}$ при скорости 60, 80, 100 и 120 км/ч соответственно

движения 60 км/ч и активной средней шероховатости покрытия от 0,5–5,0 мм фактические значения коэффициента сцепления φ превышают предельное значение $\varphi_{lim\ 60} = 0,45$. Значит, при данных условиях движение со скоростью 60 км/ч можно считать безопасным. При других скоростях безопасность движения обеспечивается шероховатостью покрытия, а именно его частью, не заполненной водой. Так, для безопасного движения со скоростью 80, 100 и 120 км/ч необходимо соблюдение условий $R_{act} \geq 1$ мм, $R_{act} \geq 2$ мм и $R_{act} \geq 2,8$ мм соответственно.

По формуле (12) вычислены предельные глубины колеи WD_{lim} , обеспечивающие безопасное движение со скоростями 60, 80, 100 и 120 км/ч (табл. 4).

Из анализа табл. 4 следует, что безопасное движение по мокрому гладкому покрытию ($R = 0,5$ мм) возможно только с малыми скоростями – не более 60 км/ч. При этом в зависимости от требуемой величины коэффициента сцепления $\varphi_{lim\ 60}$, равного 0,35; 0,40; 0,45, глубины колеи RD_{lim} не должны превышать 22,1; 14,4; 7,7 мм соответственно. Такое движение соответствует только городским дорогам определенной категории. Поэтому требования, предъявляемые к шероховатости покрытий загородных дорог России, следует признать обоснованными. На таких дорогах величина средней высоты выступов шероховатости не должна быть меньше 1 мм. Наибольшая предельная глубина колеи соот-

ветствует покрытиям, характеризуемым средней высотой выступов шероховатости 5 мм. На таких покрытиях в зависимости от скорости движения и требуемого коэффициента сцепления предельная глубина колеи составляет 4,1–26,6 мм. При вариации средней высоты выступов шероховатости покрытия в пределах 1,0–5,0 мм предельная глубина колеи должна быть равна 0–26,6 мм.

Разработанный метод расчета позволяет ограничивать глубину колеи предельной величиной, при которой достигается требуемый коэффициент сцепления при определенной скорости движения и заданных параметрах шероховатости. Это позволяет обеспечить безопасность движения по дорожному покрытию с колеей, заполненной дождевой водой.

Результаты расчета предельной глубины колеи, представленные в табл. 4, можно сравнить с результатами, полученными другими авторами (табл. 5).

Из анализа данных табл. 5 следует, что для обеспечения безопасного движения с низким уровнем тяжести дорожные агентства ограничивают наименьшие значения предельной глубины от 0 (PASER Manual, Asphalt Roads) до 6,3 мм (PCI, WsDOT, СММРО). Из анализа полученных нами данных, представленных в табл. 4, можно сделать вывод о том, что предельные глубины колеи 0,1–6,3 мм допустимы при высоких скоростях движения 100–120 км/ч на шероховатых покрытиях ($R = 1,0$ – $5,0$ мм). Наибольшие значения глубины колеи 9,5–

Таблица 4
Предельные глубины колеи для обеспечения безопасного движения с разными скоростями движения при обеспеченных коэффициентах сцепления шины с покрытием

Скорость движения, км/ч	Требуемый коэффициент сцепления	Предельная глубина колеи RD_{lim} , мм, при средней высоте выступов шероховатости R , мм					
		0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
60	0,35	22,1	22,6	23,6	24,6	25,6	26,6
	0,40	14,4	14,9	15,9	16,9	17,9	18,9
	0,45	7,7	8,2	9,2	10,2	11,2	12,2
80	0,28	3,7	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2
	0,33	2,4	2,9	3,9	4,9	5,9	6,9
	0,37	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
100	0,21	2,2	2,7	3,7	4,7	5,7	6,7
	0,26	1,1	1,6	2,6	3,6	4,6	5,6
	0,29	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
120	0,14	1,6	2,1	3,1	4,1	5,1	6,1
	0,19	0,1	0,6	1,6	2,6	3,6	4,6
	0,21	0,4	0,1	1,1	2,1	3,1	4,1

12,7 мм, регламентируемые табл. 5, согласуются с данным табл. 4 при скоростях движения менее 70 км/ч. Данные табл. 4, по сравнению с данными табл. 5, учитывают большее количество факторов. Поэтому ограничения глубины колеи, приведенные в табл. 4, можно использовать в качестве детализации предельных глубин колей, оговариваемых в табл. 5 для движения с низкой степенью тяжести.

Принципиальным отличием метода определения предельной глубины колеи, разработанного нами, от аналогичных предложений других авторов является возможность ее вычисления в зависимости от основных факторов:

- скорости движения транспортного средства, которая должна соответствовать максимально допустимой скорости движения на данном участке;

- параметра шероховатости асфальтобетонного покрытия, а именно средней высоты выступов, измеряемой методом «песчаное пятно»;

- глубины водного слоя стока, вычисляемой с учетом расчетной интенсивности дождя, являющейся нормируемым параметром для каждого из 10 ливневых районов, а также геометрических характеристик покрытия, определяемых поперечным и продольным уклоном поверхности.

Полученные результаты можно использовать при прогнозировании межремонтных сроков по ликвидации колейности, но совместно с расчетом изменения глубины колеи в процессе эксплуатации. С этой целью следует вычислить величину RD_{lim} [критерий (1)]. Для

расчета фактической глубины колеи RD можно использовать любую из известных методик после оценки соответствия результатов вычислений экспериментальным данным. Обратим внимание, что причинами формирования колеи является достаточно большое количество факторов – накапливание остаточных деформаций во всех слоях дорожной одежды и грунте земляного полотна, а также износ асфальтобетонного покрытия. Величина остаточных деформаций состоит из деформаций изменения объема и формы, т. е. зависит от шаровой и девиаторной составляющих тензоров напряжений. Кроме того, остаточные деформации слоев из щебеночных и гравийных материалов обуславливаются изменением гранулометрического состава, вызванным дроблением и истиранием зерен с последующей переупаковкой части, а также изменением объема и толщины. Влияние износа асфальтобетонного покрытия на глубину колеи, формирующуюся на различных участках дорог, неодинаково. Износ обусловлен горизонтальной составляющей нагрузки, а она зависит от величины коэффициента сцепления шины с покрытием, его значение тем больше, чем меньше скорость движения. Поэтому на участках торможения влияние износа на глубину колеи больше, чем на участках разгона и тем более чем на участках с обычным режимом движения при максимально допустимой скорости. Следовательно, выбор методики расчета увеличения глубины колеи в процессе эксплуатации дороги сложен и должен быть

Предельная глубина колеи по степени опасности

Таблица 5

Дорожные агентства	Низкая		Средняя		Высокая	
	дюйм	мм	дюйм	мм	дюйм	мм
Pavement Condition Index (PCI) [8, 30]	0,25–0,5	6,3–12,7	0,5–1	12,7–25,4	>1	>25,4
PASER Manual, Asphalt Roads [8, 31]	0–0,5	0–12,7	>1	>25,4	>2	>50,8
Washington State DOT (WsDOT) [8, 32]	0,25–0,5	6,3–12,7	0,5–0,75	12,7–19,1	>0,75	>19,1
Ohio DOT (OhDOT) [8, 33]	0,125–0,375	3,2–9,5	0,375–0,75	9,5–19,1	>0,75	>19,1
Massachusetts Highway Dept. (CMMPO) [8]	0,25–0,5	6,3–12,7	0,5–1,5	12,7–38,1	>1,5	>38,1
Ministry of Transportation and Infrastructure, British Columbia (MTI BC) [8, 34]	–	3–10	–	10–20	–	>20
California DOT (Caltrans) [8]	Корректируется при глубине колеи >1 дюйма (>25,4 мм)					

исследован в отдельной публикации или серии статей. Результатом работы будет методика расчета межремонтных сроков ликвидации колей, в которой величина предельного значения RD_{lim} может определяться по нашему предложению, а расчет фактической глубины колеи RD – по методу других авторов. Тем не менее для практического применения результатов нашей работы можно рекомендовать экспериментальную оценку соответствия состояния покрытия по глубине колеи требованиям безопасного движения, проводимую в рамках эксплуатационной диагностики.

В этом случае в процессе эксплуатационной диагностики необходимы измерения глубины колеи, параметров шероховатости (средней глубины впадин и средней высоты выступов) и коэффициента сцепления в условиях, регламентируемых стандартами РФ. Такие измерения выполняются методами, регламентируемыми стандартами РФ, коротко опишем их.

Параметры шероховатости покрытия измеряются методом «песчаное пятно». В этом случае необходимо определить среднюю высоту выступов, для чего измерения выполняют как на поверхности дороги, так и на гипсовом слепке, снятом с покрытия в этой точке. Вычисляют среднюю глубину впадин как отношение объема песка, высыпанного и распределенного по покрытию, к диаметру пятна. Как известно, средняя глубина впадин является первым слагаемым в формуле для расчета средней высоты выступов.

Аналогичный опыт выполняют на гипсовом слепке, снятом с покрытия, определяя второе слагаемое, используемое для вычисления средней высоты выступов.

Глубину колеи измеряют либо с применением современных мобильных лабораторий типа «Трасса», снабженных лазерными излучателями, либо при помощи стационарных лазерных 3D-сканеров, а в самом простом случае – просветом под дорожной рейкой.

Коэффициент сцепления измеряется на увлажненном покрытии при помощи мобильных или стационарных приборов. При этом измерение мобильными прицепами типа ПКРС-2У и ПКРС-3 выполняют с соблюдением регламентируемой скорости движения и расхода воды, подаваемой под шину при блокировке колеса. Применение стационарных приборов типа ППК-МАДИ-ВНИИБД требует увлажнения покрытия и 3–5 холостых сбросов для очистки покрытия от мокрой пыли и стабилизации показаний прибора. Расчетная интенсивность дождя регламентируется для каждого ливневого района территории РФ, она учтена при расчете глубины слоя стока и предельной глубины колеи (см. табл. 4). При диагностике в измерении глубины водного слоя необходимости нет, но нужно контролировать глубину колеи, не допуская превышения значений, указанных в табл. 4, для разрешенной скорости движения на конкретном участке дороги.

Список источников

1. Васильев А. П. Проектирование дорог с учетом влияния климата на условия движения : учеб. пособие. М. : Транспорт, 1986. 248 с.
2. Кузнецов Ю. В. Сцепление автомобильной шины с дорожным покрытием : учеб. пособие. М. : МАДИ, 1985. 107 с.
3. Немчинов М. В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобиля : учеб. пособие. М. : Транспорт, 1985. 231 с.
4. Новизенцев В. В., Оськин Д. В. Скорость, дорожные условия и безопасность движения // Наука и техника в дорожной отрасли. 2007. № 3. С. 7–10.
5. Александров А. С., Семенова Т. В. Обеспечение сцепных качеств асфальтобетонных покрытий городских дорог и улиц при проектировании сети дождевой канализации // Вестник МАДИ. 2009. № 2 (17). С. 29–32.
6. Александров А. С., Александрова Н. П., Семенова Т. В. Критерии проектирования шероховатых асфальтобетонных покрытий из условия обеспечения безопасности движения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2009. № 2. С. 66–73.
7. Fwa T. F. Skid resistance determination for pavement management and wet-weather road safety // International Journal of Transportation Science and Technology. 2017. Vol. 6 (3). P. 217–227.
8. Fwa T. F., Pasindu H. R., Ong G. P. Critical Rut Depth for Pavement Maintenance Based on Vehicle Skidding and Hydroplaning Consideration // Journal of Transportation Engineering. 2012. Vol. 138 (4). P. 423–429.

9. Start R. M., Joeng K., Berg W. D. Potential Safety Cost Effectiveness of Treating Rutted Pavements // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1998. Vol. 1629. P. 208–213.
10. Ihs A., Velin H. and Wiklund M. The Influence of Road Condition on Traffic Safety: Data from 1992–1998 // VTI meddelande 909. Linköping, Sweden : Swedish National Road Administration, 2002. 47 p.
11. Christensen P., Ragnoy A. The condition of the road surface and safety. The importance of rut depth, roughness (IRI) and changes in cross-slope for road safety. TOI Report 840 / 2006. Oslo : Transport Economics Institute, 2006. 56 p.
12. Glennon J. C. Roadway Hydroplaning – Measuring Pavement Wheel Rut Depths to Determine Maximum Water Depths // Crash Forensics Motor – Vehicle Accident Investigation and Reconstruction Services. 2015. Jan. URL: <https://www.crashforensics.com/papers.cfm?PaperID=55> (дата обращения: 01.09.2021).
13. Glennon J. C. Roadway Hydroplaning – A Framework to Determine Critical Pavement Wheel Rut Depths // Crash Forensics Motor – Vehicle Accident Investigation and Reconstruction Services. 2015. Jan. URL: <https://www.crashforensics.com/papers.cfm?PaperID=56> (дата обращения: 01.09.2021).
14. Adhesion Characteristics of Tire – Asphalt Pavement Interface Based on a Proposed Tire Hydroplaning Model / B. Zheng [et al.] // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 2018 (4). P. 1–12.
15. Ji T., Huang X., Liu Q. Part hydroplaning effect on pavement friction coefficient // Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2003. Vol. 3 (4). P. 9–12.
16. Horne W. and Dreher R. Phenomena of pneumatic tire hydroplaning : Technical note NASA TN D – 2056. Washington, DC : Langley Research Center : National Aeronautics and Space Administration, 1963. November. 55 p.
17. Horne W. B., Yager T. J., Ivey D. L. Recent studies to investigate effects of tire footprint aspect ratio on dynamic hydroplaning speeds // American society for testing and material. ASTM STP 929. 1986. P. 26–46.
18. Gengenbach W. Experimental investigation of tires on wet pavements // Automotive technology magazine. 1968. Vol. 70. P. 310–316.
19. Pavement and Geometric Criteria for Minimizing Hydroplaning / B. M. Gallaway [et al.] ; Federal Highway Administration. Report № FHWA-RD-79-31. Springfield, Virginia, 1979. 308 p.
20. Hydroplaning speed and infrastructure characteristics / V. Cerezo [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. J. Journal of Engineering Tribology. SAGE Publications. 2010. Vol. 224 (9). P. 891–898.
21. Pasindu H. R., Fwa T. F., Ong G. P. Evaluation of Aircraft Landing Hydroplaning Risk // II International Conference on Transport Infrastructures. At Sao Paulo, Brazil, 2010. P. 469–478.
22. Ong G. P., Fwa T. F. Wet – Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance // Journal of transportation engineering. 2008. Vol. 134 (5). P. 182–190.
23. Hussan S., Kamal M. A., Hafeez I. Modeling and Correlating Rut Depth Observed in Different Asphalt Mixture Performance Tests // Mehran University Research Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 37 (3). P. 553–570.
24. Hu S., Zhou F., Scullion T. Development, calibration and validation of a new M – E rutting model for HMA overlay design and analysis // Journal of Materials in Civil Engineering. 2011. Vol. 23 (2). P. 89–99.
25. Mechanistic – empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's – eye view / Q. Li, D. X. Xiao, K. C. P. Wang [et al.] // Journal of Modern Transportation. 2011. Vol. 19 (2). P. 114–133.
26. Guo X., Timm D. H. Automating Mechanistic – Empirical Pavement Design Calibration Studies // The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability. Springer, Cham, 2016. P. 309–319.
27. Yanov D. V., Zelepyugin S. A. Road pavement design using the finite element method // Journal of Physics Conference Series. 2019. Vol. 1214. P. 1–8.
28. Gercog V. N., Dolgikh G. V., Kuzin N. V. Calculation criteria for road pavement evenness. Pt. 1. Substantiating the flatness standards of asphalt pavement // Magazine of Civil Engineering. 2015. Vol. 5 (57). P. 45–57.
29. Aleksandrov A. S., Dolgikh G. V., Kuzin N. V. Method of Calculating the Limiting Depth of Ruts on the Pavement of Automobile Roads // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. P. 052019.
30. Shahin M. Y. Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots. N. Y. : Chapman & Hall, 1994. 574 p.
31. Walker D., Entine L., Kummer S. Pavement Surface Evaluation and Rating (PASER), Asphalt Roads. Madison : University of Wisconsin – Madison, 2002. 29 p.
32. Washington State Department of Transportation (WsDOT). Pavement Surface Condition Field Rating Manual for Asphalt Pavements. Olympia, Washington, 1999. 72 p.
33. Ohio State Department of Transportation (OhDOT). Pavement Condition Rating System. Columbus, OH, 2006. 30 p.
34. Ministry of Transportation and Infrastructure, British Columbia (MTI BC). Pavement Surface Condition Rating Manual. 3rd ed. British Columbia, 2009. 86 p.
35. Grabec I., Švegl F. Forecasting of traffic jams on high ways caused by adverse weather // 16th SIRWEC Conference. Helsinki, 23–25 May. 2012. ID: 27. P. 1–8.

36. Sven van der Sluis. Ableitung einer Wechselbeziehung zwischen Griffigkeit, Geschwindigkeit und Haltesichtweite anhand realer Bremsvorgänge : PhD Dissertation. Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch – Westfälischen Technischen Hochschule. Aachen, 2002. 226 p.

References

1. Vasiliev A.P. Designing roads taking into account the influence of climate on traffic conditions: textbook. M.: Transport; 1986. 248 p. (In Russ.).
2. Kuznetsov Yu. V. Adhesion of an automobile tire with a road surface: textbook. M.: MADI; 1985. 107 p. (In Russ.).
3. Nemchinov M. V. Coupling qualities of road surfaces and vehicle traffic safety: textbook. M.: Transport; 1985. 231 p. (In Russ.).
4. Novizentsev V. V., Oskin D. V. Speed, road conditions and traffic safety. *Science and technology in the road industry*. 2007;(3):7–10. (In Russ.).
5. Aleksandrov A. S., Semenova T. V. Ensuring the coupling qualities of asphalt concrete pavements of city roads and streets when designing a rain sewer network. *Bulletin of MADI*. 2009;2(17):29–32. (In Russ.).
6. Aleksandrov A. S., Aleksandrova N. P., Semenova T. V. Criteria for designing rough asphalt concrete coatings from the condition of ensuring traffic safety. *News of higher educational institutions. Construction*. 2009;(2):66–73. (In Russ.).
7. Fwa T. F. Skid resistance determination for pavement management and wet-weather road safety. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2017;6(3):217–227. (In Russ.).
8. Fwa T. F., Pasindu H. R., Ong G. P. Critical Rut Depth for Pavement Maintenance Based on Vehicle Skidding and Hydroplaning Consideration. *Journal of Transportation Engineering*. 2012;138(4):423–429. (In Russ.).
9. Start R. M., Joeng K., Berg W. D. Potential Safety Cost Effectiveness of Treating Ruttet Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1998;(1629):208–213. (In Russ.).
10. Ihs A., Velin H. and Wiklund M. The Influence of Road Condition on Traffic Safety: Data from 1992–1998. *VTI meddelande 909*. Linköping, Sweden: Swedish National Road Administration; 2002. 47 p.
11. Christensen P., Ragnoy A. The condition of the road surface and safety. The importance of rut depth, roughness (IRI) and changes in cross-slope for road safety. TOI Report 840/2006. Oslo: Transport Economics Institute; 2006. 56 p.
12. Glennon J. C. Roadway Hydroplaning – Measuring Pavement Wheel Rut Depths to Determine Maximum Water Depths. *Crash Forensics Motor – Vehicle Accident Investigation and Reconstruction Services*. Jan. 2015 URL: <https://www.crashforensics.com/papers.cfm?PaperID=55>.
13. Glennon J. C. Roadway Hydroplaning – A Framework to Determine Critical Pavement Wheel Rut Depths. *Crash Forensics Motor – Vehicle Accident Investigation and Reconstruction Services*. Jan. 2015 URL: <https://www.crashforensics.com/papers.cfm?PaperID=56>.
14. Zheng B. [et al.]. Adhesion Characteristics of Tire – Asphalt Pavement Interface Based on a Proposed Tire Hydroplaning Model. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018;2018(4):1–12.
15. Ji T., Huang X., Liu Q. Part hydroplaning effect on pavement friction coefficient. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2003;3(4):9–12.
16. Horne W. and Dreher R. Phenomena of pneumatic tire hydroplaning: Technical note NASA TN D – 2056. Washington, DC: Langley Research Center: *National Aeronautics and Space Administration*; 1963. November. 55 p.
17. Horne W. B., Yager T. J., Ivey D. L. Recent studies to investigate the effects of tire footprint aspect ratio on dynamic hydroplaning speeds. *American society for testing and material. ASTM STP 929*. 1986. P. 26–46.
18. Gengenbach W. Experimental investigation of tires on wet pavements. *Automotive technology magazine*. 1968;(70):310–316.
19. Gallaway B. M. [et al.]; Federal Highway Administration. Pavement and Geometric Criteria for Minimizing Hydroplaning. *Report No. FHWA-RD-79-31*. Springfield, Virginia; 1979. 308 p.
20. Cerezo V. [et al.]. Hydroplaning speed and infrastructure characteristics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. J. Journal of Engineering Tribology*. SAGE Publications. 2010;224(9):891–898.
21. Pasindu H. R., Fwa T. F., Ong G. P. Evaluation of Aircraft Landing Hydroplaning Risk. *II International Conference on Transport Infrastructures*. At Sao Paulo, Brazil; 2010:469–478.
22. Ong G. P., Fwa T. F. Wet – Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance. *Journal of transportation engineering*. 2008;134(5):182–190.

23. Hussan S., Kamal M. A., Hafeez I. Modeling and Correlating Rut Depth Observed in Different Asphalt Mixture Performance Tests. *Mehrhan University Research Journal of Engineering & Technology*. 2018;37(3):553–570.
24. Hu S., Zhou F., Scullion T. Development, calibration and validation of a new M – E rutting model for HMA overlay design and analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011;23(2):89–99.
25. Li Q., Xiao D. X., Wang K. C. P. [et al.]. Mechanistic – empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's – eye view. *Journal of Modern Transportation*. 2011;19(2):114–133.
26. Guo X., Timm D. H. Automating Mechanistic – Empirical Pavement Design Calibration Studies. *The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability*. Springer and Cham; 2016:309–319.
27. Yanov D. V., Zelepuhin S. A. Road pavement design using the finite element method. *Journal of Physics Conference Series*. 2019;(1214):1–8.
28. Gercog V. N., Dolgikh G. V., Kuzin N. V. Calculation criteria for road pavement evenness. Pt. 1. Substantiating the flatness standards of asphalt pavement. *Magazine of Civil Engineering*. 2015;5(57):45–57.
29. Aleksandrov A. S., Dolgikh G. V., Kuzin N. V. Method of Calculating the Limiting Depth of Ruts on the Pavement of Automobile Roads. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;(753):052019.
30. Shahin M. Y. Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots. N. Y.: Chapman & Hall; 1994. 574 p.
31. Walker D., Entine L., Kummer S. Pavement Surface Evaluation and Rating (PASER), Asphalt Roads. Madison: University of Wisconsin–Madison; 2002. 29 p.
32. Washington State Department of Transportation (WsDOT). Pavement Surface Condition Field Rating Manual for Asphalt Pavements. Olympia, Washington; 1999. 72 p.
33. Ohio State Department of Transportation (OhDOT). Pavement Condition Rating System. Columbus, OH; 2006. 30 p.
34. Ministry of Transportation and Infrastructure, British Columbia (MTI BC). Pavement Surface Condition Rating Manual. 3rd ed. British Columbia; 2009. 86 p.
35. Grabec I., Švegl F. Forecasting of traffic jams on high ways caused by adverse weather. *16th SIRWEC Conference*. Helsinki; 23–25 May. 2012:1–8. ID: 27.
36. Sven van der Sluis. PhD Dissertation. Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch – Westfälischen Technischen Hochschule. Aachen; 2002. 226 p.

Информация об авторах

А. С. Александров – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета.

Т. В. Семенова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета.

Information about the authors

A. S. Alexandrov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Construction and Operation of Roads Department, Siberian State Automobile and Highway University.

T. V. Semenova – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Construction and Operation of Roads Department, Siberian State Automobile and Highway University.

Статья поступила в редакцию 08.11.2021; одобрена после рецензирования 15.11.2021; принята к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 08.11.2021; approved after reviewing 15.11.2021; accepted for publication 17.01.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 634.212.45:691.87

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_117

Численное моделирование взаимодействия стеклопластикового анкера с бетоном

Юрий Владимирович Астахов¹, Наталья Сергеевна Пичкурова^{2✉}

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

¹ yur.astahoff@yandex.ru

² nataliapich@mail.ru✉

Аннотация. Армированный бетон является основным конструкционным материалом в современном строительстве. Он отличается рядом свойств и особенностей, которые необходимо учитывать для надежного и качественного проектирования разнообразных конструкций и сооружений. В настоящее время на строительном рынке, помимо традиционной стальной арматуры, распространение получила неметаллическая (композитная) арматура. Низкий модуль упругости, высокая разрывная прочность, отсутствие коррозии (в отличие от стальной арматуры), низкая теплопроводность, исключающая мостики холода в каменных конструкциях, определяют эффективность применения неметаллической арматуры в каменных и бетонных конструкциях. Следует отметить, что неметаллическая арматура становится альтернативой стальной из-за значительного роста цен на металл. Поэтому проектирование стеклопластиковой арматуры в виде коротких стержней с усилением на торцах в качестве гибких связей, установленных между слоями сборных стеновых панелей, является актуальным.

В статье представлены данные экспериментальных исследований податливости сосредоточенного анкера, выполненного из стеклопластиковой арматуры, при его выдергивании из образцов малого размера, изготовленных из тяжелого и легкого бетона. На основе опытных данных приведен численный расчет трещиностойкости стеклопластикового анкера, работающего на выдергивание. Для этого из бетонной среды у контакта сосредоточенного анкера выделена расчетная область в виде цилиндра. На внутренней поверхности, копирующей профиль сосредоточенного стеклопластикового анкера, заданы условия, необходимые для учета совместной работы анкера и бетонной плитки. Расчет, выполненный методом конечных элементов, позволяет моделировать развитие трещин, начинающихся у выступов анкера, и определить напряженно-деформированное состояние бетона плитки в условиях трещинообразования.

Результаты исследования предполагается использовать при проектировании трехслойных стеновых панелей с гибкими стеклопластиковыми связями.

Ключевые слова: стеклопластиковая арматура, бетон, численное моделирование, анкер, трещинообразование

Для цитирования: Астахов Ю. В., Пичкурова Н. С. Численное моделирование взаимодействия стеклопластикового анкера с бетоном // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 117–123. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_117.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Numerical simulation of the interaction of a fiberglass anchor with concrete

Yury V. Astakhov¹, Natalia S. Pichkurova^{2✉}

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

¹ yur.astahoff@yandex.ru

² nataliapich@mail.ru✉

Abstract. Reinforced concrete is the main structural material in modern construction. It is distinguished by a number of properties and features that must be taken into account for the reliable and high-quality design of various structures and structures. Currently, in the construction market, in addition to traditional steel reinforcement, non-metallic (composite) reinforcement has become widespread. Low modulus of elasticity, high tensile strength, no

corrosion (unlike steel reinforcement), low thermal conductivity, which excludes cold bridges in stone structures, determine the effectiveness of the use of non-metallic reinforcement in stone and concrete structures. It should be noted that non-metallic reinforcement is becoming an alternative to steel due to a significant increase in metal prices. Therefore, the design of fiberglass reinforcement in the form of short rods with reinforcement at the ends as flexible links installed between the layers of prefabricated wall panels is relevant.

The article presents data from experimental studies of the compliance of a lumped anchor made of fiberglass reinforcement when it is pulled out of small-sized samples made of heavy and lightweight concrete. On the basis of experimental data, a numerical calculation of the crack resistance of a fiberglass anchor working for pulling out is given. To do this, a computational area in the form of a cylinder is selected from the concrete medium at the contact of the concentrated anchor. On the inner surface, which copies the profile of a concentrated fiberglass anchor, the conditions necessary to take into account the joint operation of the anchor and the concrete tile are set. The calculation performed by the finite element method makes it possible to simulate the development of cracks starting at the anchor protrusions and to determine the stress-strain state of the tile concrete under cracking conditions.

The results of the study are supposed to be used in the design of three-layer wall panels with flexible fiberglass ties.

Keywords: fiberglass reinforcement, concrete, numerical simulation, anchor, cracking

For citation: Astakhov Yu. V., Pichkurova N. S. Numerical simulation of the interaction of a fiberglass anchor with concrete. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):117–123. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_117.

Стеклопластиковая арматура появилась на строительном рынке относительно недавно и в настоящее время является эффективным материалом для армирования строительных конструкций. Активное использование ее в качестве арматуры обусловлено необходимостью применения армированного бетона для объектов, эксплуатируемых в агрессивных средах, где применение обычной стальной арматуры связано с трудностями обеспечения стойкости к коррозии. Более того, для ряда сооружений необходимо предусмотреть материалы с антимагнитными и диэлектрическими свойствами [1].

Сама идея применения неметаллической арматуры в строительстве не нова – авиакосмическая промышленность использовала стеклопластик для проектирования камер высокого давления в самолетах [2], за рубежом есть примеры построенных мостов с армированием композитной арматурой [3]. Однако широкое применение стеклопластиковой арматуры сдерживалось на тот момент высокой ее стоимостью по сравнению с металлическими стержнями [4].

В настоящее время ситуация кардинально изменилась – рост цен на металл дал новый виток развитию и применению в строительстве стеклопластиковой композитной арматуры (СПА).

Ниже приведены основные достоинства СПА согласно ACI 440.1R-06:

– устойчивость к воздействию агрессивных сред (СПА не коррозирует и обладает повышенной химической стойкостью);

– высокая устойчивость на разрыв (в 2,5...3 раза выше по сравнению со стальной арматурой);

– низкий вес (в 5 раз легче металлических аналогов);

– низкая теплопроводность (способствует устранению мостика холода в бетонных конструкциях);

– практически одинаковый коэффициент температурного расширения с бетоном (при изменениях температуры не нарушается совместная работа бетона и арматуры).

Однако у СПА, наряду с достоинствами, есть ряд недостатков:

– низкий модуль упругости (требует дополнительных расчетов в плитах перекрытий и балках);

– потенциально низкая огнестойкость в зависимости от матрицы и покрытия бетона;

– невозможность проведения сварочных работ (решением данной проблемы является установка на заводе по концам арматурных стержней стальных трубок);

– невозможность размещения стержней согласно эпюрам моментов (невозможно придать изгиб).

Однако, несмотря на недостатки, область применения СПА практически не ограничена (рис. 1).

В РФ в последнее время широкое применение СПА получила в стеновых панелях зданий и сооружений. Как правило, проектируют короткие стержни длиной 400...600 мм, диаметром 5...8 мм, с усилием на концах свя-

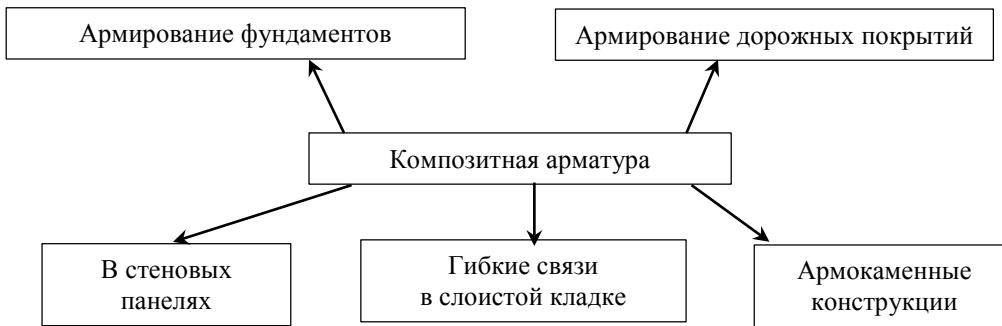


Рис. 1. Область применения композитной арматуры согласно [4]

зей в виде конусов, так называемых сосредоточенных анкеров. В связи с этим актуальной становится задача оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) стеновых бетонных панелей и сцепления композитной арматуры с бетоном. Ограниченнность сведений о поведении СПА в бетоне не позволяет говорить о надежной эксплуатации таких конструкций и подтверждает необходимость теоретических и практических исследований заделки анкера в бетоне.

Сцепление – это связь по поверхности контакта между арматурой и бетоном, в силу чего бетон сопротивляется ее проскальзыванию под действием нагрузки. Для такого материала, как железобетон, сцепление является важной характеристикой: от качества сцепления зависит возникновение трещин и ширина их раскрытия. При этом под термином «железобетон» понимают единый композиционный материал до того момента, пока существует сцепление по контактной поверхности между арматурой и бетоном [5]. При нарушении сцепления элемент перестает быть единым.

Поскольку на протяжении длительного времени не было единой теории сцепления, П. П. Назаренко предложил «обобщенный закон трения стальной арматуры с бетоном» [6]. При совершенствовании различных типов арматуры (в том числе СПА) проблема сцепления имеет фундаментальное значение.

Во взаимодействии анкеров с бетоном основное значение имеет смятие бетона, при котором могут возникать существенные распорные усилия. Распорность растет вплоть до образования главных трещин, или трещин раскалывания [7].

Под главной трещиной следует понимать коническую трещину, характерную для круг-

лого анкера и возникающую на участке контакта анкера с бетоном под нагрузкой N_{crc} . С увеличением нагрузки главная трещина растет и достигает бетонной поверхности, что в свою очередь вызывает выкалывание конуса бетона, поверхность которого «обозначена» трещиной раскалывания.

На основании экспериментальных исследований М. М. Холмянский выявил основные этапы работы сосредоточенных анкеров в зоне заделки [7]. К ним относятся: упругая стадия, развитие пластических деформаций до образования главных трещин, образование главных трещин, дальнейшее развитие пластических деформаций и нарушение заделки. Напряжения смятия под выступами анкера достигали в некоторых случаях двадцатикратной кубиковой прочности. Так возникла «гипотеза клина» – передача усилий от анкера на бетон за счет клина.

Для определения траектории сжимающих усилий, нагрузки, при которой образуются главные трещины, а также податливости заделки анкеров и поперечного давления используют теорию «условного клина».

С возникновением главных трещин в бетоне наблюдается нелинейное деформирование анкеров, которое связано с разрушающими процессами в бетоне.

В СГУПС на основании экспериментальных исследований [8] серий образцов установлена податливость заделки анкера в бетоне (экспериментальная зависимость «нагрузка – смещение анкера»). Податливость заделки была определена для двух серий образцов – для плиток размерами $150 \times 150 \times 60$ мм. Образцы изготовлены из тяжелого и легкого бетона класса по прочности на сжатие В12,5 с сосредоточенными анкерами, заделанными на глубину $h = 40$ мм [8]. Была определена нагрузка, при которой появि-

лись главные трещины в заделке, N_{crc} и несущая способность анкера N_u (нагрузка при разрушении заделки).

На основании проведенных экспериментальных исследований было установлено, что нагрузка, при которой возникают главные трещины для тяжелого и легкого бетона при осевом усилии выдергивания, составляет $N_{crc} = 1,6 \dots 2,0$ кН.

Выкалывание конуса бетона при выдергивании стеклопластикового анкера из экспериментального образца происходило по криволинейной поверхности $ABCD$ (рис. 2, *a*) [8].

Установлено, что коническая главная трещина в экспериментальных образцах появилась в основании конуса усиления [9] в точках *B* и *C* раньше образования радиальных трещин по поверхности плитки (см. рис. 2, *б*). Однако конкретного момента, при котором образовались радиальные трещины, определить не удалось.

Несущая способность заделки для образцов из тяжелого и легкого бетона \bar{N}_u соста-

вила 5,13 и 4,34 кН соответственно [8]. Экспериментально установленные несущая способность заделки (прочностные характеристики) и нагрузка образования главных трещин являются первичными данными для оценки НДС методом конечных элементов на участке заделки стеклопластиковых стержней, работающих на выкалывание [10–12].

Коническая форма анкера и круглое отверстие в опорной стальной пластине для его заделки (из-за чего реактивные усилия, передаваемые на свободную поверхность образца, симметричны относительно оси анкера) объясняют выбор осесимметричной расчетной модели. Расчетная область разбита на 1 405 колышевых элементов, имеющих треугольный профиль сечения, 762 узла (рис. 3).

На свободной грани плитки заданы шарнирно-подвижные связи, которые допускают радиальные перемещения и препятствуют продольным перемещениям (в направлении оси *Z*), что позволяет моделировать опирание

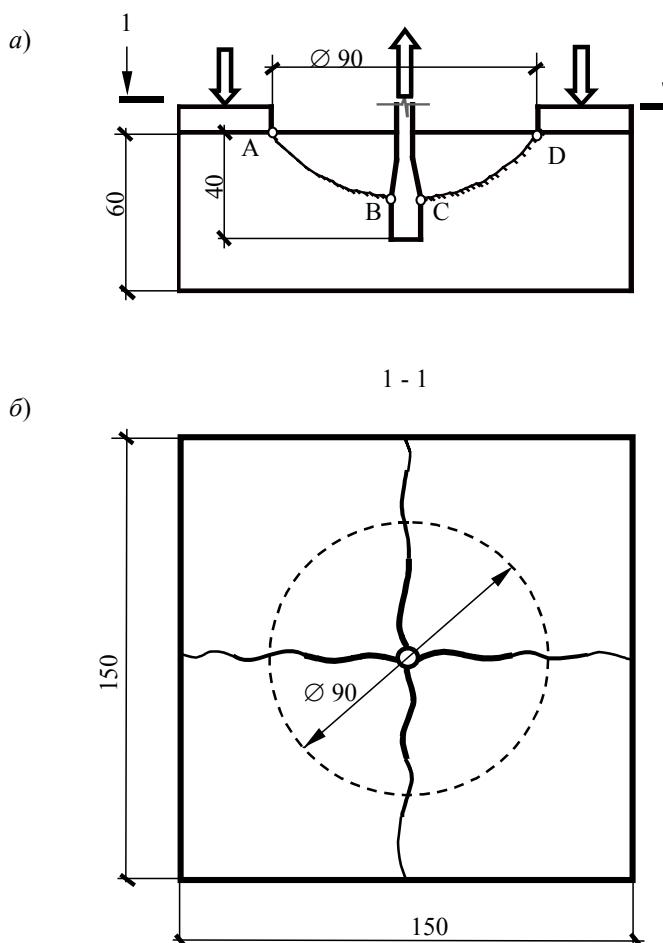


Рис. 2. Выкалывание бетона при выдергивании анкера из образца по поверхности конуса $ABCD$ (*а*), очертание радиальных трещин перед выкалыванием бетона (*б*)

исследуемого образца на шлифованную поверхность стальной опорной пластины.

Расчет проведен для момента образования главных трещин (см. рис. 3) на опорном торце образца при сдвигающем усилии в 1,6 кН и классе бетона по прочности на сжатие В12,5 для условно упругой работы заделки [8].

Контактная поверхность анкера разделена на три характерных участка – *AB*, *BC* и *CD*. На участке *AB* сцепление нарушено по причине гладкой поверхности стеклопластикового стержня. Контактная нагрузка на этом участке отсутствует. На конусном участке *BC* (участок усиления) принят полный контакт и дана равномерно распределенная поверхностная сдвигающая нагрузка в 2,6 МПа (рис. 4).

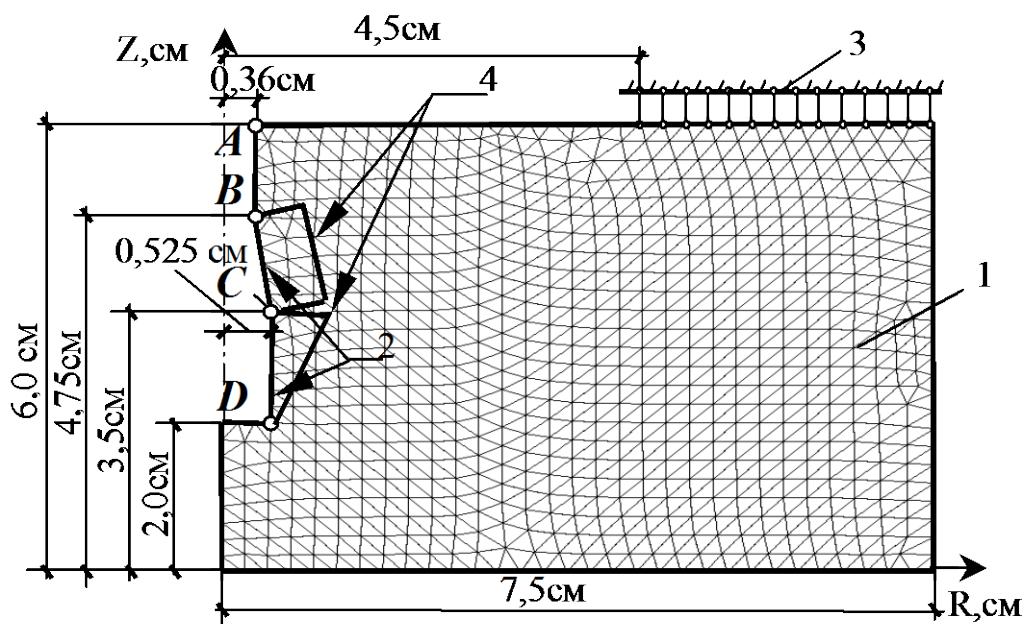
При сдвиге участок *CD* подступает к вышегдающему конусному участку бетона *BC*, заклинивается и включается в деформирование неполностью. Таким образом, на цилиндрическом участке *CD*, поверхностная сдвигающая нагрузка принята уменьшающейся от 2,6 МПа в точке *C* до нуля в точке *D* (см. рис. 2).

Суммарная сдвигающая нагрузка при этом равна 1,6 кН, что соответствует условному возникновению главных трещин в точке *C* на основании экспериментальных исследований.

По результатам расчета максимальные главные растягивающие напряжения $\sigma_{mt} = 2,35$ МПа образуются в точке *C* (см. рис. 3, *a*), а максимальные тангенциальные напряжения $\sigma_\theta = 1,43$ МПа – в точке *A* (см. рис. 3, *b*). Это относится к точкам, в которых возникают и развиваются главная и радиальные трещины по результатам эксперимента (см. рис. 2), а также объясняет отставание по времени возникновения радиальных трещин от главной.

Выводы

На основе проведенных исследований можно утверждать, что численный способ оценки НДС заделки стеклопластиковой арматуры в виде коротких стержней в бетонной плитке позволяет определить трещиностойкость заделки и смоделировать оптимальную форму сосредоточенных анкеров в многослойных стеновых конструкциях.



*Рис. 3. Расчетная схема цилиндрического образца-плитки:
1 – бетонный образец; 2 – контактная поверхность сосредоточенного анкера; 3 – шарнирно-подвижные связи, моделирующие опирание плитки на стальную пластину; 4 – эпюры вертикальной поверхности нагрузки, развивающейся по контактной поверхности*

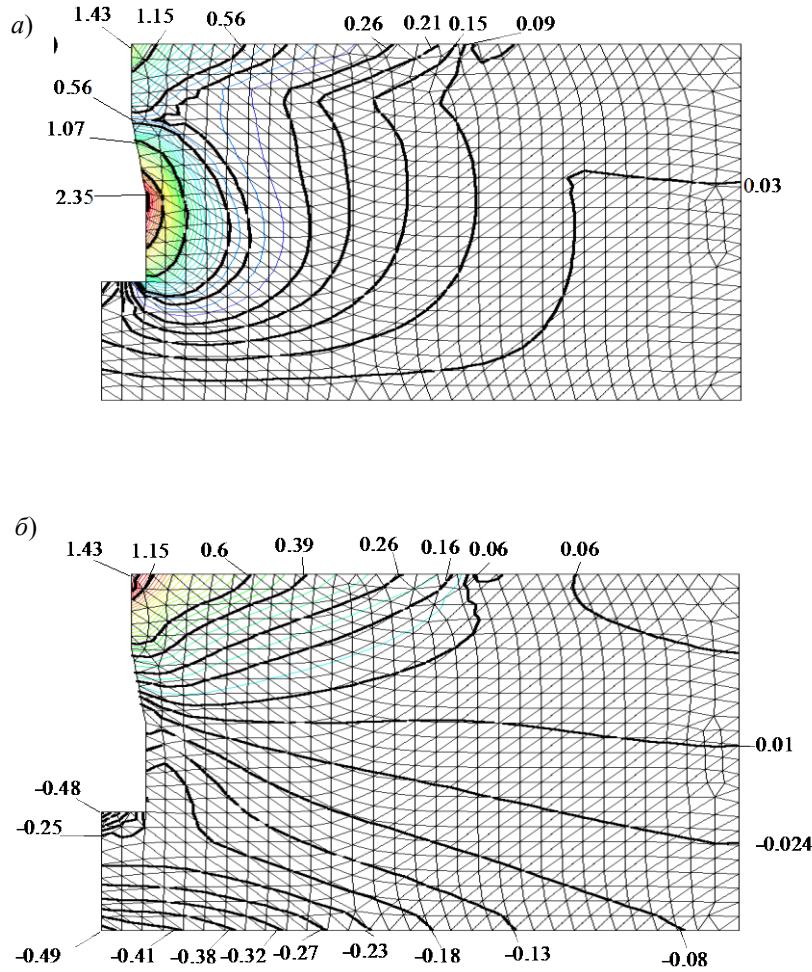


Рис. 4. Изолинии напряжений при выдергивании стеклопластикового анкера усилием 1,6 кН:
а – главных растягивающих напряжений σ_{mt} , МПа; б – тангенциальных напряжений σ_θ , МПа

Список источников

1. Максимов С. П., Башкова Ю. Б., Вшивков Е. П. Экспериментальные исследования работы стеклопластиковой арматуры при армировании бетонных конструкций // Universum: технические науки. 2015. № 6 (18). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekperimentalnye-issledovaniya-raboty-stekloplastikovoy-armatury-pri-armirovaniyu-betonnykh-konstruktsiy> (дата обращения: 29.01.2022).
2. Хозин В. Г. Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 1. С. 214–220.
3. Теплова К. С., Киски С. С., Стрижкова Я. Н. Стеклопластиковая арматура для армирования бетонных конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 9 (24). С. 49–70.
4. Устинов О. В., Сулейманов Р. Д., Гурьева В. А. Проблемы применения композитной арматуры в строительстве // Открытая электронная библиотека научно-образовательных ресурсов Оренбуржья. URL: <http://elib.osu.ru/handle/123456789/2559> (дата обращения: 29.01.2022).
5. Николюкин А. Н. Моделирование совместной работы арматуры с бетоном на примере композитной арматуры : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Ростов н/Д, 2021. 190 с.
6. Назаренко П. П. Контактное взаимодействие арматуры в бетоне в элементах железобетонных конструкций : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. М., 1998. 34 с.
7. Холмянский М. М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность. М. : Стройиздат, 1997. 576 с.
8. Астахов Ю. В. Экспериментально-расчетная оценка взаимодействия стальной канатной и стеклопластиковой арматуры с бетоном : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Новосибирск, 2002. 120 с.
9. Мулин Н. М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. М. : Стройиздат, 1974. 232 с.
10. Карпенко Н. И., Судаков Г. Н., Лейтс Е. С. Моделирование механического взаимодействия арматурного стержня с бетоном, учитывающее напряженно-деформированное состояние контактной зоны //

Поведение бетонов и элементов железобетонных конструкций при воздействии различной длительности. М., 1980. С. 133–156.

11. Карпенко Н. И., Судаков Г. Н. Сцепление арматуры с бетоном с учетом развития контактных трещин // Бетон и железобетон. 1984. № 12. С. 42–44.
12. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 416 с.

References

1. Maksimov S. P., Bashkova Yu. B., Vshivkov E. P. Experimental studies of the work of glass-plastic reinforcement when reinforcing concrete structures. *Universum: technical sciences*. 2015;(18). (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-raboty-stekloplastikovoy-armatury-pri-armirovaniyu-betonnyh-konstruktsiy>.
2. Khozin V. G. Adhesion of polymer composite reinforcement with cement concrete. *Izvestiya of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013;(1):214–220. (In Russ.).
3. Teplova K. S., Kiski S. S., Strizhikova Ya. N. Fiberglass reinforcement for reinforcing concrete structures. *Construction of unique buildings and structures*. 2014;(24):49–70. (In Russ.).
4. Ustinov O. V., Suleimanov R. D., Guryeva V. A. Problems of using composite reinforcement in construction. *Open Electronic Library of Scientific and Educational Resources of the Orenburg Region*. (In Russ.). URL: <http://elib.osu.ru/handle/123456789/2559>.
5. Nikolyukin A. N. Simulation of the joint work of reinforcement with concrete on the example of composite reinforcement: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.23.01. Rostov-on-Don; 2021. 190 p. (In Russ.).
6. Nazarenko P. P. Contact interaction of reinforcement in concrete in elements of reinforced concrete structures: author. dis. ... Dr. tech. Sciences: 05.23.01. M.; 1998. 34 p. (In Russ.).
7. Kholmyansky M. M. Concrete and reinforced concrete. Deformability and strength. M.: Stroyizdat; 1997. 576 p. (In Russ.).
8. Astakhov Yu. V. Experimental and computational assessment of the interaction of steel rope and glass-plastic reinforcement with concrete: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.23.01. Novosibirsk; 2002. 120 p. (In Russ.).
9. Mulin N. M. Bar reinforcement of reinforced concrete structures. M.: Stroyizdat; 1974. 232 p. (In Russ.).
10. Karpenko N. I., Sudakov G. N., Leits E. S. Modeling of the mechanical interaction of a reinforcing bar with concrete, taking into account the stress-strain state of the contact zone. *Behaviour of Concrete and Elements of Reinforced Concrete Structures under Exposure of Different Duration*. M.; 1980:133–156. (In Russ.).
11. Karpenko N. I., Sudakov G. N. Adhesion of reinforcement with concrete taking into account the development of contact cracks. *Concrete and reinforced concrete*. 1984;(12):42–44. (In Russ.).
12. Karpenko N. I. General models of reinforced concrete mechanics. M.: Stroyizdat; 1996. 416 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю. В. Астахов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Здания, строительные конструкции и материалы» Сибирского государственного университета путей сообщения.

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

Information about the authors

Yu. V. Astakhov – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Buildings, Building Structures and Materials Department, Siberian Transport University.

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

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 02.02.2022; принята к публикации 07.02.2022.

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 02.02.2022; accepted for publication 07.02.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 628.179.3

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_124

Характер проявления аварийных утечек воды из подземных трубопроводов

Константин Леонтьевич Кунц¹, Игорь Леонидович Ким²✉

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

¹pgs@stu.ru

²kim120767@yandex.ru✉

Аннотация. Разгерметизация подземных трубопроводов, транспортирующих воду, стоки, нефтепродукты, газ, угольную пульпу и другие вещества, чревата потерями продукта, подтоплением территорий, экологическим ущербом, ухудшением санитарно-эпидемиологической обстановки, формированием взрыво- и пожароопасных ситуаций. Быстрое обнаружение, оценка размеров и устранение утечек продукта является актуальной задачей. В статье эта задача рассматривается применимо к водонесущим коммуникациям.

На основе предложенной физической картины истечения воды из поврежденной стенки трубопровода и последующего ее движения в толще окружающего грунта получена математическая модель процесса. В зависимости от давления воды в поврежденном трубопроводе, размера аварийного отверстия в стенке трубопровода, глубины его заложения и водопроницаемости грунта установлены четыре варианта возможного характера проявления утечки из подземного трубопровода: со сосредоточенным и рассредоточенным выходом на поверхность земли, с распределением воды в толще грунта, с дренированием соседними подземными коммуникациями.

Ключевые слова: трубопровод, разгерметизация, характер проявления утечки

Для цитирования: Кунц К. Л., Ким И. Л. Характер проявления аварийных утечек воды из подземных трубопроводов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 124–129. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_124.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

The nature of the manifestation of emergency water leaks from underground pipelines

Konstantin L. Kunts¹, Igor L. Kim²✉

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

¹pgs@stu.ru

²kim120767@yandex.ru✉

Abstract. Depressurization of underground pipelines transporting water, wastewater, oil products, gas, coal pulp and other substances is fraught with product losses, flooding of territories, environmental damage, deterioration of the sanitary and epidemiological situation, the formation of explosion and fire hazardous situations. Rapid detection, sizing and elimination of product leaks is an urgent task. In the article, this problem is considered as applied to water-bearing communications.

Based on the proposed physical picture of the outflow of water from the damaged pipeline wall and its subsequent movement in the thickness of the surrounding soil, a mathematical model of the process was obtained. Depending on the water pressure in the damaged pipeline, the size of the emergency hole in the pipeline wall, the depth of its laying and the water permeability of the soil, four options for the possible nature of the manifestation of a leak from an underground pipeline are established: with a concentrated and dispersed exit to the earth's surface, with water resorption in the drainage by adjacent underground utilities.

Keywords: pipeline, depressurization, the nature of the manifestation of leakage

For citation: Kunts K. L., Kim I. L. The nature of the manifestation of emergency water leaks from underground pipelines. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):124–129. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_124.

По подземным трубопроводам транспортируют воду, стоки, нефть и нефтепродукты, угольную пульпу и другие вещества [1]. Разгерметизация трубопроводов чревата потерями продукта [2], подтоплением территории [3], экологическим ущербом [4], формированием взрыво- и пожароопасных ситуаций [5], ухудшением санитарно-эпидемиологической обстановки [6]. В связи с этим актуальны мероприятия по предотвращению разгерметизации трубопроводов, быстрому обнаружению и ликвидации аварийных утечек продукта [7], локализации ущерба, восстановлению природного равновесия и улучшению санитарного состояния территории в районе аварии на трубопроводе.

При нарушении целостности трубопроводов, транспортирующих углеводороды, факт утечки обнаруживается достаточно быстро, что позволяет в короткие сроки локализовать аварийную ситуацию и предотвратить тяжелые последствия.

Несколько другая картина наблюдается при разгерметизации водонесущих трубопроводов, особенно если это приводит к относительно слабым утечкам, не обнаруживаемым весьма длительное время, иногда до нескольких месяцев. При этом грунты пропитываются водой в обширном подземном пространстве, вызывая просадки фундаментов, затопление подвалов и других подземных помещений, что приводит не только к экономическим издержкам, но и к опасности разрушения зданий и сооружений. Задачей настоящей работы является выявление и количественная оценка факторов, обусловливающих характер проявления утечки из подземного водонесущего трубопровода при нарушении его целостности.

При разгерметизации стенки подземного трубопровода вода поступает в окружающий грунт, заполняя его поры и устремляясь во все стороны обратно пропорционально сопротивлению среды.

В месте прорыва воды из подземного трубопровода (рис. 1) через отверстие условным диаметром d в окружающий однородный грунт, характеризующийся коэффициентом фильтрации k , вода распределяется в толще грунта, образуя сферу радиусом r с расходом Q . Тогда скорость фильтрации на расстоянии r от эпицентра составит

$$v = \frac{Q}{4\pi r^2}. \quad (1)$$

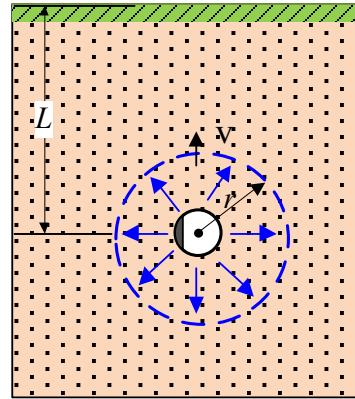


Рис. 1. Расчетная схема

При ламинарной фильтрации выполняется закон Дарси

$$v = ki, \quad (2)$$

где i – гидравлический уклон.

Средний гидравлический уклон на элементарном отрезке пути dr при перепаде напора dH составит

$$i_{cp} = -\frac{dH}{dr}. \quad (3)$$

Если $dr \rightarrow 0$, то $i_{cp} \rightarrow i$, в таком случае

$$-\frac{dH}{dr} = \frac{Q}{4\pi kr^2}. \quad (4)$$

Преобразуем (4) к виду

$$dH = -\frac{Q}{4\pi k} \frac{dr}{r^2}. \quad (5)$$

Проинтегрируем формулу (5) в границах $H(H_h; 0)$ и $r(r_0; L)$, где H_h – начальный напор в эпицентре утечки в сечении r_0 , считая от оси трубы; L – расстояние от аварийного отверстия до поверхности земли или ближайшего подземного дренажа.

$$H_h = -\frac{Q}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{L} \right). \quad (6)$$

Величина H_h представляет собой напор в сжатом сечении струи, вытекающей из аварийного отверстия в стенке трубопровода, и может быть вычислена путем преобразования известной формулы расхода:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g(H_t - H_h)}, \quad (7)$$

откуда

$$H_h = H_t - \frac{Q^2}{\mu^2 \omega^2 2g}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент расхода; ω – площадь аварийного отверстия; g – ускорение свободного падения; H_t – полный напор воды в трубопроводе в сечении с аварийным отверстием.

Приравнивая правые части формул (6) и (8), получим квадратное уравнение

$$\frac{1}{\mu^2 \omega^2 2g} Q^2 + \frac{1}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{L} \right) Q - H_t = 0. \quad (9)$$

Решением уравнения (9) будет выражение

$$Q = \mu^2 \omega^2 g \left[\sqrt{\frac{1}{16\pi^2 k^2} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{L} \right)^2 + \frac{4H_t}{\mu^2 \omega^2 2g}} - \frac{1}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{L} \right) \right]. \quad (10)$$

Второй отрицательный корень отбрасывается, так как расход Q всегда больше нуля. Тогда напор в сжатом сечении струи H_h будет равен

$$H_h = H_t - \frac{\mu^2 \omega^2 g}{2} \left[\sqrt{\frac{1}{16\pi^2 k^2} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{L} \right)^2 + \frac{2H_t}{\mu^2 \omega^2 g}} - \frac{1}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{L} \right) \right]^2. \quad (11)$$

Сравним величину H_h с глубиной заложения трубопровода L для того, чтобы определить характер проявления утечки из аварийного трубопровода.

Если $H_h \geq (i_{kp} + 1)L$, то вода будет интенсивно вытекать на поверхность земли (рис. 2) или в промежуточный дренаж (рис. 3) с псевдоожижением грунта и вымыванием его частиц. Здесь i_{kp} – критический гидравлический уклон, при котором начинается взвешивание в восходящем фильтрационном потоке частиц грунта.

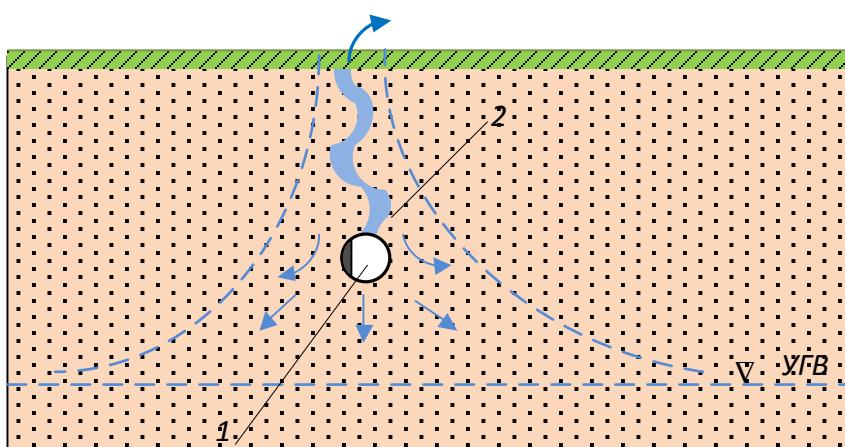


Рис. 2. Прорыв на поверхность земли:
1 – аварийный трубопровод; 2 – канал в толще грунта

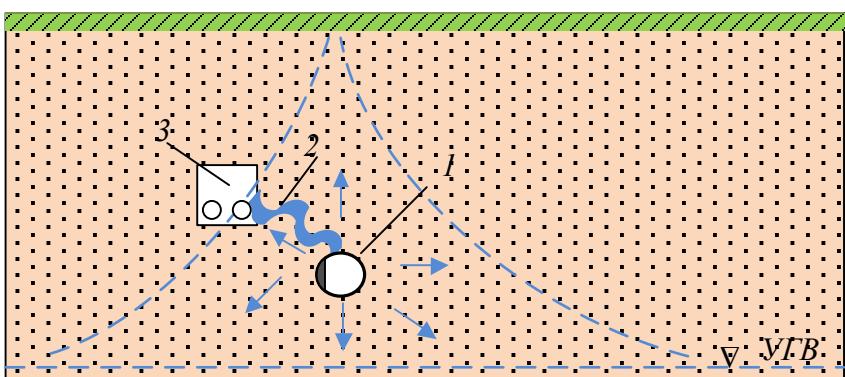


Рис. 3. Дренирование соседними подземными коммуникациями:
1 – аварийный трубопровод; 2 – канал в толще грунта; 3 – канал теплотрассы

Если $L \leq H_h < (i_{kp} + 1)L$, то будет наблюдаться просачивание воды на поверхность земли без взвешивания и вымывания частиц грунта (рис. 4).

Если $H_h < L$, то вода вообще не появится на поверхности земли, а будет распределяться в толще грунта (рис. 5).

В работе [8] рассмотрены вопросы гидравлики зернистых материалов, в том числе получено уравнение равновесия взвешенного слоя зерен фильтрующего материала, которое можно преобразовать к виду

$$i_{kp} = \frac{\rho_r - \rho}{\rho}(1 - m), \quad (12)$$

где ρ_r – плотность частиц грунта; ρ – плотность жидкости (воды); m – пористость грунта.

Используя приведенные выше формулы, нами было получено выражение для определения критического (предельного) диаметра аварийного отверстия, т. е. минимального экви-

валентного диаметра отверстия, при котором вода появится на поверхности земли:

$$d_{kp} = \sqrt{\frac{16L(1 - i_{kp})k}{\mu\sqrt{2g(H_t - L(1 - i_{kp}))}\left(\frac{2}{d} - \frac{1}{L}\right)}}. \quad (13)$$

На рис. 6 в графическом виде представлены результаты расчетов по вышеизложенной методике, целью которых было определение предельных диаметров аварийных отверстий. Если аварийные отверстия имеют меньшие размеры, то будут иметь место скрытые утечки, в противном случае утечки будут явные, с выходом на поверхность земли [9].

Из анализа полученных данных следует, что по мере увеличения водопроницаемости грунта вероятность выхода воды на поверхность уменьшается. В крупнозернистых песках даже в случае образования больших отверстий (до 13 мм) в трубопроводах с высоким давлением (до 6 атм) будет иметь место скры-

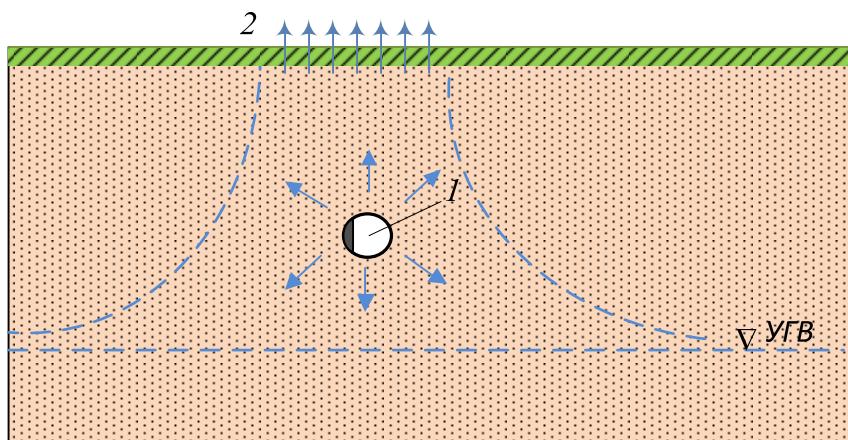


Рис. 4. Рассредоточенный выход на поверхность:
I – аварийный трубопровод; 2 – «родники»

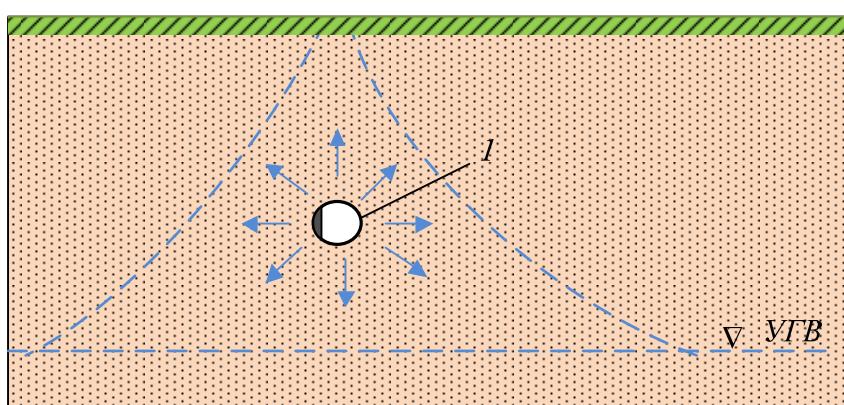


Рис. 5. Распределение в толще грунта:
I – аварийный трубопровод

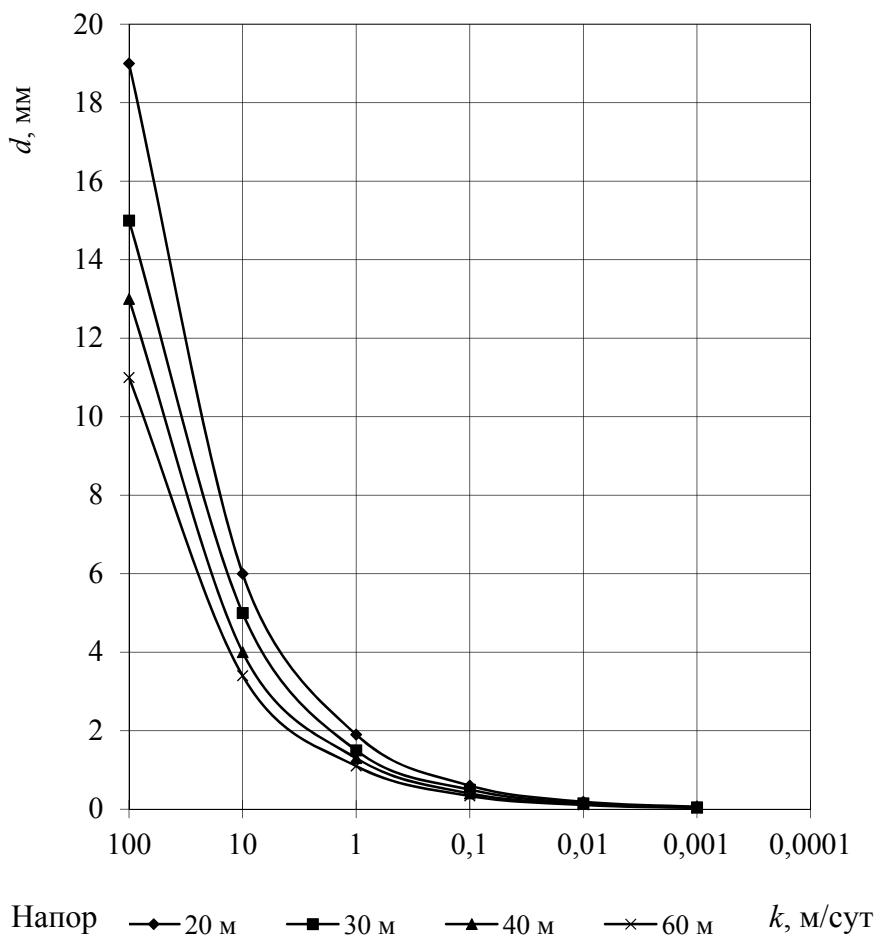


Рис. 6. Предельные диаметры аварийного отверстия для различных грунтов

тая утечка, которая может стать причиной значительного подтопления обширной территории и больших потерь воды [10]. Подземные водонесущие коммуникации на таких территориях должны находиться под особым контролем эксплуатационных служб. При наличии мелкозернистых, слабоводопроницаемых

грунтов (супесь, суглинки, глины) практически все утечки через свищи диаметром более $0,5$ мм имеют выход на поверхность земли, т. е. являются явными. Таким образом, в подземных трубопроводных сетях на указанных территориях не может быть существенных скрытых потерь воды.

Список источников

1. Саруев А. Л., Харламов С. Н., Павлов С. А. Актуальные вопросы трубопроводного транспорта углеводородов. М. : Горная книга, 2013. 120 с.
2. Кузьмин Э. Л. Глобальная энергетическая безопасность и трубопроводный транспорт. М. : Научная книга, 2009. 253 с.
3. Прусенко Б. Е. Анализ аварий и несчастных случаев на трубопроводном транспорте России. М. : ТехноНефтегаз, 2003. 353 с.
4. СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Актуализированная редакция СНиП 2.06.15-85 : утв. приказом Минстроя от 16.12.2016 № 964/пр.
5. Кислицин А. А., Мачнев А. С. Исследование воздействий разрыва нефтегазопроводов на экологическую обстановку в регионе // Молодой исследователь Дона. 2017. № 4. С. 48–51.
6. Кармес А. П. Технические проблемы обеспечения тушения и предотвращения пожаров на нефтегазопроводах // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2014. № 1. С. 24–31.

7. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения : справ. / под ред. В. Д. Дмитриева, Б. Г. Мишукова. 3-е изд., перераб. и доп. Л. : Стройиздат, 1988. 383 с.
8. Минц Д. М., Шуберт С. А. Гидравлика зернистых материалов. М., 1955. 112 с.
9. Ким И. Л. Оценка размеров повреждений подземного трубопровода // Ресурсосберегающие технологии : сб. науч. тр. / Сиб. гос. акад. путей сообщения. Новосибирск, 1997. С. 77–79.
10. Кунц К. Л., Ким И. Л. Об аварийных утечках воды из подземных трубопроводов // Вопросы гидравлики и водоснабжения : сб. науч. тр. / Сиб. гос. акад. путей сообщения. Новосибирск, 1998. С. 42–47.

References

1. Saruev A. L., Kharlamov S. N., Pavlov S. A. Topical issues of pipeline transportation of hydrocarbons. M.: Gornaya kniga; 2013. 120 p. (In Russ.).
2. Kuzmin E. L. Global energy security and pipeline transport. M.: Scientific book; 2009. 253 p. (In Russ.).
3. Prusenko B. E. Analysis of accidents and accidents in pipeline transport in Russia. M.: Tekhnoneftegaz; 2003. 353 p. (In Russ.).
4. SP 104.13330.2016. Engineering protection of the territory from flooding and flooding. Updated edition of SNiP 2.06.15–85: approved. by order of the Ministry of Construction of December 16, 2016 No. 964 / pr. (In Russ.).
5. Kislytsin A. A., Machnev A. S. Study of the impact of oil and gas pipeline rupture on the ecological situation in the region. 2017;(4):48–51. (In Russ.).
6. Karmes A. P. Technical problems of extinguishing and preventing fires at oil and gas pipelines. Fires and emergency situations: prevention, liquidation. 2014;(1):24–31. (In Russ.).
7. Operation of water supply, sewerage and gas supply systems: Ref. / ed. V. D. Dmitrieva, B. G. Mishukova. Ed. 3rd, revised. and additional. L.: Stroyizdat; 1988. 383 p. (In Russ.).
8. Mints D. M., Shubert S. A. Hydraulics of granular materials. M.; 1955. 112 p. (In Russ.).
9. Kim I. L. Assessment of the size of damage to an underground pipeline // Resource-saving technologies: coll. scientific tr. Sib. state acad. ways of communication. Novosibirsk; 1997. P. 77–79. (In Russ.).
10. Kunts K. L., Kim I. L. About emergency water leaks from underground pipelines. scientific tr. Sib. state acad. ways of communication. Novosibirsk; 1998. P. 42–47. (In Russ.).

Информация об авторах

К. Л. Кунц – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика, водоснабжение и химия» Сибирского государственного университета путей сообщения.

И. Л. Ким – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика, водоснабжение и химия» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

K. L. Kunts – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Hydraulics, Water Supply and Chemistry Department, Siberian Transport University.

I. L. Kim – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Hydraulics, Water Supply and Chemistry Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 03.02.2022; принятая к публикации 07.02.2022.

The article was submitted 01.02.2022; approved after reviewing 03.02.2022; accepted for publication 07.02.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 69.056.52

doi 10.52170/1815-9265_2022_60_130

Крупнопанельное домостроение: историческая необходимость и перспективная технология строительной отрасли

Валерий Степанович Воробьев^{1✉}, Иван Леонидович Сидоренко²

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

¹ decansgd@stu.ru✉

² 2559564@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности, технологии и методы крупнопанельного домостроения. Особое внимание уделено истории и причинам появления данного вида строительства. На примере таких стран, как Польша, Корея, Германия, анализируются динамика и результаты развития крупнопанельного домостроения. Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что технология крупнопанельного домостроения имеет все перспективы дальнейшего развития и широкого распространения при условии внедрения энергоэффективных и экологически чистых технологий. Развитие сборного строительства в сфере многоквартирного жилья должно быть связано с еще более совершенной координацией всех процессов на основе BIM-технологий, улучшением имеющихся строительных систем в сочетании с устранением существующих недостатков в технологических процессах и сборке блоков.

В статье рассмотрены крупноблочная технология с разделением на фасадные и потолочные панели среднего размера; крупнопанельная технология с разделением на крупные фасадные и потолочные панели; проект многоквартирного жилого дома, возведенного компанией BBGK Architekci по технологии сборных крупнопанельных конструкций; соединительная система UNICON фирмы Munitec GmbH; проект большого многоквартирного дома в Корее, который возведен с использованием системы Koncz для высотных крупнопанельных зданий; несущая система поперечных стен с односторонними перекрытиями, несущая система продольной стены с предварительно напряженными односторонними плитами; конструкция жилого блока на основе системных модулей и др. Сделан вывод о важном преимуществе крупнопанельного строительства, заключающийся в возможности достижения стабильно высокого качества конечной продукции.

Ключевые слова: крупнопанельное жилье, строительство, эффективность, технология, экологичность

Для цитирования: Воробьев В. С., Сидоренко И. Л. Крупнопанельное домостроение: историческая необходимость и перспективная технология строительной отрасли // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 130–139. DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_130.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Large-panel housing construction: historical necessity and advanced technology of the construction industry

Valeriy S. Vorobyov^{1✉}, Ivan L. Sidorenko²

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

¹ decansgd@stu.ru✉

² 2559564@mail.ru

Abstract. The article discusses the features, technologies and methods of large-panel housing construction. Special attention is paid to the history and reasons for the appearance of this type of construction. On the example of such countries as Poland, Korea, Germany, the dynamics and results of the development of large-panel housing construction are analyzed. The results of the study indicate that the technology of large-panel housing construction has all the prospects for further development and wide dissemination, provided that energy-efficient and environmentally friendly technologies are introduced. The development of prefabricated construction in the field of multi-apartment housing should be associated with even better coordination of all processes based on BIM technologies, improvement of existing building systems in combination with the elimination of existing shortcomings in technological processes and assembly of blocks. The article presents large-block technology with separation into

facade and ceiling panels of medium size, large-panel technology with separation into large facade and ceiling panels, an apartment building built by BBGK Architekci using the technology of prefabricated large-panel structures, the UNICON connecting system of Munitec GmbH, a project of a large apartment building in Korea, which was erected using the Koncz system for high-rise large-panel buildings, a load-bearing system of transverse walls with one-sided overlapping, a load-bearing system of a longitudinal wall with prestressed one-sided slabs, the construction of a residential block based on system modules, etc. The conclusion is made about the important advantage of large-panel construction, which consists in the possibility of achieving consistently high quality of the final product.

Keywords: large-panel housing, construction, efficiency, technology, environmental friendliness

For citation: Vorobyov V. S., Sidorenko I. L. Large-panel housing construction: historical necessity and advanced technology of the construction industry. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(60):130–139. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2022_60_130.

Крупнопанельные конструкции являются одним из наиболее прогрессивных индустриальных типов конструктивных элементов. В современном строительстве они применяются при возведении жилых домов, общественных и промышленных зданий, дорог, аэродромов, плотин, каналов. Наибольшее распространение они получили в крупном жилищном и гражданском строительстве, где возведение зданий из крупных панелей, изготавливаемых на домостроительных комбинатах и заводах, позволяет сократить сроки строительства в 1,5–2,0 раза по сравнению с возведением зданий из кирпича или других традиционных материалов, а также снизить трудозатраты на строительной площадке на 30–40 %. Сметная стоимость квадратного метра жилой площади при использовании данной технологии на 12–15 % ниже, чем в кирпичных зданиях [1].

Крупнопанельное домостроение получило широкое распространение в 50-х гг. XX в. и сыграло важную роль в ликвидации острого дефицита жилья во многих странах послевоенной Европы. После масштабного строительства в начале 1960-х гг. в Восточной Европе типовых пятиэтажных крупнопанельных жилых домов с 1965 г. существенное распространение получил блочный принцип, в том числе блочно-ячеистый метод, который позволял обеспечивать со-поставимую вариативность планировочных и композиционных решений для помещений. Сегодня более 170 млн человек проживают в более чем 70 млн панельных зданий по всей Центральной и Восточной Европе.

Системы считаются сборными крупнопанельными (PLP), если вертикальными несущими элементами являются стены, построенные и собранные из крупных панелей, как правило, не менее размера комнаты [2]. Система PLP включает в себя различные сборные эле-

менты, такие как стены, балки, перекрытия, колонны, лестницы, площадки и некоторые специализированные элементы, которые стандартизированы и разработаны для обеспечения стабильности, долговечности и структурной целостности здания. Строительство сборных жилых зданий включает в себя проектирование, стратегическое планирование двора, подъем, перемещение и транспортировку сборных элементов. Эта технология подходит для строительства высотных зданий, выдерживающих сейсмические и ветровые боковые нагрузки наряду с гравитационными нагрузками. Каркас здания планируется таким образом, чтобы получить максимальное количество повторений форм. Эти элементы отливаются в контролируемых заводских условиях. Завод строится на месте строительства или рядом с ним, что обеспечивает экономичное решение с точки зрения хранения и транспортировки.

Сегодня крупнопанельное строительство получило второе дыхание, поскольку преимущества сборного железобетона перед сталью или монолитным бетоном делают его особенно привлекательным для проектов, где график и экономическая эффективность имеют решающее значение. В дополнение к стоимости, долговечности и скорости выхода на рынок сборный железобетон обеспечивает гибкость в планировании пространства и повышенную рентабельность инвестиций. Для генерального подрядчика сборный железобетон позволяет достигнуть общей устойчивости здания, а также обеспечить комплексную реализацию проекта, что сокращает сроки и стоимость возводимого объекта.

Принимая во внимание вышеизложенное, особую актуальность на сегодняшний день приобретает задача анализа особенностей развития технологий крупнопанельного строи-

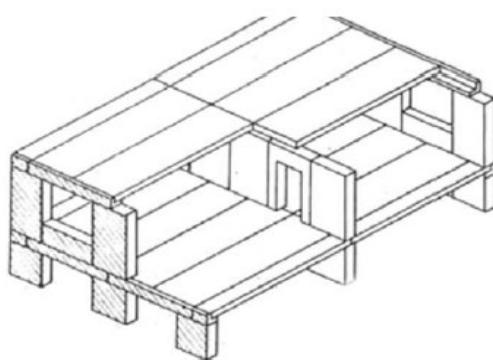
тельства в разных странах мира, что обуславливает выбор темы данной статьи, а также подтверждает ее практическую и теоретическую значимость.

Изучению проблем крупнопанельного строительства в России посвящено множество научных работ, большинство из которых были опубликованы до 1991 г. в условиях социалистической плановой экономики и государственной монополии на массовое жилищное строительство. Соответственно, тематика этих публикаций очерчивала архитектурно-типологические (номенклатуру и планировку квартир, блок-секции, строительные приемы), конструкторско-технологические (стандартизацию, унификацию планировочных и строительных решений) вопросы, а также затрагивала ключевые аспекты архитектурно-композиционных процедур.

Учитывая ужесточение требований к экологичности, ряд зарубежных авторов уделяют внимание возведению энергоэффективных зданий по каркасно-панельной сип-технологии.

Прогрессирующие технологии в области сборных конструкций и меняющиеся экономические условия оживили рынок крупнопанельного строительства из сборного железобетона. Поэтому в настоящее время с учетом уже имеющегося опыта и накопленной практики необходимы дальнейшие углубленные исследования в данной предметной плоскости.

С учетом обозначенных фактов целью статьи является рассмотрение исторической retrosпективы крупнопанельного домостроения в разных странах мира, а также анализ его текущего состояния и возможностей развития в будущем.



Методологической основой проводимого исследования является системный подход, основанный на использовании общих методов научного познания; методов, отражающих как эмпирический, так и теоретический уровни рассматриваемой проблематики. Для решения поставленных задач также использовалась конкретно-научная методология. Среди применяемых методов – метод системно-структурного анализа, графический метод, метод алгоритмизации, метод сравнения, систематизации, группировки, классификации, обобщения.

Рассмотрим опыт крупнопанельного домостроения в Польше. Процесс развития технологий крупнопанельного домостроения в этой стране можно разделить на три этапа.

1950-е гг. В это время в Польше начали заменять трудоемкие технологии кладки кирпича более эффективными промышленными методами. Они включали использование крупных сборных стеновых и межэтажных перекрытий. Кроме того, были разработаны системы сборных элементов среднего размера (так называемые крупные блоки). Основные принципы среднего сборного строительства заключались в индустриализации сборных строительных элементов, их легкой транспортировке и использовании на строительной площадке без необходимости применения специальной строительной техники и с относительно небольшими затратами человеческого труда (рис. 1).

1970–1980 гг. В это время на окраинах городов были построены жилые комплексы огромного масштаба. Такие комплексы в Польше сейчас называют «городскими спальнями». Количественные потребности в жилье

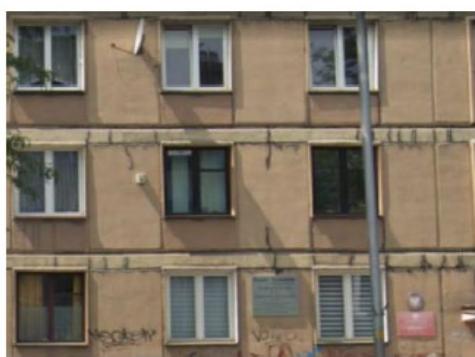


Рис. 1. Крупноблочная технология с разделением на фасадные и потолочные панели среднего размера [2]

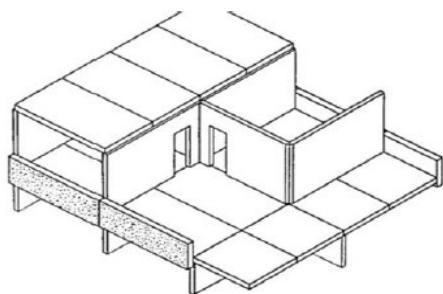


Рис. 2. Крупнопанельная технология с разделением на крупные фасадные и потолочные панели [3]

и вызванная ими необходимость «строить быстрее и больше» послужили основой для внедрения крупнопанельных сборных систем, которые доминировали в технологии строительства более 20 лет. Главной особенностью этих систем была так называемая открытая типизация, которая базировалась на возможности проектирования зданий с разнообразной функциональной и пространственной компоновкой на основе использования модульных, типовых сборных элементов, составляющих структуру, наполнение, отделку и часто меблировку здания [3]. Большие стеновые и напольные перекрытия позволяли закрывать иногда целые комнаты (рис. 2).

Элементы производились на так называемых домостроительных комбинатах, а для их транспортировки и монтажа на строительной площадке необходимо было использовать специализированное оборудование. При разработке крупнопанельных систем учитывались такие факторы, как простота конструктивного устройства, уменьшение количества конструктивных пролетов и типов сборных элементов, а также обеспечение адекватного обустройства жилья.

Однако сложная технология производства элементов, их транспортировки, монтажа, а также эксплуатации готовых зданий оказалась намного дороже, чем предполагалось изначально. Более того, качество и стандарт такого жилья быстро перестали соответствовать социальным ожиданиям.

2000-е гг. Сегодня в крупнопанельном домостроении Польши для возведения жилых домов используются сборные железобетонные элементы. Среди преимуществ использования технологий сборного производства можно отметить простоту и скорость сборки

элементов, кроме того, они позволяют свести к минимуму ошибки на строительной площадке, а также дают свободу проектирования любых типов зданий и их внутренних помещений. Сборные плиты обладают высокими теплоизоляционными свойствами и конструктивной прочностью, что повышает способность зданий аккумулировать тепло зимой и поддерживать прохладную температуру летом. Одним из самых известных проектов крупнопанельного домостроения в Польше является многофункциональное здание на улице Спиччна, 4 в Варшаве, спроектированное в 2015 г. компанией BBGK Architekci и построенное в 2017 г. (рис. 3).



Рис. 3. Многоквартирный жилой дом на улице Спиччна, 4 в Варшаве, построенный компанией BBGK Architekci по технологии сборных крупнопанельных конструкций [3]

Этот проект стал испытательным полигоном и демонстрацией потенциала, предлагаемого современным сборным строительством. В данном случае нетипичные условия участка, ориентированного под углом 45 градусов по отношению к улице и расположенного среди

компактной застройки центра города, между таунхаусами XIX в., оказались сложной задачей. В этом демонстрационном проекте использовалось до 250 типов сборных элементов, что сделало его архитектурно оригинальным, но в то же время и дорогостоящим по сравнению с тем, что ожидается от сборного жилья [4]. Однако целью проекта было продемонстрировать весь потенциал этой технологии и показать различия в качестве такой архитектуры по сравнению с тем, что было известно со времен второй половины прошлого века.

Кроме того, польские проектировщики и строители сегодня используют инновационные, умные сборные соединения, которые предполагают простоту сборки элементов без использования сварки и бетонирования. Это также позволяет разбирать их, что особенно ценно в случае сноса, перестройки или адаптации. Примером таких современных стеновых соединений являются стальные соединители (рис. 4).

Система состоит из так называемых женских и мужских соединителей, которые устанавливаются непосредственно на сборные плиты и помещаются в опалубку во время производства сборных стен. Элемент стены с женским соединителем вставляется в элемент с мужским соединителем, образуя плотнуюстыковку, которая не требует опалубки или бетонирования. Эта система позволяет демонстрировать элементы без их повреждения, что очень важно, так как сборные плиты могут быть использованы повторно.

На следующем этапе исследования рассмотрим опыт строительства крупнопанельных домов в Корее.

В Корее чаще всего используется система Koncz System, которая была разработана в 1964 г. и попыталась устранить ограничения и ошибки других систем. Она была внедрена в 1990 г. строительной компанией Samsung и имела большой успех (рис. 5).



Рис. 4. Соединительная система UNICON фирмы Munitec GmbH [4]



Рис. 5. Проект большого многоквартирного дома в Корее, который возведен с использованием системы Koncz для высотных крупнопанельных зданий [4]

Конструктивные решения крупнопанельных зданий, которые были построены по системе Koncz, характеризуются ориентацией несущих стен и способом опирания плиты перекрытия – односторонним или двусторонним. В соответствии с этими характеристиками использовалось три основных конструктивных решения для многоэтажных крупнопанельных зданий.

Несущая система с поперечными стенами. Эта система имеет односторонние перекрытия (рис. 6).

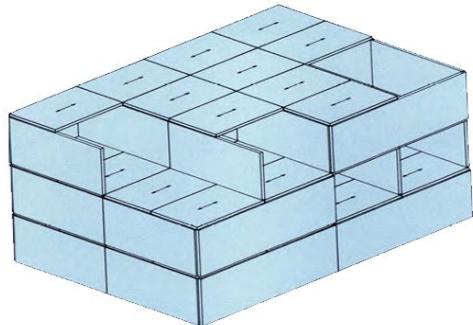


Рис. 6. Несущая система поперечных стен – односторонние перекрытия [4]

Только наружные стены в поперечном направлении являются несущими. Продольные наружные стены, как правило, представляют собой ненесущие навесные стены. Односторонние плиты перекрытия имеют пролет 6,0–7,0 м. Для таких пролетов можно использовать ненапрягаемые плиты перекрытия спустотелями сердечниками. Ширина плит составляет от 2,4 до 3,6 м, что приводит к уменьшению количества элементов. Плиты перекрытия соединяются между собой, образуя диафрагмы, которые передают горизонтальные силы на стены.

Жесткость в продольном направлении разводят продольные внутренние и наружные стены, а также стены лестничной клетки. Поскольку наружные стены не являются несущими, архитектор имеет свободу в создании привлекательных дизайнерских решений для наружных стен.

Система несущих продольных стен. Эта система имеет конструктивные характеристики, аналогичные системе поперечных стен (рис. 7).

Внешние стены поддерживают односторонние плиты перекрытия. Из-за архитектурной планировки эти плиты перекрытия имеют более длинный пролет – от 9,0 до 12,0 м. Для таких

пролетов используются предварительно напряженные пустотные плиты. Архитектурное проектирование стен несколько сложнее из-за их несущей функции. Жесткость здания в поперечном направлении может быть достигнута за счет двускатных стен (торцевая фасадная стена в поперечном направлении) и лестничных стен. Пустотелые плиты должны быть соединены вместе, чтобы образовать диафрагму.

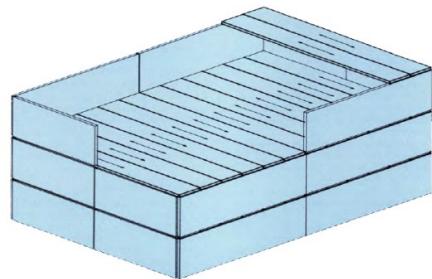


Рис. 7. Несущая система продольной стены – предварительно напряженные односторонние плиты [4]

Полностенная несущая система. Эта система имеет двухсторонние плиты перекрытия (рис. 8).

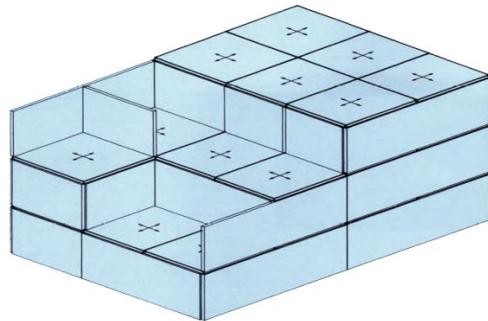


Рис. 8. Несущая система для всех стен – двухсторонние перекрытия [4]

Плиты перекрытия обычно имеют размер комнаты и толщину 150 мм. Этого достаточно для пролетов 4,0–4,2 м.

В Германии крупнопанельное домостроение сегодня набирает популярность по ряду причин. Немецкий рынок, как и большинство европейских рынков, в настоящее время сталкивается с проблемой нехватки доступного жилья и отсутствия квалифицированной рабочей силы, необходимой для возведения строительных конструктивных систем и отделки зданий по мокрым технологиям. Именно поэтому инновационные концепции системной архитектуры рассматриваются как новый способ строительства доступных квартир за короткий промежуток времени без ущерба для их качества.

Особенности крупнопанельного строительства в Германии заключаются в том, что на заводах производятся не сборные железобетонные элементы, а модули, из которых собирается квартира. Блоки создаются из модулей определенного размера: длина 6,36 м или 7,15 м, ширина 3,18 м и высота 3,15 м, при этом высота блока дневного света составляет 2,5 м [5]. Такие модули, как гостиная, ванная и кухня, спальня с туалетом и кладовая, соединяются друг с другом, создавая, в зависимости от необходимости и типа здания, варианты блоков от одной до пяти комнат (рис. 9).

Система предусматривает один тип ванной комнаты, расположенной непосредственно рядом с кухней таким образом, чтобы создать общую хозяйственную шахту для обоих помещений.

Модули изготавливаются полностью на заводе. Готовые элементы, оснащенные всем необходимым оборудованием, транспортируются на строительные площадки, где с помощью кранов собираются целые здания. Эта система позволяет возводить один этаж в течение недели, что значительно сокращает общее время строительства и сводит к минимуму любые неудобства, связанные со строительными работами.

Ярким примером проекта строительства модульного многоквартирного жилья явля-

ется комплекс из трех жилых зданий, возведение которых было завершено в декабре 2018 г. в Вестринге во Франкфурте-на-Майне компанией Firmengruppe Max Bögl. Проект был разработан по заказу компании Vonovia, которая является одним из крупнейших операторов по развитию недвижимости на немецком рынке. Здания включают в себя в общей сложности 36 квартир, построенных из 201 модуля. Целью проекта было создание доступного жилья, что нашло отражение в функционалистской композиции комплекса и скромных фасадах, которые только подчеркиваются самонесущими балконами.

Также в Германии широко используется технология, разработанная компанией GOLDBECK GmbH. Система GOLDBECK предполагает перпендикулярное расположение конструктивных осей, при этом каждая ось представляет собой кратный модуль длиной 0,625 м, с минимальным пролетом 3,125 м и максимальным пролетом 6,25 м. Поперечные и лестничные стены имеют толщину 21 см, а продольные стены – 14 см.

Стандартные жилые блоки на основе системы состоят из дневной секции, включающей гостиную и кухню, и примыкающей к ней ванной комнаты, модуль пролета которой составляет 6,25 м. Модуль с ночной зоной рас-



Рис. 9. Конструкция жилого блока на основе системных модулей [5]

полагается рядом с модулем с дневной секцией, а ширина ночных модулей зависит от количества запланированных спален [6]. Например, двухкомнатный блок может быть построен с использованием модуля дневной зоны с пролетом 6,25 м и модуля ночной зоны (с одной спальней и кладовой) с пролетом 3,75 м. Трехкомнатный блок может иметь модуль дневной зоны с пролетом 6,25 м и модуль ночной зоны с пролетом 5,00 м с двумя спальнями и кладовой (рис. 10).

В своих проектах компания использует сборные элементы, формирующие структуру здания, такие как стены, потолки, модульные лифтовые шахты, лестничные клетки и готовые санитарные модули со всеми необходимыми коммуникациями и полным набором мебели, собранные на собственных заводах. Готовые санитарные модули значительно ускоряют строительство благодаря быстрому и простому монтажу и производственному процессу, не зависящему от строительных работ.

В настоящее время в разных странах мира существует устойчивый спрос на строительство нескольких десятков тысяч относительно доступных жилых единиц в год, который успешно достигается и будет достигаться с помощью технологии сборного железобетона [7]. Ключом к использованию сборных железобетонных элементов в жилищном строительстве является их постоянное совершенствование с помощью новых технологий, материалов и патентов, в том числе благодаря использованию технологии BIM.

Существует естественная предрасположенность технологии сборных конструкций к внедрению про-экологических решений (которые снижают углеродный след и давление на окружающую среду), что может способствовать их преференциальному статусу в будущем, при условии, что жилищный сектор будет поддерживаться через субсидии так же, как это делается для зеленых общественных и коммерческих зданий [8, 9].

Наиболее важным преимуществом крупнопанельного строительства является возможность достижения стабильно высокого качества конечной продукции. При строительстве крупнопанельных конструкций контролируемые на заводе условия и использование самых современных технологий производства позволяют легче добиться желаемых размеров, форм, цвета и фактуры сборного бетона. Сборный железобетон также позволяет проверять качество поверхности перед установкой.

С момента своего появления в середине прошлого века крупнопанельное строительство прошло несколько этапов эволюции, изменения и совершенствования технологии. В результате сегодня используемые методы позволили обеспечить энергоэффективность и экологичность домов, построенных из крупных панелей.

Вопреки распространенному мнению, крупнопанельная структура не обязательно ограничивает свободу дизайна. Многообразие выражения и уникальные здания являются результатом индивидуальных решений и разумного использования индустриальных техноло-

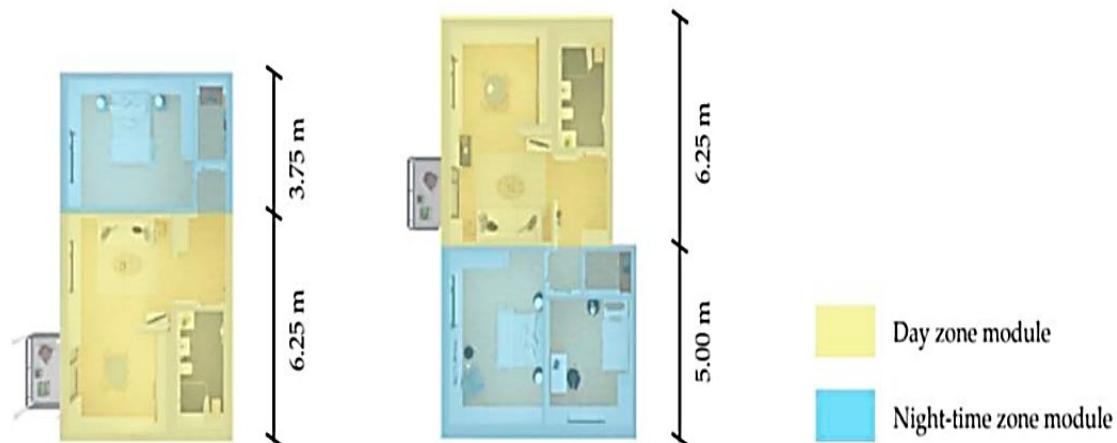


Рис. 10. Планы этажей, показывающие двухкомнатный и трехкомнатный блоки фирмы GOLDBECK GmbH с обозначением дневной и ночной зон [6]

гий производства. Архитекторы также могут выбирать различные цвета, фактуры и размеры, чтобы соответствовать своим эстетиче-

ским представлениям. Кроме того, сборный бетон гармонично сочетается с другими строительными материалами.

Список источников

1. Baghdadi Abtin. Connections placement optimization approach toward new prefabricated building systems // *Engineering structures*. 2021. Vol. 233. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029620342498?via%3Dihub> (дата обращения: 28.02.2022).
2. Bi Wenzhen. Research on The Way of Prefabricated Building Information Sharing Based on Computer Software BIM // *Journal of physics. Conference series*. 2021. Vol. 1744, is. 2. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1744/2/022078> (дата обращения: 28.02.2022).
3. Krentowski J. R., Knyziak P., Mackiewicz M. Durability of interlayer connections in external walls in precast residential buildings // *Engineering failure analysis*. 2021. Vol. 121. URL: https://www.researchgate.net/publication/346718327_Durability_of_interlayer_connections_in_external_walls_in_precast_residential (дата обращения: 28.02.2022).
4. Nowak-Dzieszko Katarzyna, Rojewska-Warchał Małgorzata. Influence of the Balcony Glazing Construction on Thermal Comfort of Apartments in Retrofitted Large Panel Buildings // *Procedia engineering*. 2015. Vol. 108. P. 481–487.
5. Duan Yadi. Analysis on the Quality Problems and Preventive Measures of Prefabricated Building Construction // *Journal of physics. Conference series*. 2020. Vol. 1648, Is. 3. URL: https://www.researchgate.net/publication/346508619_Analysis_on_the_Quality_Problems_and_Preventive_Measures_of_Prefabricated_Building (дата обращения: 28.02.2022).
6. Blaauwendaard Johan. Stringer-panel models in structural concrete: applied to D-region design / Cham: Springer, 2018. 99 p.
7. Drexler H., Dömer K., Schultz-Granberg J. Bezahlbar. Gut. Wohnen. Strategien für Erschwinglichen Wohnraum // Jovis Verlag GmbH. Berlin, 2016. 291 p.
8. Alkhalidi Ammar. Is it a possibility to achieve energy plus prefabricated building worldwide? // *International journal of low carbon technologies*. 2021. Vol. 16, № 1. P. 220–228.
9. Niemelä Tuomo, Kosonen Risto, Jokisalo Juha. Energy performance and environmental impact analysis of cost-optimal renovation solutions of large panel apartment buildings in Finland // *Sustainable cities and society*. 2017. Vol. 32. P. 9–30.

References

1. Baghdadi Abtin. Connections placement optimization approach toward new prefabricated building systems. *Engineering structures*. 2021;233. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029620342498?via%3Dihub>.
2. Bi Wenzhen. Research on The Way of Prefabricated Building Information Sharing Based on Computer Software BIM. *Journal of physics. Conference series*. 2021;1744(2). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1744/2/022078>.
3. Krentowski J. R., Knyziak P., Mackiewicz M. Durability of interlayer connections in external walls in precast residential buildings. *Engineering failure analysis*. 2021;121. URL: https://www.researchgate.net/publication/346718327_Durability_of_interlayer_connections_in_external_walls_in_precast_residential.
4. Nowak-Dzieszko Katarzyna, Rojewska-Warchał Małgorzata. Influence of the Balcony Glazing Construction on Thermal Comfort of Apartments in Retrofitted Large Panel Buildings. *Procedia engineering*. 2015;108:481–487.
5. Duan Yadi. Analysis on the Quality Problems and Preventive Measures of Prefabricated Building Construction. *Journal of physics. Conference series*. 2020;1648(3). URL: https://www.researchgate.net/publication/346508619_Analysis_on_the_Quality_Problems_and_Preventive_Measures_of_Prefabricated_Building.
6. Blaauwendaard Johan. Stringer-panel models in structural concrete: applied to D-region design / Cham: Springer; 2018. 99 p.
7. Drexler H., Dömer K., Schultz-Granberg J. Bezahlbar. Gut. Wohnen. Strategien für Erschwinglichen Wohnraum // Jovis Verlag GmbH. Berlin; 2016. 291 p.
8. Alkhalidi Ammar. Is it a possibility to achieve energy plus prefabricated building worldwide? *International journal of low carbon technologies*. 2021;16(1):220–228.
9. Niemelä Tuomo, Kosonen Risto, Jokisalo Juha. Energy performance and environmental impact analysis of cost-optimal renovation solutions of large panel apartment buildings in Finland. *Sustainable cities and society*. 2017;32:9–30.

Информация об авторах

В. С. Воробьев – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология, организация и экономика строительства» Сибирского государственного университета путей сообщения, декан факультета «Строительство железных дорог».

И. Л. Сидоренко – аспирант кафедры «Технология, организация и экономика строительства» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. S. Vorobyov - Doctor of Engineering, Professor of the Technology, Organization and Construction Economics Department, Siberian State University, Dean of the Railway Construction Faculty.

I. L. Sidorenko – Post-graduate Student of the Technology, Organization and Construction Economics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 09.02.2022; одобрена после рецензирования 17.02.2022; принятa к публикации 28.02.2022.

The article was submitted 09.02.2022; approved after reviewing 17.02.2022; accepted for publication 28.02.2022.

Информация для авторов

1. Предоставляемый материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях.
2. Статья представляется в электронном виде в форматах doc, docx или rtf и одновременно в бумажном виде, отпечатанном в формате А4 с полуторным интервалом (границы Times New Roman, кегль 14 pt; поля: верхнее и нижнее – 20, левое – 30, правое – 10 мм). Файл с текстом статьи должен быть назван фамилией автора (например: Иванов.doc).
3. Статья должна содержать:
 - тип статьи (например, научная, обзорная, рецензия);
 - УДК;
 - название статьи;
 - фамилию, имя и отчество каждого автора, место его работы/учебы, город, страну, ученую степень, звание, должность;
 - аннотацию на русском и английском языках;
 - ключевые слова на русском и английском языках;
 - библиографический список на русском и английском языках.
4. Список источников составляется в порядке упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Список должен содержать не менее 10 источников, из них собственных статей должно быть не более 30 %.
5. Графический материал должен быть выполнен в графических редакторах, поддерживающих векторную и растровую графику. Иллюстрации должны быть четкими, все подписи на рисунке должны хорошо читаться и иметь расшифровку. Если в тексте есть фотография, отсканированный рисунок, то они обязательно должны быть представлены также отдельным файлом в исходном графическом формате (например: jpg, tiff).
6. Статья для опубликования в журнале и заявка отправляются по адресу: 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



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 *А. С. Ильиных*
Ответственный секретарь *М. С. Галай*
Редактор перевода текста на английский язык *И. И. Степачкова*
Редакторы: *Е. Е. Рыжкова, А. О. Елесина*
Корректор *Б. В. Устинов*
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: vestnik.stu@yandex.ru

Адрес издателя

630049, Россия, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191.
Телефон/факс: (383) 328-03-81.
E-mail: bvu@stu.ru

Подписано в печать 23.03.2022. Дата выхода в свет 25.03.2022

Тираж 350 экз. Формат 60×84/8
Объем 16,5 уч.-изд. л., 17,75 усл.-печ. л. Заказ № 3717

Цена свободная

Отпечатано в издательстве СГУПС.
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
Тел. (383) 328-03-81; e-mail: bvu@stu.ru