

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 19, выпуск 1, 2022

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью
«Издательский Центр РИОР» по договору
№ ЭАО09636 от 12.01.2022

Адрес учредителя

190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Адрес издателя

127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В,
стр. 1, офис 402

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005, выдано
Федеральной службой по надзору за соблюдением
законодательства в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия, Управление
по Северо-Западному федеральному округу

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в перечень ведущих
рецензируемых научных журналов и изданий
(решение Президиума Высшей аттестационной
комиссии Минобрнауки России от 29.12.2015,
№ 6/6)

Журнал публикует научные статьи в областях
технические науки (05.00.00), транспорт (05.22.00)

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

Индекс подписки Агентство «Книга-Сервис» 33315

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

А. Ю. Панычев, канд. экон. наук, доцент

Заместитель главного редактора

А. К. Канаев, д-р техн. наук, профессор

Научный редактор

А. М. Евстафьев, д-р техн. наук, профессор

Перевод на английский язык

Д. В. Дементьева

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Панычев Александр Юрьевич, канд. экон. наук,
доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия,
председатель Совета

Шнайдер Эххард, профессор, Фраунгоферовский
институт неразрушающего контроля, Саарбрюккен,
Германия

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический
университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический университет,
София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Сапожников Валерий Владимирович, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель
редколлегии

Бадёр Михаил Петрович, д-р техн. наук, профессор, РУТ
(МИИТ), Москва, Россия

Белаш Татьяна Александровна, д-р техн. наук, профессор,
Санкт-Петербург, Россия

Беленцов Юрий Алексеевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Блажко Людмила Сергеевна, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Бороненко Юрий Павлович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Брынь Михаил Ярославович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Губачева Лариса Александровна, д-р техн. наук, профессор,
Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск

Канаев Андрей Константинович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Петрова Татьяна Михайловна, д-р техн. наук, профессор,
Санкт-Петербург, Россия

Покровская Оксана Дмитриевна, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Смирнов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Соловьева Валентина Яковлевна, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Талантова Клара Васильевна, д-р техн. наук, доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Титова Тамила Семеновна, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Фролов Юрий Степанович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Шангина Нина Николаевна, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Штыков Валерий Иванович, член-корр. РАН, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Фото на обложке из архивов библиотеки
ФГБОУ ВО ПГУПС

Подписано в печать с оригинал-макета 25.03.2022.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 19,25. Тираж 300 экз.

Заказ . Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «Паблит», 127282,
г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 19, issue 1, 2022

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Founder

Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education "Emperor Alexander I Petersburg
State Transport University"

Publisher

Limited Liability Company
"Publishing Center RIOR" under contract
N ЭАО09636 dated December 01, 2022

Founder's address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
(812) 314-92-32

e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Publisher's address

127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str.,
31Bc1, of. 402

Mass media registration

certificate number

ПН N ФС2-7499 dd. 06.04.2005

issued by the Federal service for the monitoring
of legislation compliance in the sphere of mass
communications and the preservation of cultural heritage,
North West Federal district division

The journal is registered in the Russian Science Citation
Index (RSCI)

The journal is included in the List of leading
peer-reviewed scientific journals and publications

The journal publishes scientific articles in the fields
of Technics (05.00.00), Transport (05.22.00)

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed

Index Direct Mail Agency "Kniga-Service" 33315

JOURNAL STAFF

Editor-in-chief

A. Yu. Panychev, PhD in Economics, Associate Professor

Deputy chief editor

A. Kanayev, D. Eng. Sci., Professor

Science editor

A. Evstafev, D. Eng. Sci., Professor

English translation

D. V. Dementieva

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Alexander Panychev, PhD in Economics, Associate
Professor, Emperor Alexander I Petersburg State Transport
University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial
board

Ekhard Shneider, Professor, Fraunhofer Institute
for Non-Destructive Testing, Saarbrücken, Germany

Marek Sitazh, Professor, Silesian University
of Technology, Poland

Khristo Khristov, Professor, Technical University
of Sofia, Bulgaria

EDITORIAL TEAM

Valeriy Sapozhnikov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia,
Chairman of Editorial team

Mikhail Badyer, D. Eng. Sci., Professor, Russian University
of Transport, Moscow, Russia

Tatiana Belash, D. Eng. Sci., Professor, St. Petersburg, Russia

Yury Belentsov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Liudmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Yuriy Boronenko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Mikhail Bryn', D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Larisa Gubachyeva, D. Eng. Sci., Professor, Volodymyr Dahl
Luhansk State University, Luhansk

Andrey Kanayev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Aleksander Ledyayev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Tatiana Petrova, D. Eng. Sci., Professor, St. Petersburg, Russia

Oksana Pokrovskaya, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Vladimir Smirnov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valentina Solovyova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Klara Talantova, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor
Alexander I Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

Tamila Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Yury Frolov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Nina Shangina, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valeriy Shtikov, corresponding member of the Russian Academy
of Sciences, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I Petersburg
State Transport University, St. Petersburg, Russia

Open price

© Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

А. С. Гапоненко, М. В. Бушуев

Подходы в планировании планово-предупредительной выправки
и оценка состояния пути 7

Д. Д. угли Каримов

Численное моделирование аэродинамических процессов движения
воздушных масс в тоннелях метрополитена с учетом
«поршневого» воздействия подвижного состава 17

К. Е. Ковалёв, А. В. Новичихин

Повышение эффективности функционирования малоинтенсивных линий:
постановка задачи и математические модели 28

Е. К. Коровяковский, М. Б. Сабуров

Пути повышения эффективности рынка железнодорожных перевозок Республики
Узбекистан на основе модернизации состава и структуры собственников вагонного
парка и контейнеров 40

Т. Г. Сергеева

Целесообразность применения аутсорсинга при перевозке нефтепродуктов 49

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

М. Ю. Калмыков, Е. К. Коровяковский, А. Е. Поляков, Я. А. Шолтысек

Развитие транспортно-пересадочного узла Купчино 56

Д. Н. Курилкин

Определение затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза
по данным микропроцессорной системы управления 68

А. С. Мазнёв, А. А. Калинина, А. В. Волов, С. А. Теличенко, Л. А. Сапожников

Улучшение регулировочных свойств электропоездов постоянного тока
с импульсными преобразователями 75

Г. И. Никифорова

Исследование информационного взаимодействия железнодорожного
и морского транспорта в логистических цепях доставки груза 82

В. Н. Смирнов, А. В. Ланг, Н. А. Лабути

Методика определения динамических воздействий подвижного состава
на мосты при высокоскоростном движении 90



ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А. А. Воробьев, А. А. Мигров

Анализ и выбор геометрических параметров бункера
для изучения процесса выгрузки сыпучих материалов.....97

П. В. Герасименко

Сравнительный анализ активной жизни выдающихся ученых-математиков,
рожденных в разные столетия 105

О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская

Учет разрывов сплошности потока при гидравлических ударах на этапе проектирования
напорных трубопроводов из полимерных материалов 116

А. В. Логинов

Устойчивость процедуры вычисления радиационных времен жизни 127

С. В. Метелкин, В. Н. Парамонов

Морозное пучение и его влияние на распорную систему
ограждающих конструкций глубоких котлованов 133

В. В. Шматченко, Ю. Я. Меремсон, В. Г. Иванов

Специфика безопасности движения на железнодорожных переездах 143

CONTENTS

→ PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

A. S. Gaponenko, M. V. Bushuev

Approaches in the Planning of Planned-Preventive
Setup and Evaluation of Rail Way State7

D. D. ugli Karimov

Numerical Simulation of Aerodynamic Processes
of Air Mass Movement in Underground Tunnels Taking
into Account Piston Impact of Rolling Stock17

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin

Efficiency Rise in Functioning of LowIntensity Lines:
Problem Statement and Mathematical Models.....28

E. K. Korovyakovskiy, M. B. Saburov

Effectiveness Rise Ways of Railway Transportation
in Uzbekistan Republic on the Basis of Owner Composition
and Structure Modernization of Railcar Park and Containers40

T. G. Sergeeva

Practicability of Outsourcing Application at Transportation of Oil Products49

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

M. Yu. Kalmykov, E. K. Korovyakovskiy, A. E. Polyakov, J. Szoltysek

Development of Kupchino Intermodal Passenger Transport Hub.....56

D. N. Kurilkin

Definition of Power Expenses on Booster Charge of Rechargeable Battery
of Diesel Locomotive According to the Data of Microprocessor Control System68

A. S. Maznev, A. A. Kalinina, A. V. Volov, S. A. Telichenko, L. A. Sapozhnikov

Improvement of Regulating Properties
of DC Electric Trains with Pulse Converters75

G. I. Nikiforova

Research of Informational Interaction Between Railway
and Sea Transport in Logistic Chains of Cargo Delivery82

V. N. Smirnov, A. V. Lang, N. A. Labutin

Determination of Dynamic Effects of a Rolling Stock on Bridges During
High-Speed Traffic.....90



GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

A. A. Vorobyev, A. A. Migrov

Analysis and Selection of Geometric Parameters of a Hopper to Study the Process
of Unloading of Bulk Materials 97

P. V. Gerasimenko

Comparative Analysis of the Active Life of Outstanding Mathematicians Born
in Different Centuries 105

O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaya

Accounting for Flow Discontinuities While Water Hammers at Engineering Stage
of Pressure Pipelines Made of Polymeric Materials 116

A. V. Loginov

Constancy of Calculation Procedure for Radiation Lifetimes 127

S. V. Metelkin, V. N. Paramonov

Frost Heave and Its Influence on Spacer System of Enclosing Constructions
of Deep Ditches 133

V. V. Shmatchenko, Yu. Ya. Meremson, V. G. Ivanov

Traffic Safety Specifics on Rail Crossings 143



УДК 625.173.2

Подходы в планировании планово-предупредительной выправки и оценка состояния пути

А. С. Гапоненко, М. В. Бушуев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Гапоненко А. С., Бушуев М. В. Подходы в планировании планово-предупредительной выправки и оценка состояния пути // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 7–16. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-7-16

Аннотация

Цель: Исследование вопросов планирования планово-предупредительной выправки железнодорожного пути и анализ состояния геометрии рельсовой колеи до и после ее проведения по данным прохода путеизмерительного вагона показали, что существующие критерии назначения планово-предупредительной выправки пути не учитывают условия эксплуатации и требуется их пересмотр. **Методы:** При проведении исследований вопросов планирования и оценки состояния железнодорожного пути после выполнения работ по планово-предупредительной выправке были использованы статистические методы. Выборка и анализ данных статистических наблюдений позволили выявить применяемые подходы в планировании планово-предупредительной выправки пути для различных условий эксплуатации. Сгруппированные в ряды динамики отремонтированные километры были оценены по показателям: наличию отступлений второй степени, оценке состояния геометрии рельсовой колеи до ремонта, после ремонта и на конец года ремонта. **Результаты:** Выявлены несоответствия установленным критериям при планировании по включению километров в адресный план планово-предупредительной выправки пути, получены данные о качестве выполнения работ и изменениям состояния железнодорожного пути в течение первого года после ремонта. **Практическая значимость:** Результаты исследований подтверждают необходимость пересмотра критериев назначения планово-предупредительной выправки пути, с выделением в них отдельно основных и дополнительных критериев в зависимости от условий эксплуатации. Приемку железнодорожного пути после ремонтов необходимо проводить в соответствии с требованиями нормативных документов федерального уровня и ОАО «РЖД».

Ключевые слова: Ремонт пути, планирование работ в пути, межремонтная схема, приемка работ после ремонта пути, критерии назначения, планово-предупредительная выправка, балловая оценка, оценка состояния пути.

Основное предназначение планово-предупредительной выправки пути (далее — ППВ) — это восстановление равноупругости балластного слоя и уменьшение отступлений геометрических пара-

метров в содержании рельсовой колеи и рельсошпальной решетки в плане и в профиле [1].

ППВ производится на главных и станционных путях и лежащих в них стрелочных переводах.

Планируется преимущественно километрами или отдельными участками в зависимости от состояния пути (или стрелочного перевода) и необходимости выполнения выправочно-рихтовочных работ. Она входит в периодичность путевых работ, установленных межремонтными схемами для путей различных классов и кодов групп [2], является одним из промежуточных ремонтов пути и выполняется за счет эксплуатационных расходов, выделяемых на текущее содержание пути. Включение километров и отдельных участков в адресный план ППВ следующего года осуществляется по критериям назначения и результатам проведенных осенних комиссионных осмотров, работы средств диагностики и единой комплексной оценки [3, 4].

Критерии назначения ППВ подразделяются на основные и дополнительные в зависимости от класса пути. Основными критериями назначения ППВ для путей 1 и 2 классов являются количество отступлений второй степени, по проходам путеизмерителя, в количестве более 25 шт/км и загрязненность щебня по массе до 30 %. К дополнительным критериям отнесены в процентном отношении для каждого класса пути наличие лежащих в пути негодных шпал, скреплений и шпал с выплесками [5].

В период формирования годового адресного плана ППВ на следующий год проведенный анализ критериев включенных в него километров показывает, что по основному показателю (наличию на километре отступлений второй степени более 25 шт/км) доля таких километров составляет только до 10 % от общего объема. По второму основному показателю (загрязненности щебня по массе до 30 %) доля километров в общем объеме еще меньше. Большинство километров имеет количество отступлений второй степени меньше установленного критерием норматива, что может являться основанием для исключения их из адресного плана. В своей статье [6] В. А. Богда-

нович предлагает для таких километров на путях первого и второго классов учитывать интенсивность нарастания отступлений второй степени за 6 месяцев (более 1,25 шт/км) и ввести вместо загрязненности щебня по массе до 30 % в основные критерии показатель минимального количества шпал с выплесками (более 6 %). Это позволило бы уже на стадии формирования адресного плана иметь ясную картину по включению километров, которые к началу выполнения работ в следующем сезоне будут иметь установленный показатель наличия вторых степеней.

На высокоскоростных и скоростных участках предусматривается назначение планово-предупредительной выправки как первый ремонт после капитального ремонта первого уровня и второй ремонт после среднего ремонта [5]. Использовать общие основные критерии для назначения ППВ (наличие отступлений второй степени более 25 шт/км и загрязненности щебня по массе до 30 %) невозможно из-за малого количества и недопустимости их роста. Особенно это актуально для линии Москва — Санкт-Петербург, где в год необходимо выполнять около 400–450 км планово-предупредительной выправки пути, но ее проведение регламентировано жесткими ограничениями в профиле пути из-за устройств контактной сети. В качестве основного критерия при планировании выправочных работ на высокоскоростных и скоростных участках необходимо использовать такие показатели, как плавность хода поездов и уровень комфортабельности езды пассажиров [7–9].

Планирование ППВ на особогрузонапряженных участках согласно типовой межремонтной схемы (через 700 млн т брутто пропущенного тоннажа) требует проведение работ через каждые два года. Многолетний опыт содержания железнодорожного пути на особогрузонапряженных участках свидетельствует об экономической эффективности текущего содержания конструк-

ций пути с использованием разделительных слоев. Проведенные исследования показали, что вероятность появления отступлений второй степени и расстройств в содержании пути на участках с такой конструкцией пути в несколько раз меньше, чем на участках с типовой конструкцией пути [10]. Это позволяет установить для участков с такими конструкциями пути межремонтную схему с наработкой 1400 млн т брутто, согласно которой выправочные работы будут выполняться через 3–3,5 года.

Октябрьской дирекцией инфраструктуры в 2020 г. было предусмотрено выполнение работ по планово-предупредительной выправке пути на 1965,8 км. Анализ состояния участков пути, включенных в адресный план выполнения планово-предупредительной выправки, показал, что только на 6 % включенные фронты (115,05 км) соответствуют основному критерию назначения планово-предупредительной выправки — наличию на километре отступлений второй степени более 25 шт/км (рис. 1). Остальные километры распределены следующим образом: 29 % оказались с отступлениями второй степени от 6 до 25 шт/км, 49 % — с отступлениями от 1 до 5 шт/км. На 16 % километрах вовсе отсутствовали отступления второй степени.

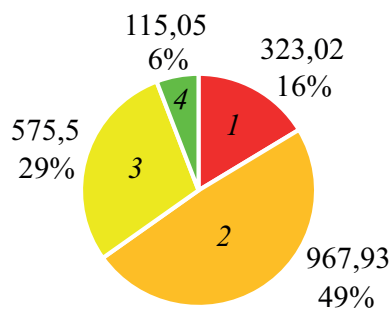


Рис. 1. Наличие километров с отступлениями 2 степени на километрах, включенных в адресный план планово-предупредительной выправки:
1 — 0 шт/км; 2 — 1–5 шт/км; 3 — 6–25 шт/км;
4 — более 25 шт/км

Из 1965,8 км, включенных в план, 1388,5 км (или 70,6 %) имеют отличную оценку, т. е. на километре количество вторых степеней 5 шт. и менее; 434 км (22,1 %) имеют оценку «хорошо», т. е. на этих километрах вторых степеней от 6 до 25 шт.; 124,55 км (6,3 %) имеют оценку «удовлетворительно»; 18,75 км (менее 1 %) имеют оценку неудовлетворительно. Средневзвешенная балловая оценка по всем километрам, включенным в адресный план, составила 30 балла.

Данные проведенных исследований показали, что существующие подходы к назначению планово-предупредительной выправки по основным критериям не отражают истинную картину. Только 6 % километров попадают в границы этих критериев.

Второй основной критерий — загрязненность щебня по массе менее 30 % — фактически не отражает истинную картину на километре, и он практически не участвует в обосновании отнесения километра под выправку. Данный критерий необходим для назначения среднего ремонта пути, основной работой которого является очистка балласта от загрязнений.

Из дополнительных критериев назначения планово-предупредительной выправки можно отнести дефектность негодных скреплений, устранение которых входит в состав работ текущего содержания, и устраняются они в основном при работах текущего содержания.

Вышеизложенное позволяет заключить, что существующее фактическое планирование работ по планово-предупредительной выправке не соответствует требованиям к планированию, установленным ТУ-75р [1].

Отремонтированный железнодорожный путь планово-предупредительной выправкой подлежит приемке, оценке качества и стабильности выполненных работ. Оценка качества выполнения работ выполняется в соответствии с требованиями, изложенными в [1], а также на основании балло-

вой оценки километра [11, 12]. Оценка стабильности участков пути после проведения ремонта проводится по результатам измерений геометрических параметров пути вагоном-путеизмерителем [13]. Первый проход путеизмерительного вагона выполняется непосредственно после завершения работ, а второй — в конце года. Разница этих двух промеров характеризует стабильность участков пути и должна быть минимальной. Появление неисправностей второй и выше степеней свидетельствует о недостаточной стабильности отремонтированного пути.

Результаты контроля путеизмерительными вагонами участков, отремонтированных планово-предупредительной выправкой пути, в месяц после завершения работ приведены на рис. 2 и показывают, что средняя оценка по всем километрам составила 22 балла.

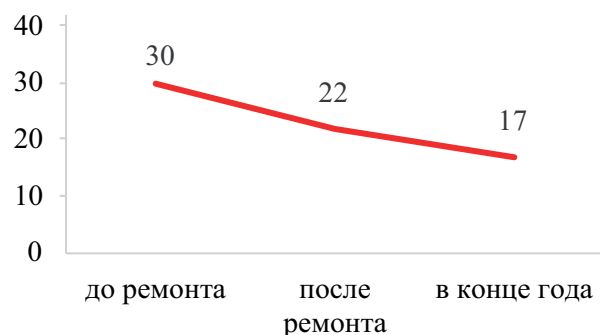


Рис. 2. Средняя балловая оценка на участках пути, включенных в план планово-предупредительного ремонта



Рис. 3. Количество отступлений второй, третьей и четвертой степеней

Увеличилось число километров, имеющих отличную оценку до 1570,3 км (на 9,3 %). Уменьшилось количество километров с оценкой «хорошо» до 298,3 км (или до 15,1 %), километров с оценкой «удовлетворительно» — до 95,4 км (или до 4,9 %). Но имеются 1,8 км с неудовлетворительной оценкой, и они не могут быть приняты в эксплуатацию. В конце года состояние пути на отремонтированных участках улучшилось, при проходе путеизмерителя в декабре 2020 г. оценено в 17 баллов. Количество отличных километров возросло до 1665,4 км (до 84,7 %), хороших километров — 255,2 км (до 13 %), удовлетворительных — до 45,2 км (2,3 %). Неудовлетворительные километры отсутствуют.

Как было отмечено ранее, количество отступлений второй степени, выявленных проездом путеизмерительного вагона, являются основным критерием назначения планово-предупредительной выправки на километре.

Оценка проведения планово-предупредительного ремонта пути проводилась на основании данных, полученных в 2020 г. по 1965,8 километрам. На рассматриваемых 1965,8 километрах ремонта было 13 648 отступлений, из них второй степени — 13 458 шт., третьей степени — 163 шт., четвертой степени — 163 шт. В среднем на один километр приходилось 6,9 отступлений (рис. 3).

После выполнения работ количество отступлений уменьшилось до 9047 шт. (в среднем 4,6 шт/км),

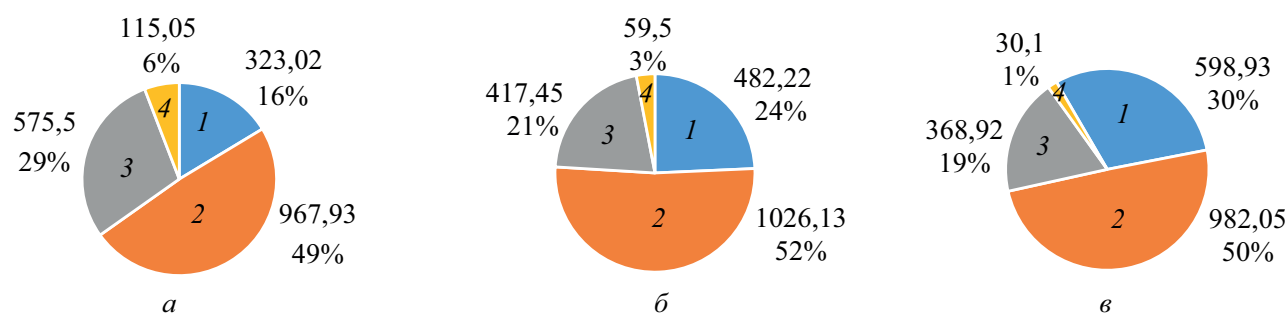


Рис. 4. Километры с количеством отступлений второй степени, включенных в адресный план планово-предупредительного ремонта:

а — до начала ремонта, б — после приемки, в — в конце года;

1 — 0 шт/км; 2 — 1–5 шт/км; 3 — 6–25 шт/км; 4 — более 25 шт/км

из них второй степени — 8909 шт., третьей степени — 136 шт., четвертой степени — 2 шт. При этом следует отметить рост отступлений по шаблону и наличие большого числа неустраненных отступлений третьей степени — 136 шт. На двух километрах выявлены отступления четвертой степени. По результатам прохода в конце года путеизмерительного вагона общее количество отступлений сократилось до 7182 шт. (в среднем до 3,7 шт/км), из них второй степени — 7150 шт. и третьей степени — 32 шт.

На 323 километрах, включенных в адресный план выполнения планово-предупредительной выправки, отступления второй, третьей и четвертой степени отсутствовали, однако эти километры были включены в адресный план; на 968 километрах их число составляло до 5 шт/км (километры имеют отличную оценку); на 575 километрах количество отступлений составило от 6 до 25 (километры имеют хорошую оценку); и только на 115 километрах их число превышало 25 шт/км (или были отступления 3 и 4 степени) (рис. 4).

После выполнения ремонта и приемки пути состояние пути немного улучшилось: на 482,22 км (24 %) — отсутствовали отступления; на 1026,13 км (52 %) их количество составило от 1 до 5; на 417,45 км (21 %) количество от 6 до 25; на 59,5 км (3 %) их количество составило более 25 шт/км. В декабре месяце на 598,93 км (30 %)

отступлений нет, на 982,05 км (50 %) их количество от 1 до 5, на 368,92 км (19 %) количество отступлений от 6 до 25. На 30,1 км (более 1 %) осталось более 25 шт/км отступлений второй степени.

Проведенная оценка состояния пути путеизмерительными вагонами выявила недостаточное качество выполнения выправочно-подбивочных работ механизированными комплексами. Об этом свидетельствует наличие на 636 км (32 %) отступлений второй степени, число которых осталось на прежнем уровне или увеличилось. На рис. 5 показана динамика изменения количества степеней второй степени после ремонта: на 362,65 км (18 %) количество отступлений второй степени выросло до 5 шт/км в сравнении с тем, что было до ремонта; на 121,9 км (6 %) количество отступлений превысило 5 шт/км; на 151,45 км (8 %) количество отступлений второй степени осталось на прежнем уровне.

По данным контроля состояния пути вагоном-путеизмерителем в конце года на 80 км количество отступлений второй степени осталось на прежнем уровне; на 209,32 км количество отступлений второй степени превышает доремонтный уровень до 5 шт/км, на 36,8 км осталось количество отступлений второй степени более 5 шт/км в сравнении с тем, что было до ремонта. Остались неустраненными отступления третьей степени на 36,7 км.

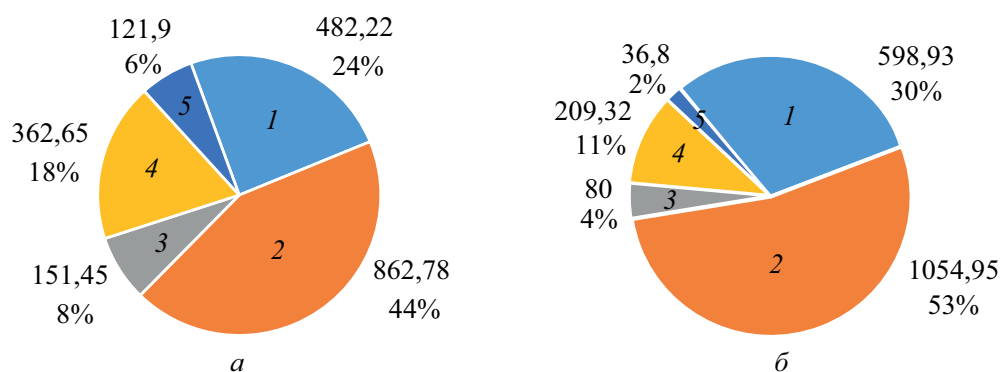


Рис. 5. Динамика изменения количества отступлений второй степени на километрах, отремонтированных планово-предупредительной выправкой:

a — после ремонта, *б* — в конце года;

1 — отсутствие 2 ст., *2* — на прежнем уровне шт/км, *3* — рост на 6 и более шт/км,

4 — уменьшение 2 ст., *5* — рост на 1–5 шт/км

ТАБЛИЦА 1. Результаты приемки пути после ремонта в соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» от 18 января 2013 г. № ТУ-75р

	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Не принято
После приемки, км	482,22		1026,13	476,95
процент	24,2		51,8	24,0
В декабре, км	598,93		982,05	399,02
процент	30,2		49,6	20,2

Требованиями к приемке пути после выполнения планово-предупредительных работ [1] было предусмотрено, что принимаемые километры с оценками «отлично» и «хорошо» не должны иметь отступлений второй степени, с оценкой «удовлетворительно» — не более 5 шт/км, при наличии на километре более 5 шт/км отступлений второй степени — километр не принимается. Проведенный анализ наличия отступлений второй, третьей и четвертой степеней после выполнения ремонта показал, что принятыми по результатам приемки на оценки «отлично» и «хорошо» могут быть только 482,22 км (или 24,2 %), на оценку «удовлетворительно» — 1026,13 км (51,8 %) (табл. 1). Остальные 476,95 км (или 24 %) не могут быть приняты ввиду наличия на них более 5 шт/км отступлений второй степени.

В конце года картина изменилась незначительно. Число километров, оцененных на «отлично» и «хорошо», возросло до 598,93 км (на 5,8 %),

число километров с оценкой «удовлетворительно» уменьшилось до 982,05 км (или на 2,2 %). А количество километров, не соответствующих условиям приемки, составило 399,02 км (или 20,2 %).

Приемка километров после выполнения планово-предупредительной выправки по измененным требованиям приемки ТУ-75р, изложенным в распоряжении ОАО «РЖД» от 31 декабря 2019 г. № 3146/р [14], позволяет принимать километры по результатам двух проходов путеизмерительного вагона с оценкой «отлично» при отсутствии отступлений второй степени, с оценкой «хорошо» — до 20 % от норматива таблицы 7.5 ТУ-75р (норматив — более 25 шт/км для путей 1 и 2 класса, более 30 шт/км для путей 3 класса), с оценкой «удовлетворительно» — до 40 % от норматива таблицы 7.5 ТУ-75р, более 40 % — километры с ремонта не принимаются. Исходя из этих условий с оценкой «отлично» сразу после ремонта могут быть приняты 482,22 км (или 24,4 %), с оценкой

ТАБЛИЦА 2. Приемка пути из ремонта в соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» от 31 декабря 2019 г. № 3146/р

	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Не принято
После приемки, км	482,22	749,98	343,2	404,6
процент	24,4	37,9	17,3	20,4
В декабре 2020, км	598,93	797,47	237,8	345,8
процент	30,2	40,3	12	17,5

«хорошо» — 749,98 км (или 37,9 %), с оценкой «удовлетворительно» — 343,2 км (или 17,3 %), не подлежат приемке 404,6 км (или 20,4 %) (табл. 2). В конце года километры, на которых выполнена планово-предупредительной выправка, получили оценку «отлично» — 598,93 км (или 30,2 %), «хорошо» — 797,47 км (или 40,3 %), «удовлетворительно» — 237,8 км (или 12,0 %). Не подлежат приемке 345,8 км (или 17,5 %).

Выводы

1. Необходим пересмотр основных и дополнительных критериев назначения ППВ, с отражением в них различных условий эксплуатации (линий высокоскоростного и скоростного движения, особо грузонапряженных и грузовых направлений и т. д.).

2. Назначение планово-предупредительной выправки пути необходимо осуществлять с учетом фактического состояния участка пути и мониторинга накопления отступлений.

3. Осуществлять прием километров железнодорожного пути из ремонтов в соответствии с требованиями нормативных документов федерального уровня и ОАО «РЖД».

Библиографический список

1. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути. Утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» 18 января 2013 г. № 75р. — 236 с.
2. Приказ Министерства транспорта РФ от 9 февраля 2018 г. № 54 «О внесении изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации от 21 декабря 2010 г. № 286». — 79 с.

3. Азаренков В. Н. О единой комплексной оценке объектов инфраструктуры / В. Н. Азаренков, А. С. Гапоненко // Путь и путевое хозяйство. — 2014. — № 2. — С. 20–22.

4. Руководство по комплексной оценке состояния участка (километра) на основе данных средств диагностики и генеральных осмотров пути. Утверждено Распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2009 г. № 2536р. — 29 с.

5. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены Приказом Минтранса России от 21 декабря 2010 г. № 286. — М., 2011. — 255 с.

6. Богданович В. А. Планово-предупредительная выправка пути на Октябрьской дороге на службе путевому хозяйству / В. А. Богданович // Путь и путевое хозяйство. — 2007. — № 1. — С. 1–5.

7. Гапоненко А. С. Состояние пути и риски нарушения плавности хода поездов / А. С. Гапоненко // Путь и путевое хозяйство. — 2016. — № 7. — С. 20–23.

8. Гапоненко А. С. Диагностика плавности хода и уровня комфорта пассажиров на участках обращения пассажирских поездов / А. С. Гапоненко // Путь и путевое хозяйство. — 2019. — № 4. — С. 8–12.

9. Киселев А. А. Влияние геометрических параметров железнодорожного пути на величину эквивалентной конусности колесной пары / А. А. Киселев, Л. С. Блажко, А. В. Романов, А. С. Гапоненко // Известия ПГУПС. — 2019. — Т. 16. — № 2. — С. 202–211.

10. Ермаков В. М. Эффективность укладки геотекстиля / В. М. Ермаков, Л. С. Блажко, М. В. Бушуев // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 3. С. 5–8.

11. Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного

вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов. Утверждена МПС РФ 14 октября 1997 г. М.: Транспорт, 1999. — 44 с.

12. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов. Утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» от 28 февраля 2020 г. № 436р.

13. Инструкция о порядке комплексного контроля путеизмерительными средствами железнодорожного пути для информационного обеспечения решения задач путевого хозяйства ОАО «РЖД». Утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» от 16 июля 2013 г. № 1566р. — 32 с.

14. «О внесении изменений в Технические условия на работы по реконструкции и ремонту железнодорожного пути». Утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» 31 декабря 2019 г. № 1346/р. — 10 с.

Дата поступления: 15.02.2022

Решение о публикации: 02.03.2022

Контактная информация:

ГАПОНЕНКО Александр Сергеевич — канд. техн. наук, доцент; gaponenkoalexandr@mail.ru

БУШУЕВ Михаил Владимирович — канд. техн. наук, доцент; 8921918@mail.ru

Approaches in the Planning of Planned-Preventive Setup and Evaluation of Rail Way State

A. S. Gaponenko, M. V. Bushuev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Gaponenko A. S., Bushuev M. V. Approaches in the Planning of Planned-Preventive Setup and Evaluation of Rail Way State // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 7–16. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-7-16

Summary

Purpose: The research of the matters of planning of planned-preventive setup of a rail way and the analysis of rail track geometry condition before and after the pursuing of the setup basing on data of track measuring car passage have shown that existing criteria of the assignment of track planned-preventive setup do not consider exploitation conditions and their reconsideration is demanded. **Methods:** Statistical methods were used in research pursuing on the matters of planning and evaluation of railway track condition after work fulfillment on planned-preventive setup. Data sampling and analysis of statistical observations have allowed to distinguish applied approaches in the planning of track planned-preventive setup for various exploitation conditions. Grouped in dynamics rows furbished kilometers were evaluated according to the indicators: second degree retreat presence, rail track geometry state estimation before and after repairs and by the end of repairs year. **Results:** The discrepancies with established criteria were identified at planning on including of kilometers into address plan of track planed-preventive setup, the data on work accomplishment quality and rail way state changes during the first year after repairs were obtained. **Practical importance:** Research results confirm the necessity to reconsider the criteria for track planed-preventive setup assignment with the distinguishing there separately the main and additional criteria in dependence of exploitation conditions. It's necessary to pursue railway track inspection in accordance with normative document requirements of federal level and JSC RZD.

Keywords: Track repairs, work planning on a way, inter-repairs scheme, work inspection after track repairs, assignment criteria, planned-preventive setup, evaluation by points, track condition evaluation.

References

1. *Tekhnicheskie usloviya na raboty po rekonstruktsii (modernizatsii) i remontu zheleznodorozhnogo puti. Utverzhdeny Rasporyazheniem OAO "RZhD" 18 yanvarya 2013 g. № 75r*. [Specifications for work on the reconstruction (modernization) and repair of the railway track. Approved by Order of Russian Railways on January 18, 2013 No. 75r]. 236 p. (in Russian)
2. *Prikaz Ministerstva transporta RF ot 9 fevralya 2018 g. № 54 "O vnesenii izmeneniy v Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznikh dorog Rossiyskoy Federatsii ot 21 dekabrya 2010 g. № 286"* [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of February 9, 2018 No. 54 "On Amendments to the Rules for the Technical Operation of Railways of the Russian Federation of December 21, 2010 No. 286"]. 79 p. (in Russian)
3. Azarenkov V. N. O edinoi kompleksnoy otsenke ob'ektov infrastruktury [On a single comprehensive assessment of infrastructure facilities]. *Put' i putevye khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2014, I. 2, pp. 20–22. (in Russian)
4. *Rukovodstvo po kompleksnoy otsenke sostoyaniya uchastka (kilometra) na osnove dannykh sredstv diagnostiki i general'nykh osmotrov puti. Utverzhdeno Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 14 dekabrya 2009 g. № 2536r* [Guidelines for a comprehensive assessment of the state of the section (kilometer) based on the data of diagnostic tools and general inspections of the track. Approved by Order of Russian Railways dated December 14, 2009 No. 2536r]. 29 p. (in Russian)
5. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznikh dorog Rossiyskoy federatsii. Utverzhdeny Prikazom Mintransa Rossii ot 21 dekabrya 2010 g. № 286* [Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation. Approved by Order of the Ministry of Transport of Russia dated December 21, 2010 No. 286]. Moscow, 2011. 255 p. (in Russian)
6. Bogdanovich V. A. Planovo-predupreditel'naya vypravka puti na Oktyabr'skoy doroge na sluzhbe putevomu khozyaystvu [Planned and preventive alignment of the track on the Oktyabrskaya road in the service of the track facilities]. *Put' i putevye khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2007, I. 1, pp. 1–5. (in Russian)
7. Gaponenko A. S. Sostoyanie puti i riski narusheniya plavnosti khoda poezdov [The state of the track and the risks of disturbing the smooth running of trains]. *Put' i putevye khozyaystvo* [Way and track management]. 2016, I. 7, pp. 20–23. (in Russian)
8. Gaponenko A. S. Diagnostika plavnosti khoda i urovnya komforta passazhirov na uchastkakh obrashcheniya passazhirskikh poezdov [Diagnostics of ride smoothness and comfort level of passengers in the areas of passenger train circulation]. *Put' i putevye khozyaystvo* [Way and track management]. 2019, I. 4, pp. 8–12. (in Russian)
9. Kiselev A. A. Vliyaniye geometricheskikh parametrov zheleznodorozhnogo puti na velichinu ekvivalentnoy konusnosti kolesnoy pary [Influence of the geometrical parameters of the railway track on the value of the equivalent taper of the wheelset]. *Izvestiya PGUPS* [Izvestiya PGUPS]. 2019, V. 16, I. 2, pp. 202–211. (in Russian)
10. Ermakov V. M. Effektivnost' ukladki geotekstilya [Efficiency of geotextile laying]. *Put' i putevye khozyaystvo* [Way and track management]. 2008, I. 3, pp. 5–8. (in Russian)
11. *Instruktsiya po rasshifrovke lent i otsenke sostoyaniya rel'sovoy kolei po pokazaniyam puteizmeritel'nogo vagona TsNII-2 i meram po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov. Utverzhdena MPS RF 14 oktyabrya 1997 g.* [Instructions for deciphering the tapes and assessing the state of the rail track according to the indications of the TsNII-2 track measuring car and measures to ensure the safety of train traffic. Approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation on October 14, 1997]. Moscow: Transport Publ., 1999. 44 p. (in Russian)
12. *Instruktsiya po otsenke sostoyaniya rel'sovoy kolei puteizmeritel'nyimi sredstvami i meram po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov. Utverzhdena Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 28 fevralya 2020 g. № 436r* [Instructions for assessing the state of the rail gauge by means of track measuring equipment and measures to ensure the safety of train traffic. Approved by Order of Russian Railways JSC dated February 28, 2020 No. 436r]. (in Russian)

13. *Instruktsiya o poryadke kompleksnogo kontrolya puteizmeritel'nyimi sredstvami zheleznodorozhnogo puti dlya informatsionnogo obespecheniya resheniya zadach putevogo khozyaystva OAO "RZhD". Utverzhdena Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 16 iyulya 2013 g. № 1566r* [Instructions on the procedure for integrated monitoring of railway tracks by track measuring equipment for information support for solving the problems of the track facilities of Russian Railways. Approved by Order of Russian Railways dated July 16, 2013 No. 1566r.]. 32 p. (in Russian)

14. *"O vnesenii izmeneniy v Tekhnicheskie usloviya na raboty po rekonstruktsii i remontu zheleznodorozhnogo puti". Utverzhdeny Rasporyazheniem OAO "RZhD" 31 dekabrya*

2019 g. № 1346/r ["On Amendments to the Specifications for Work on the Reconstruction and Repair of the Railway Track". Approved by Order of Russian Railways on December 31, 2019 No. 1346/r]. 10 p.

Received: February 15, 2022

Accepted: March 2, 2022

Author's information:

Alexander S. GAPONENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; gaponenkoalexandr@mail.ru

Mikhail V. BUSHUEV — PhD in Engineering, Associate Professor; 8921918@mail.ru

УДК 624.19:625.1-697.9

Численное моделирование аэродинамических процессов движения воздушных масс в тоннелях метрополитена с учетом «поршневого» воздействия подвижного состава

Д. Д. угли Каримов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Каримов Д. Д. угли. Численное моделирование аэродинамических процессов движения воздушных масс в тоннелях метрополитена с учетом «поршневого» воздействия подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 17–27. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-17-27

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос, является ли верификация численной модели воздухообмена при движении поезда в тоннеле метрополитена, учитывающей процесс взаимодействия штатной вентиляции с поршневым эффектом вытесняемой воздушной среды, корпусом движущегося состава. **Методы:** Сканирование и обработка данных. В качестве оборудования использовалась трубка Пито напорная цилиндрическая PFM 2 для измерения дифференциального давления и измерения скорости потока воздуха, объемного потока и температуры. **Результаты:** Установлена динамическая структура возмущенной текучей среды в момент прибытия состава и его отправления. **Практическая значимость:** Определены факторы конструктивных решений порталной части тоннеля, влияющие на процесс воздухообмена при совместном действии вентиляции и поршневого эффекта движущихся поездов.

Ключевые слова: Поршневой эффект, трубка Пито напорная цилиндрическая PFM, шкафы СЦБ, CFD-моделирование, поле давления, анемометр, температура воздуха.

В работе представлены результаты математического CFD-моделирования аэродинамических процессов формирования «поршневого» эффекта, образующегося при движении поезда в тоннеле метрополитена. Определена структура и параметры динамики движения возмущенной воздушной среды при проходе поезда в районе рамповых и порталных участков при различных схемах воздухообмена системы вентиляции.

В процессе движения поездов в тоннелях метрополитена возникает сложный режим воздухообмена по длине состава. Под воздействием движущихся корпусных элементов поезда происходит вытеснение объемов воздушных масс с

образованием локальных фронтов сжатого и разреженного воздуха. При условии постоянного значения коэффициента блокирования тоннеля, формы и шероховатости поверхности обделки, параметры сжатого и разреженного объемов можно считать относительно постоянными. Поэтому наибольший интерес вызывает участок движения состава в районе конфузورных участков порталной части тоннеля. Процесс еще более усложняется при взаимодействии с активно действующей вентиляцией.

Непосредственный мониторинг аэродинамических процессов сопряжен с рядом сложностей организационно-технического характера,

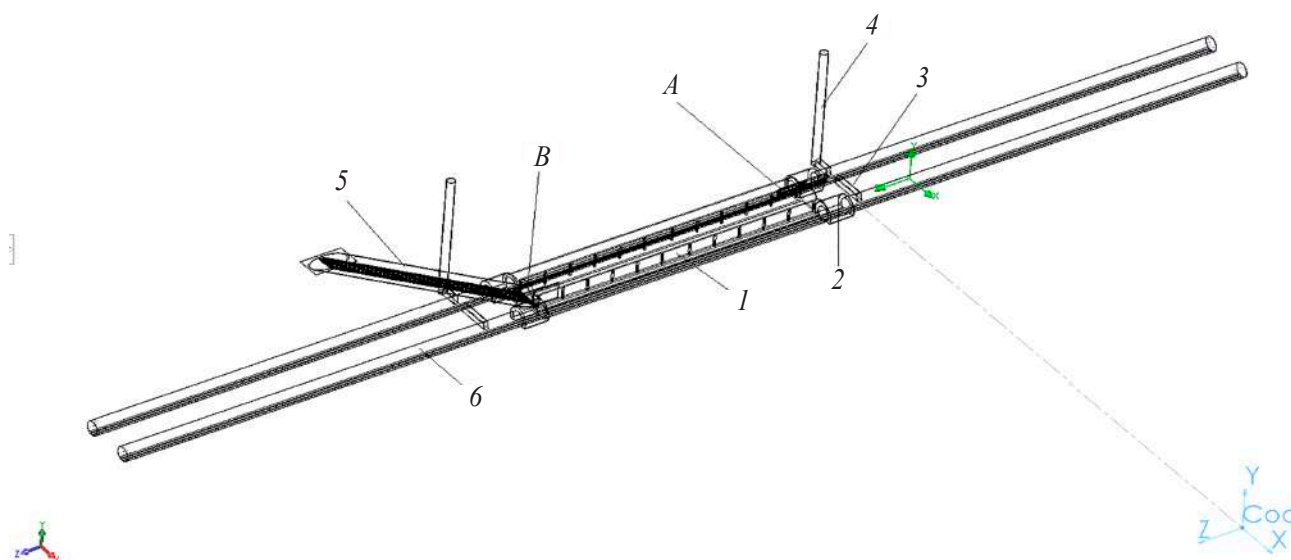


Рис. 1. Элементы станционного узла [1–5]:

1 — рамповый участок, 2 — порталы, 3 — штольня, 4 — станционная камера тоннельной вентиляции, 5 — порталный участок, эскалаторный тоннель, 6 — путевой тоннель;
A, B — точки съема информации аэродинамической нагрузки



Рис. 2. Трубка
Пито напорная
цилиндрическая
PFM 2

в связи с чем рассматривается вариант гибридной модели на основе CFD-модели, построенной в среде FlowSimulation программного комплекса Solid-Works, с использованием уточняющих характеристик, полученных в натурном эксперименте. С этой целью разработана модель типового станционного комплекса глубокого заложения, оснащенная двумя вентиляционными стволами 4 (рис. 1) реверсивной приточно-аспирационной установки. За прототип поезда принята модель 81-740/741

«Русич» производства ОАО «Метровагонмаш».

Информационная модель сложного объекта чаще всего выполняется с определенным упрощением — редуцированием (процедура сниже-

ния размерности решаемой задачи в соответствии с ресурсами существующих технических средств). В частности, редуцирование предполагает изъятие из описания реального прототипа определенных, несущественных компонентов, не оказывающих значительного влияния на основные функции изучаемого объекта.

Установлены следующие допущения: из расчета исключены элементы железнодорожного пути, помещения тягово-понижительной электроподстанции, шкафы СЦБ, подплатформенное пространство со служебными помещениями, вентиляторные устройства представлены виртуальными объектами.

В качестве оборудования использовалась трубка Пито напорная цилиндрическая PFM 2 (рис. 2) — для измерения дифференциального давления и измерения скорости потока воздуха, объемного потока и температуры.

Устройство воспринимает полное давление текучей среды отверстием в торце изогнутой трубки, статическое давление — отверстиями в

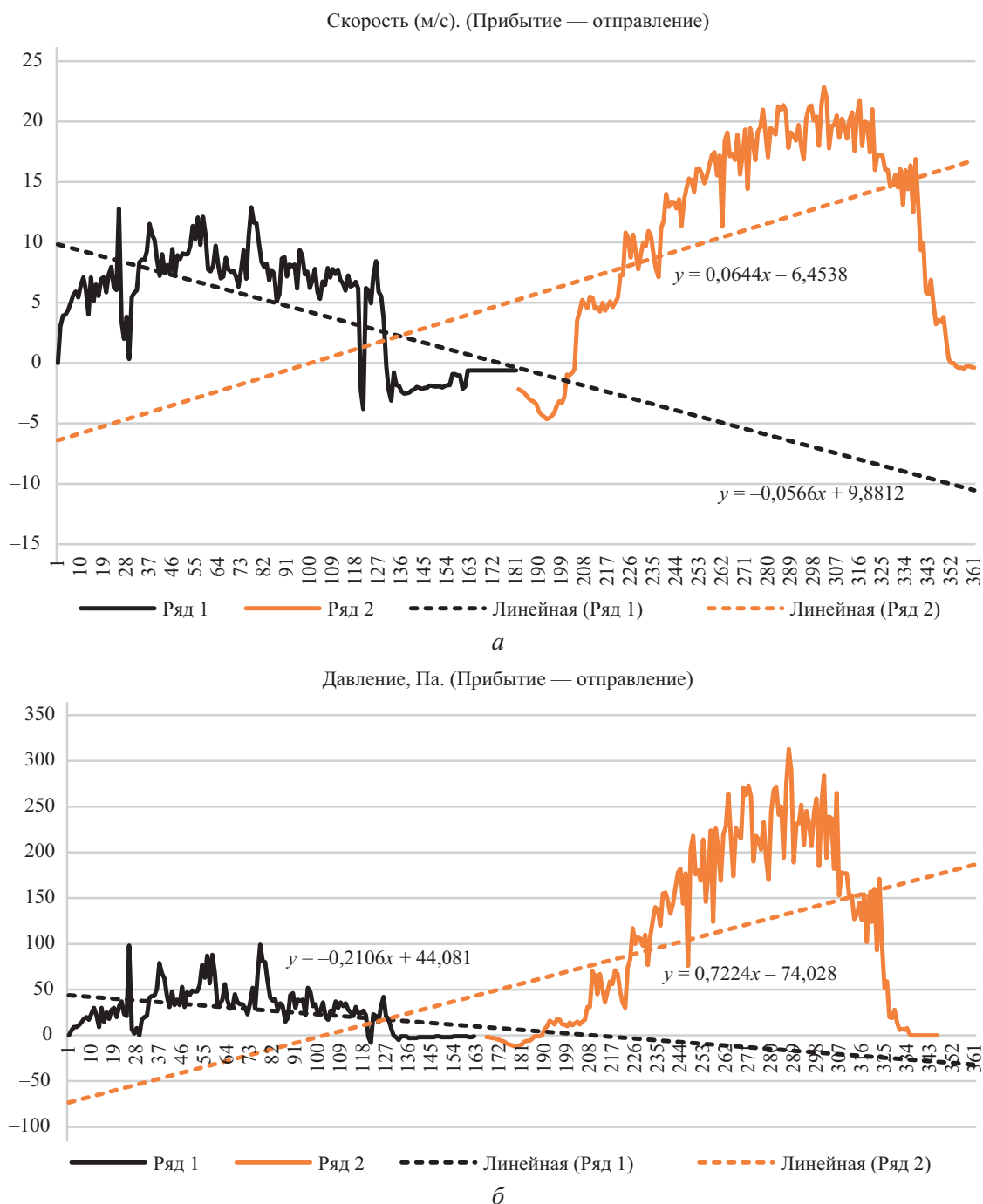


Рис. 3. Показания скорости a и избыточного давления b воздушного потока, инициированного поездом: торможение состава 40–0 км/ч — черный; разгон состава 0–60 км/ч — красный

стенке внешней трубки. Анемометр имеет встроенный блок автономной памяти на 99 значений для каждого параметра, и USB-адаптер для соединения с компьютером.

Натурный эксперимент по определению динамических параметров воздушной среды

выполнялся в рекреации посадочного вестибюля станции «Ленинский проспект» в крайних точках платформы: точка A (рис. 1) — прибытие поезда, точка B — отправление. Высота положения воздухозаборная оборудования — 1,2 м над уровнем ramпы.

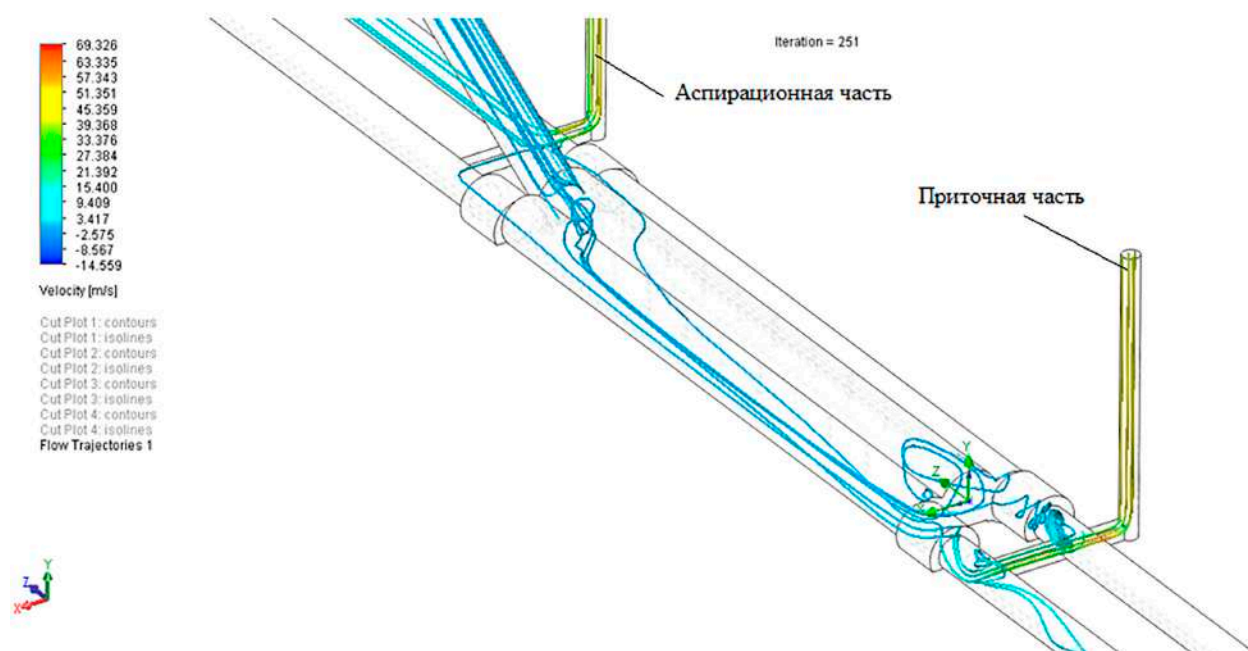


Рис. 4. Эпюра траекторий движения воздушных потоков от нагнетающего вентилятора до аспирационного

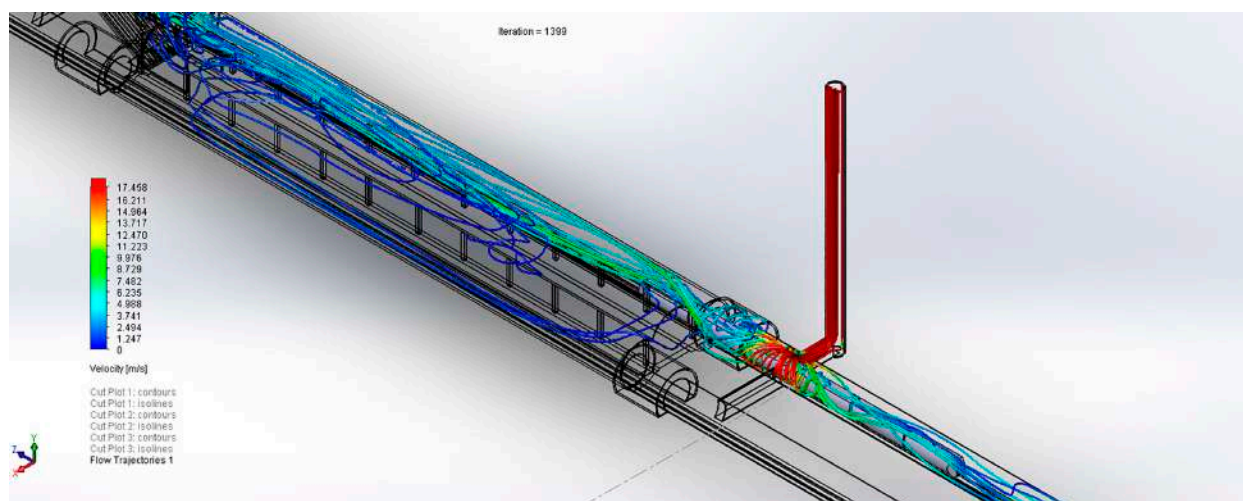


Рис. 5. Эпюра траекторий движения воздушных потоков с учетом поршневого действия поезда и работы вентиляции

CFD-моделирование газодинамических процессов в характерных участках станционного комплекса метрополитена

Для оценки поршневого действия поезда вначале выполняется CFD-моделирование состояния среды при работе только станционного вентиляционного оборудования (рис. 4).

В качестве граничных условий на торцевых сечениях тоннелей и эскалаторного наклонного хода применены следующие параметры среды: давление — 101 395 Па, температура — 20 °С, начальная скорость воздушной среды — 0 м/с. Параметры приточно-аспирационной вентиляции: давление в приточной зоне — 105–725 Па,

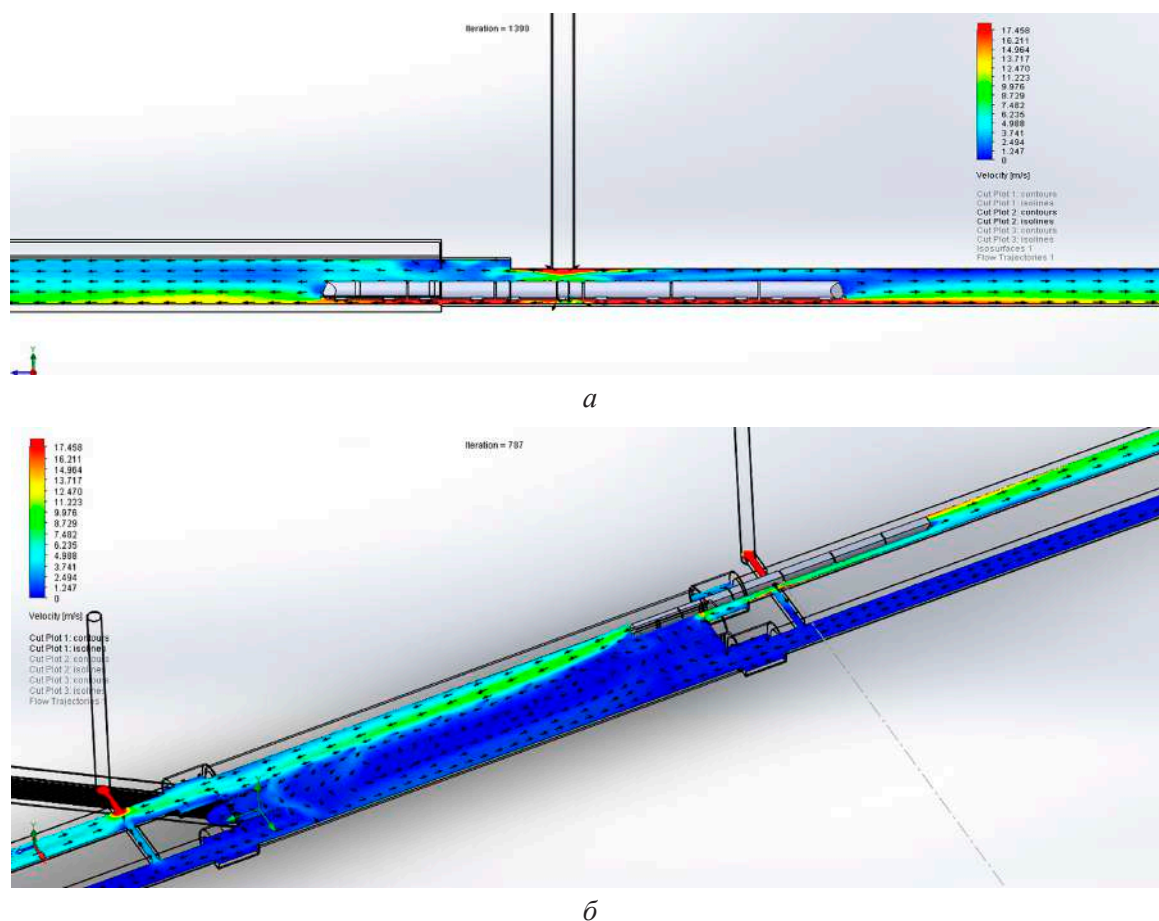


Рис. 6. Эпюры распределения скоростей текучей среды (прибытие поезда): сечение по оси симметрии поезда в вертикальной плоскости *a*; сечение в горизонтальной плоскости *б*

аспирационной — 97 925 Па, температура среды — 20 °С.

По результатам численного моделирования установлено, что наиболее интенсивные вихревые образования формируются непосредственно на порталных участках сопряжения тоннелей со станционным залом, где конструкция тоннеля образует резкое изменение поперечного сечения — конфузор. Скорость потока находится в пределах 2–9 м/с.

Численное моделирование процесса воздухообмена с учетом движения состава выполнена с применением функции *motionrealwall* (движущаяся реальная стена) модуля *FlowSimulation*, реализующей принцип вытеснения объемов

воздушной среды корпусом подвижного состава. В условиях сопротивления зазора (поезд — тоннель) объемы уплотненной воздушной среды смещаются обтекателем со скоростью движения поезда, создавая таким образом «поршневой» эффект.

В модели дополнительно к существующим граничным условиям (вентиляция) добавлены опции *realwall*, *wallmotion*: режим торможения состава — 40–0 км/ч; режим разгона состава — 0–60 км/ч. Рассматривается момент выхода поезда из портала тоннеля.

На рис. 5 представлена эпюра траекторий движения воздушных потоков при работе станционного вентиляционного оборудования с учетом поршневого действия поезда.

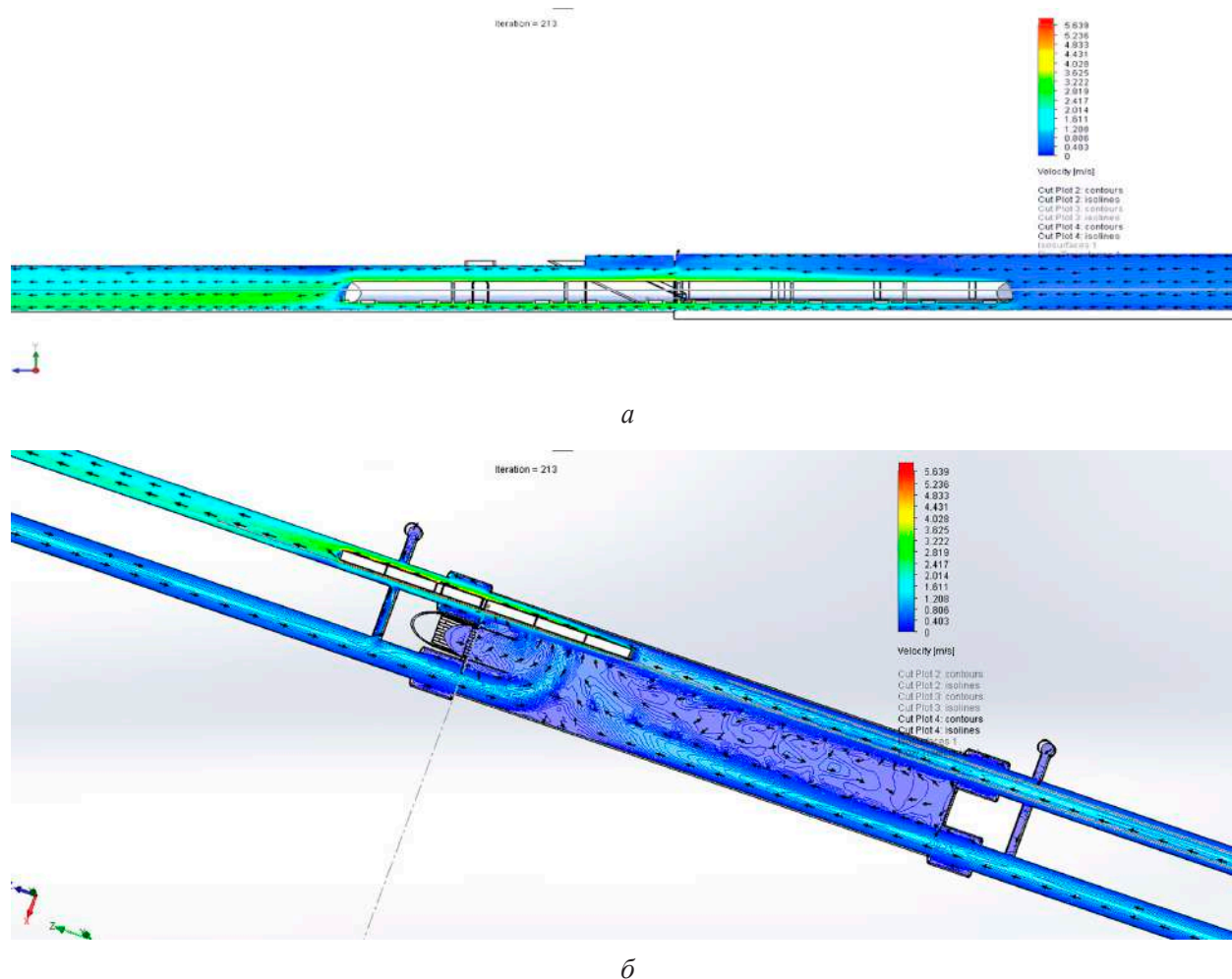


Рис. 7. Эпюра распределения скоростей текучей среды (отправление поезда): сечение по оси симметрии поезда в вертикальной плоскости *a*; сечение в горизонтальной плоскости *б*

Согласно эпюре траекторий перемещение основных объемов воздушной среды происходит в пределах объема путевой части тоннеля с частичным выходом на рамповую часть. Максимальная турбулентность наблюдается в пределах порталной части тоннеля.

Эпюра распределения скоростей текучей среды (рис. 6, 7), построенная по оси симметрии поезда, отражает структуру распределения скоростей в перемещаемом объеме уплотненной воздушной среды «поршневого» эффекта [6, 7].

На эпюре четко просматривается «факел» поршневого эффекта, образующийся перед поездом, и его частичная деформация за счет взаимодействия с тоннельной вентиляцией.

На эпюре представлен процесс увеличения поездом обширных объемов воздушных масс в процессе отправления со станции и входа в тоннель, а также образование поршневого эффекта перед головным вагоном.

Параметры изменения состояния воздушной среды определялись по линии, построенной параллельно движению состава в плоскости, расположенной на дистанции 1,2 м над уровнем рампы вестибюля. Таким образом, моделируется процесс получения данных при проходящем поезде (рис. 8).

Валидация разработанной модели выполнена согласно теории вероятности и математической статистике [8, 9] по обработке результатов пря-

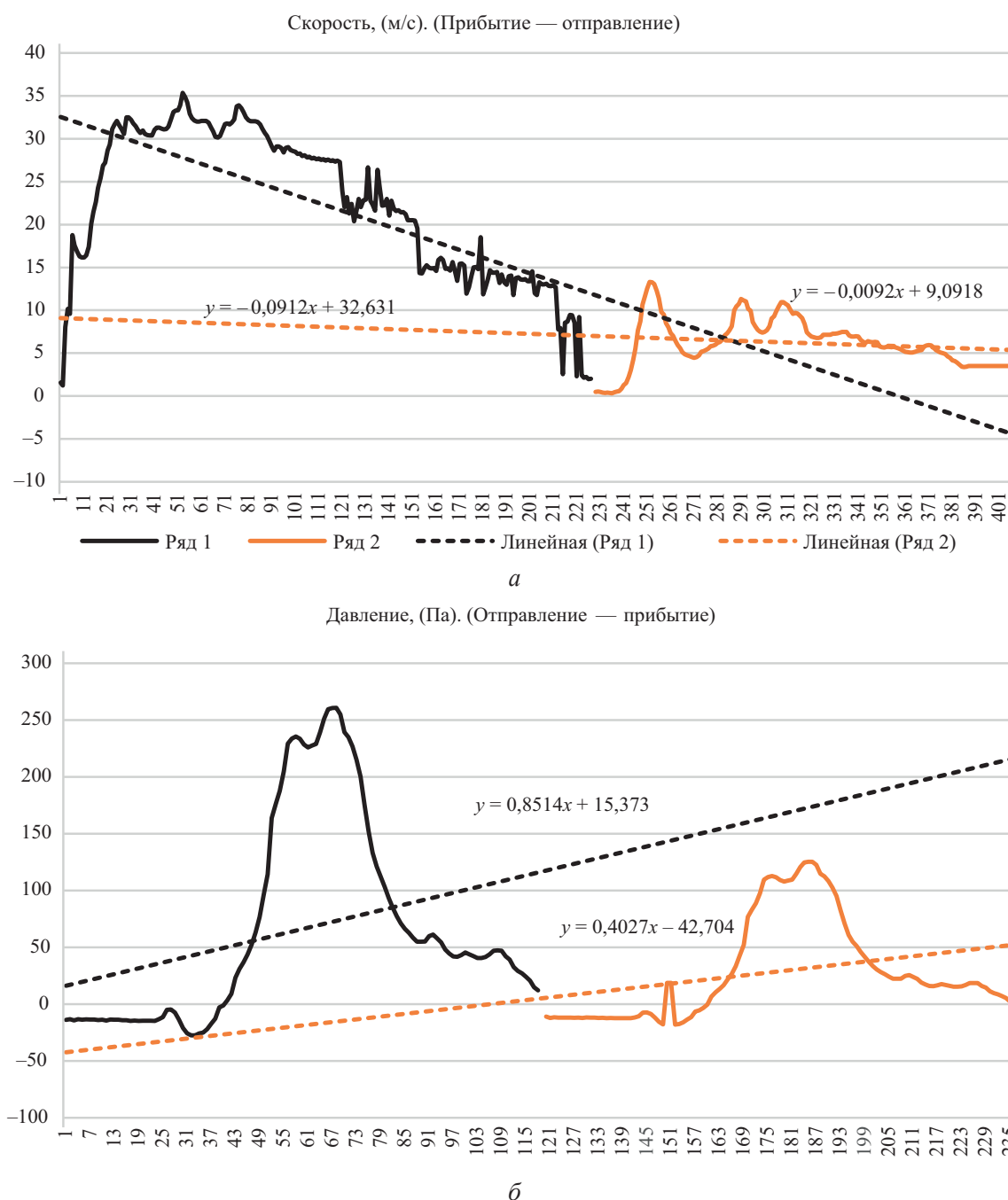


Рис. 8. Результаты численного эксперимента скорости а и избыточного давления б:
торможение состава 40–0 км/ч — черный; разгон состава 0–60 км/ч — красный

мых измерений. Данные по однофакторному анализу приведены в табл. 1 — прибытие состава и табл. 2 — отправление состава.

По критерию скорости текучей среды фактическое значение отношения Фишера (12,15) больше критического (3,86), с вероятностью 95 % отклоняется нулевая гипотеза о равенстве

средних данных реального объекта и модели, то есть модель с достаточной точностью описывает поведение реального процесса. По критерию давления текучей среды условие не выполняется.

По критерию скорости текучей среды фактическое значение отношения Фишера (1153,26) больше критического (3,870682), с вероятностью

ТАБЛИЦА 1. Однофакторный анализ результатов измерений

Режим «Прибытие состава» (черный цвет — объект, красный цвет — модель)

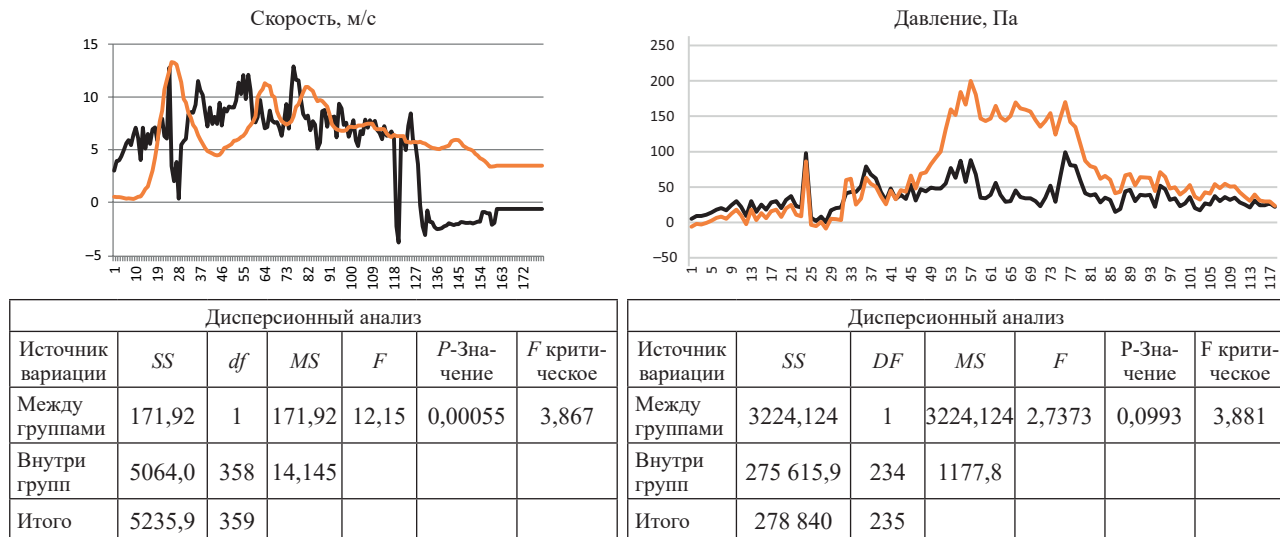
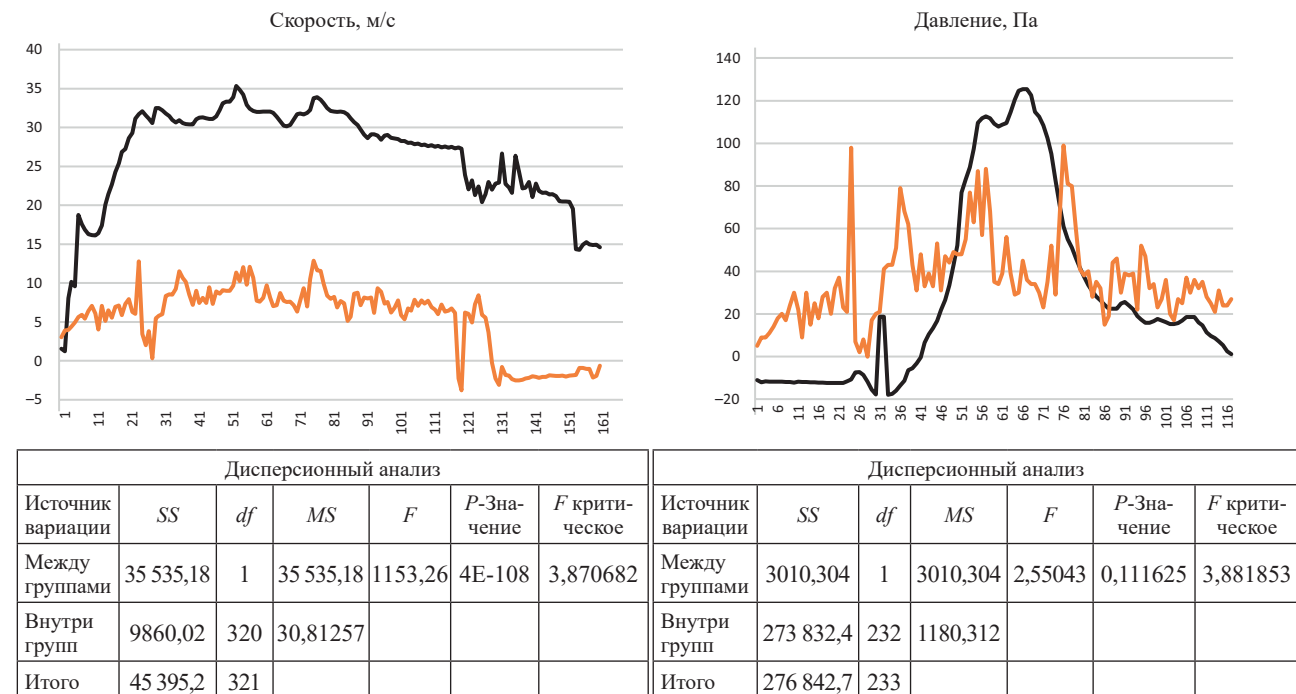


ТАБЛИЦА 2. Однофакторный анализ результатов измерений

Режим «Отправление состава» (черный цвет — модель, красный цвет — объект)



95 % отклоняется нулевая гипотеза о равенстве средних данных реального объекта и модели, то есть модель с достаточной точностью описывает поведение реального процесса. По критерию давления текучей среды условие не выполняется.

Невыполнение условия превышения отношения Фишера по критерию давления объясняется неполными сведениями натурного эксперимента: отсутствует компонента статического давления (трубка Пито не измеряет статическое давление).

Эффект от поршневого действия поезда значительно изменяет структуру распределения воздухообмена в помещениях метрополитена: изменяются объемы, давления, скорости течения воздушных масс по модифицированным трассам. К негативным свойствам данного явления следует отнести определенное повышение энергопотребления за счет увеличения аэродинамического сопротивления передвижению состава, в то же время периодическое преобладание импульсной продувки тоннелей за счет «поршневого» эффекта можно считать положительным свойством для улучшения показателей воздухообмена.

Выводы

1. Разработана математическая модель совместной работы станционной системы вентиляции и «поршневого» эффекта движущихся поездов.
2. Выполнена валидация модели на основе данных, полученных в ходе натурного эксперимента.
3. Установлена динамическая структура возмущенной текучей среды в момент прибытия состава и его отправления.
4. Определены факторы конструктивных решений порталной части тоннеля, влияющие на процесс воздухообмена при совместном действии вентиляции и поршневого эффекта движущихся поездов.
5. Путем анализа результатов численного CFD-моделирования получены параметры поршневого действия поезда: поле давления, скорости перед и за поездом.
6. Установлено, что эффективная длина «поршневого» эффекта, способного создавать дискомфорт для пассажиров, находящихся на перроне станции, составляет 20–25 м, скорость движения воздушных масс при этом достигает 15 м/с.

Библиографический список

1. Бамтоннельпроект. Объекты. — URL: <http://www.btpnsk.ru/objects>.
2. Гендлер С. Г. Исследование вентиляционного и теплового режимов Лысогорского железнодорожного тоннеля / С. Г. Гендлер, В. В. Смирняков, А. Н. Соловьев // ГИАБ. — 2006. — № 3. — С. 133–145.
3. Гендлер С. Г. Выбор рациональной схемы проветривания Кузнецовского железнодорожного тоннеля / С. Г. Гендлер, В. А. Плескунов // ГИАБ. — 2009. — Отдельный выпуск № 13: Аэрология. — С. 81–89.
4. Гендлер С. Г. Проблемы проветривания транспортных тоннелей / С. Г. Гендлер // ГИАБ. Тематическое приложение «Безопасность». — 2005. — С. 281–295.
5. Проектная документация. Строительство нового Байкальского тоннеля на перегоне Дельбичинда — Дабан Восточно-Сибирской железной дороги. Раздел 3. Технологические и конструктивные решения линейного объекта. Искусственные сооружения. — ОАО «СтройТрест». — 2014.
6. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 562 с.
7. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 464 с.
8. Бурнаева Э. Г. Статистический пакет анализа данных в Excel 2013: учебное пособие / Э. Г. Бурнаева, С. Н. Леора. — СПб.: СПбГУ, 2020. — 40 с.
9. Бараз В. Р. Использование MS Excel для анализа статистических данных: учебное пособие / В. Р. Бараз, В. Ф. Пегашкин; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). — 2-е изд., перераб. и доп. — Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2014 — 181 с.

Дата поступления: 02.02.2022

Решение о публикации: 21.02.2022

Контактная информация:

КАРИМОВ Дастонбек Давронбой угли — аспирант;
dostonkarimov325@gmail.com

Numerical Simulation of Aerodynamic Processes of Air Mass Movement in Underground Tunnels Taking into Account Piston Impact of Rolling Stock

D. D. ugli Karimov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Karimov D. D. ugli. Numerical Simulation of Aerodynamic Processes of Air Mass Movement in Underground Tunnels Taking into Account Piston Impact of Rolling Stock // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 17–27. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-17-27

Summary

Purpose: To consider the issue on verification of numerical model of air exchange during the movement of a train in a subway tunnel, taking into account the process of interaction of regular ventilation with the piston effect of the displaced air by the body of the moving train. **Methods:** Data scanning and processing. The equipment used was a pressure cylindrical Pitot tube PFM 2 for measuring differential pressure and air flow velocity, volumetric flow and temperature. **Results:** The dynamic structure of disturbed fluid media at the time of rolling stock arrival and departure has been established. **Practical importance:** Factors of design solutions of tunnel portal part affecting the process of air exchange at the combined work of ventilation and piston effect of moving trains have been determined.

Keywords: Piston effect, Pitot cylindrical pressure tube PFM, SCB cabinets, CFD modeling, pressure field, anemometer, air temperature.

References

1. *Bamtonnel'proekt. Ob"ekty* [Bamtunnel project. Objects]. Available at: <http://www.btpnsk.ru/objects>. (in Russian)
2. Gendler S. G. Issledovanie ventilyatsionnogo i teplovogo rezhimov Lysogorskogo zheleznodorozhnogo tonnelya [Study of the ventilation and thermal regimes of the Lysogorsk railway tunnel]. *GIAB* [GIAB]. 2006, I. 3, pp. 133–145. (in Russian)
3. Gendler S. G. Vybór ratsional'noy skhemy provetrivaniya Kuznetsovskogo zheleznodorozhnogo tonnelya [The choice of a rational ventilation scheme for the Kuznetsovsky railway tunnel]. *GIAB* [GIAB]. 2009, pp. 81–89. (in Russian)
4. Gendler S. G. Problemy provetrivaniya transportnykh tonney [Problems of ventilation of transport tunnels]. *GIAB. Tematicheskoe prilozhenie "Bezopasnost"* [GIAB. Thematic application "Security"]. 2005, pp. 281–295. (in Russian)
5. *Proektnaya dokumentatsiya. Stroitel'stvo novogo Baykal'skogo tonnelya na peregone Del'bichinda — Daban Vostochno-Sibirskoy zheleznoy dorogi. Razdel 3. Tekhnologicheskie i konstruktivnye resheniya lineynogo ob"ekta. Iskusstvennye sooruzheniya* [Design documentation. Construction of a new Baikal tunnel on the Delbichinda-Daban section of the East Siberian Railway. Section 3. Technological and design solutions for a linear facility. Artificial constructions]. "StroyTrest" Publ. 2014. (in Russian)
6. Alyamovskiy A. A. SolidWorks Simulation. *Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2015. 562 p. (in Russian)
7. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation* [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2010. 464 p. (in Russian)

8. Burnaeva E. G. *Statisticheskiy paket analiza dannykh v Excel 2013* [Statistical data analysis package in Excel 2013]. St. Petersburg: SPbGU Publ., 2020. 40 p. (in Russian)

9. Baraz V. R. Ispol'zovanie MS Excel dlya analiza statisticheskikh dannykh [Excel to analyze statistical data]. *M-vo obrazovaniya i nauki RF; FGAOU VPO "UrFU im. pervogo Prezidenta Rossii B. N. El'sina", Nizhnetagil. tekhn. in-t (filial)* [Ministry of Education and Science of the Russian Federation; FGAOU VPO "UrFU im. the first President of Russia

B. N. Yeltsin", Nizhny Tagil. tech. in-t (branch)]. Nizhniy Tagil: NTI (filial) UrFU Publ., 2014. 181 p. (in Russian)

Received: February 2, 2022

Accepted: February 21, 2022

Author's information:

Dostonbek D. KARIMOV — Postgraduate Student;
dostonkarimov325@gmail.com

УДК 656.02

Повышение эффективности функционирования малоинтенсивных линий: постановка задачи и математические модели

К. Е. Ковалёв, А. В. Новичихин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ковалёв К. Е., Новичихин А. В. Повышение эффективности функционирования малоинтенсивных линий: постановка задачи и математические модели // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 28–39. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-28-39

Аннотация

Цель: В статье предложено решение проблемы функционирования малоинтенсивных линий. Рассмотрены положения стратегий развития железнодорожного транспорта на различные горизонты планирования в контексте повышения эффективности функционирования малоинтенсивных линий. Определен механизм оценки по набору показателей и этапам жизненного цикла линий. Сформированы сценарии устойчивого развития малоинтенсивных линий в зависимости от фазы жизненного цикла. Разработан механизм оценки и текущего стимулирования малоинтенсивных линий для поддержания оптимальных значений ключевых параметров. Определены особенности функционирования малоинтенсивных линий на Российских железных дорогах, в части высокой социальной значимости для населения и стратегического значения для государства и корреляции размеров перевозок в регионах и его экономического развития. Предложена математическая постановка задачи эффективного функционирования малоинтенсивных линий на основе ее декомпозиции для определения этапов жизненного цикла. Совершенствована модель управления взаимодействием интенсивных и малоинтенсивных линий посредством методов нечеткого когнитивного моделирования. Представлена укрупненная нечеткая когнитивная карта управления интенсивными и малоинтенсивными линиями. Определены управляющие концепты, оказывающие существенное влияние на объект управления. **Методы:** Применяются методы анализа и синтеза, теория систем, математического моделирования. **Результаты:** Предложено решение проблемы повышения эффективности функционирования малоинтенсивных линий в современных условиях с позиций слабоструктурированных систем. **Практическая значимость:** Представлена математическая постановка задачи функционирования малоинтенсивных линий, которая решается определением этапов жизненного цикла и моделью управления взаимодействием интенсивных и малоинтенсивных линий на основе нечеткого когнитивного моделирования, для применения на практике к существующим малоинтенсивным линиям.

Ключевые слова: Железнодорожный транспорт, подход к управлению, малоинтенсивные линии, управление процессами перевозок, управление перевозками, нечеткие когнитивные карты.

Введение

Проблема убыточности и низкой эффективности работы малоинтенсивными линиями (МИЛ) выделена в стратегиях развития железнодорожного транспорта на разные горизонты планирования (до 2015, 2025, 2030 гг.) [1–4].

Существующие отечественные и зарубежные научные исследования по повышению эффективности работы МИЛ направлены на снижение затрат на ее функционирование за счет использования более универсальных систем контроля местоположения подвижного состава, систем автоматизации и телемеха-

ники и снижение затрат на содержание пути в зависимости от тонно-километров выполненной поездной работы на участке [5–9].

Проблема управления малоинтенсивными линиями (МИЛ), с одной стороны, рассматривается в контексте систем автоматики и телемеханики, где в основном используется жезловая система или полуавтоблокировка — технический аспект. Также рассматривается возможность снижения расходов на эксплуатацию в части перехода на радиотехнические системы управления и радиокоординирование контроля места положения поезда. Технически системы разработаны, но их внедрение связано со значительными затратами на убыточных и низкодоходных МИЛ.

С другой стороны, под управлением МИЛ можно понимать распределение (перераспределение) транспортных потоков на сети с целью оптимального использования существующих железнодорожных линий и повышения их доходности за счет снижения неравномерности и затруднений движения на интенсивных линиях (ИЛ), а также создание устойчивой программы развития транспортной сети — аспект стратегического и инновационного развития. Данное направление недостаточно рассмотрено в научной литературе, поэтому в настоящей работе решаются задачи по повышению эффективности работы МИЛ, а также конкретизации разработанного инструментария для снижения неравномерности перевозочного процесса и увеличения грузопотока на них.

Под МИЛ на основании современных нормативных документов [5] понимается линия с размерами движения не более 8 пар поездов в сутки и грузонапряженность не более 5 млн т-км брутто/км.

Такое определение не в полной мере отображает характер работы, необходимо его конкретизировать в части рентабельности функционирования МИЛ и возможной их клиентоориентированности.

Оценка перспективности использования МИЛ при экономическом росте региона и переходных состояний из МИЛ в ИЛ и другие категории. Управление МИЛ в современных условиях имеет ряд особенно-

стей: 1) социальная потребность и значимость в перевозках у населения, проживающего рядом с МИЛ; 2) стратегическое значение МИЛ; 3) недостаточная эффективность и убыточность МИЛ; 4) корреляция размеров перевозок и экономическое развитие в регионе; 5) балансирование между интересами ОАО «РЖД» и местных органов исполнительной власти.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка алгоритмического обеспечения и моделей функционирования МИЛ для повышения эффективности их эксплуатации и рентабельности. Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач: 1) постановка задачи эффективного функционирования МИЛ; 2) определение механизма оценки по набору показателей и этапам жизненного цикла МИЛ; 3) разработка инструментария для формирования сценариев эффективного функционирования и программы развития МИЛ.

Задачу эффективного функционирования МИЛ можно сформулировать в виде поэтапной многофакторной математической постановки.

1. Математическая постановка задачи эффективного функционирования МИЛ

Необходимо разработать траекторию устойчивого развития и функционирования МИЛ с возможностью их использования для снижения неравномерности перевозок на ИЛ.

Дано: Пусть I набор сценариев функционирования z множества МИЛ, имеющих начальные характеристики показателей на текущем горизонте планирования:

$$I = \{I_z, z \in [1, Z]\}.$$

Развитие МИЛ определяется набором целевых характеристик:

$$F(S) = \{f_k(I), k \in [1, K]\},$$

где k — количество критериев ($K = 3$).

Критериями оптимальности сценариев развития являются:

1. Технологические показатели (скорость, грузонапряженность) — $N_{n,i}(0), n \in N, i \in I$, где N — множество технических показателей.

2. Качественные показатели (густота сети в регионе, реализованность транспортной сети) — $Q_{q,i}(0), q \in Q, i \in I$, где Q — множество качественных показателей.

3. Экономический ущерб компании ОАО «РЖД» от неэффективной эксплуатации МИЛ — $Ep_{j,i}(0), j \in J, i \in I$, где J — множество экономических показателей.

Требуется установить из множества допустимых значений параметров I такие, которые соответствуют оптимальным значениям всех целевых ограничений f_k :

$$f_N^k(I) \rightarrow opt, \text{ при } k \in [1, K];$$

$$f_Q^k(I) \rightarrow opt, \text{ при } k \in [1, K];$$

$$f_J^k(I) \rightarrow \min, \text{ при } k \in [1, K].$$

Сценарий I_1 удовлетворяет условиям, если не существует другого сценария I_2 , имеющего лучшие оценки. На основании целевых функций требуется решение следующих задач:

1. Определить механизм оценки по набору показателей и этапа жизненного цикла МИЛ для прогноза уровня достижения целей на период планирования $t \in [0, T]$.

2. Сформировать сценарии устойчивого развития МИЛ на период планирования $t \in [0, T]$ в зависимости от фазы жизненного цикла МИЛ.

3. Разработать механизм выбора оптимального сценария по набору параметров.

4. Определить программу развития МИЛ на период планирования $t \in [0, T]$.

5. Разработать механизм оценки и текущего стимулирования для управления балансом инте-

ресов развития МИЛ для поддержания оптимальных значений ключевых параметров.

Рассмотрим решение некоторых перечисленных задач (1, 2, 4).

Решение 1. Механизм оценки по набору показателей и этапа жизненного цикла МИЛ для прогноза уровня достижения целей на период планирования $t \in [0, T]$.

Параметры железнодорожной линии на каждом из этапов определяются набором исходных данных для моделей и методов на последующих этапах. Ключевым элементом в определении параметров и показателей траектории эффективного функционирования МИЛ является определение этапа жизненного цикла линии, размеров доходов и расходов на каждом из них.

Определение этапа жизненного цикла позволяет конкретизировать имеющиеся ограничения параметров функционирования линии, к которым можно отнести:

Первый этап — определение потребности в перевозках. На этом этапе необходимо согласование органов местной исполнительной власти и представителей ОАО «РЖД».

Второй этап — разработка и проектирование. Рассмотрим содержимое этого этапа на реальном примере для линии протяженностью 30 км, при наличии 80 стрелок на участке, стоимость проектирования приведена в [6].

Третий этап — строительство.

Четвертый этап — пуско-наладочные работы примерно составляют 10 % от стоимости строительства.

Пятый этап — активная эксплуатация активной эксплуатация железнодорожной линии в соответствии с источником [6], при эксплуатации около 20 лет.

Шестой этап — спад производительности, определение линии к категории МИЛ (убыточных линии) характеризуется изменением

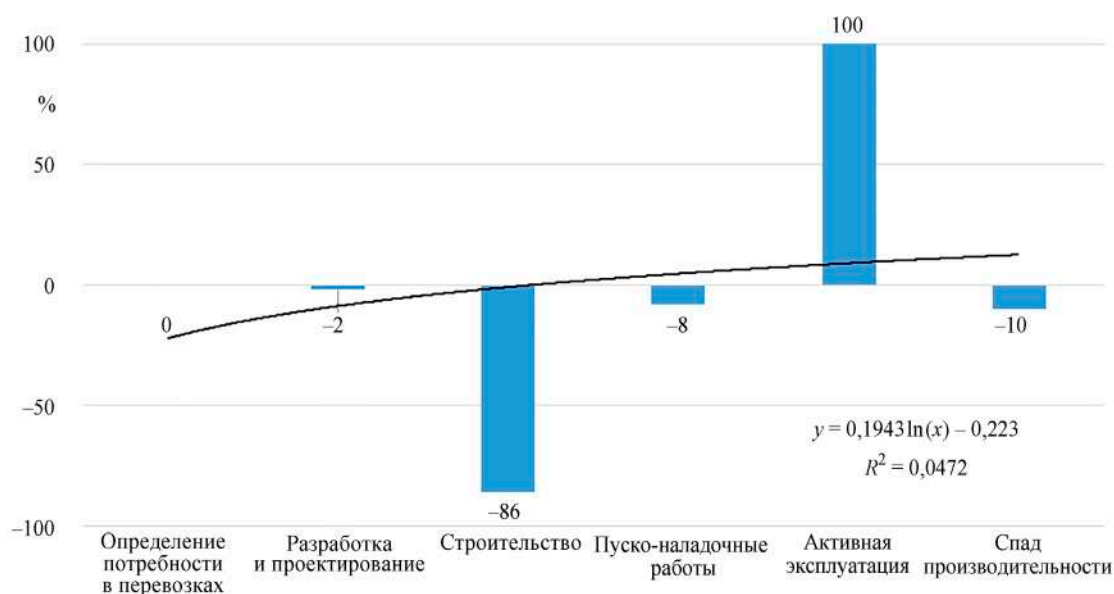


Рис. 1. Этапы жизненного цикла функционирования железнодорожной линии при условии доходности на весь период эксплуатации 10 %

структуры грузопотоков, снижением объемов перевозок на участке и снижением пассажиропотоков.

Установление траектории эффективного функционирования по укрупненным данным на все этапы жизненного цикла при условии доходности линии 10 % за весь период эксплуатации представлен на рис. 1.

Как видно из рис. 1, для достижения доходности на весь период эксплуатации железнодорожной линии, равной 10 %, его затраты на различных этапах жизненного цикла не должны превышать приведенных значений. Логарифмическое уравнение линии тренда примет вид $y = 0,1943 \ln(x) - 0,223$, а величина достоверности аппроксимации составит $R^2 = 0,0472$.

Решение 2. Разработка сценариев эффективного функционирования МИЛ на период планирования $t \in [0, T]$. Посредством математического аппарата взаимодействия интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малоинтенсивных линий (рис. 2) планируется разработка алгоритмов, нормирование весовых значений связей и свойств объектов системы для

установления рекомендаций по строительству новых железнодорожных линий и эксплуатации существующих.

При функционировании системы входным воздействием является потребность в перевозках $x_1(t)$ и другие описываемые параметры $x_2(t)$, $x_3(t)$, результатом функционирования системы являются реализованные перевозки $y_1(t)$ и другие параметры $y_2(t)$, $y_3(t)$. Состояние системы Z есть функция Fc совокупности свойств ее элементов, которую можно представить выражением:

$$Z(t) = Fc(Z_{1A}, Z_{2A}, Z_{1B}, Z_{2B}, Z_{1C}, Z_{2C}, Z_{3C}).$$

Каждый объект системы имеет набор показателей. Для интенсивных линий учитываются приведенная грузонапряженность и техническая скорость, для малоинтенсивных линий — размеры движения и тонно-километры работы, для новых линий — приведенная грузонапряженность, чистый дисконтированный доход и эксплуатационные расходы на обслуживание линии.

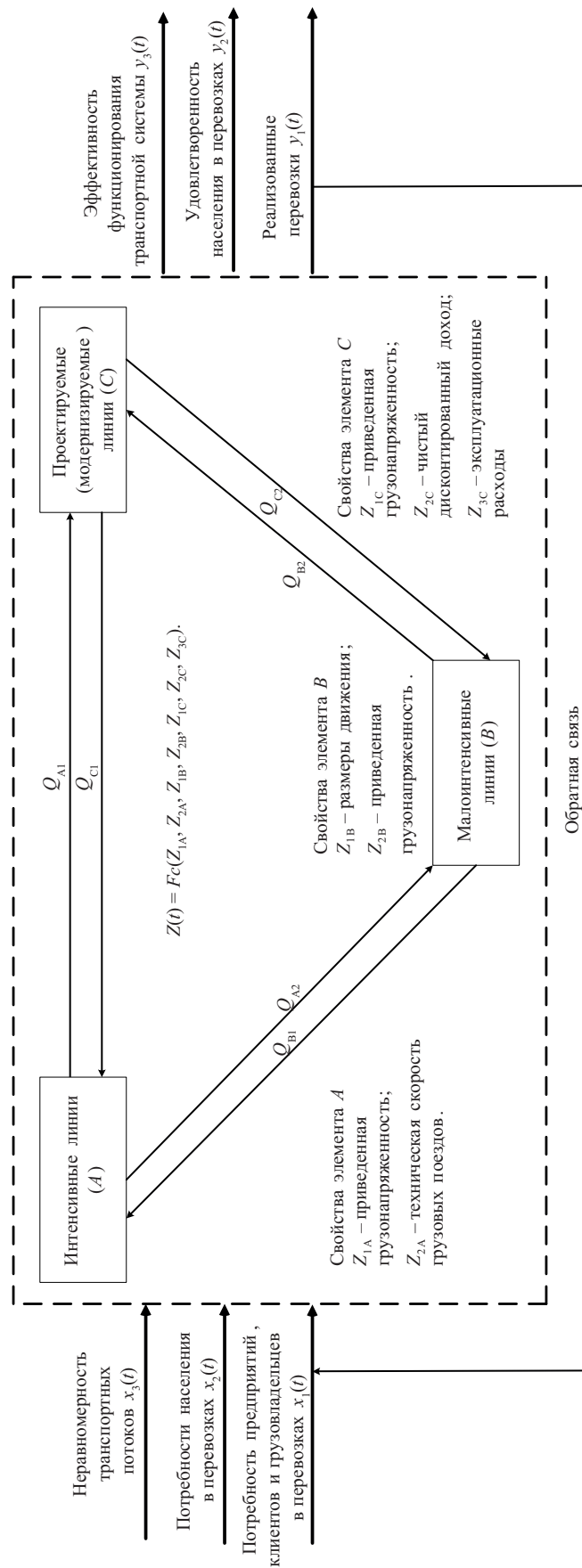


Рис. 2. Схема математической модели взаимодействия интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малоинтенсивных линий

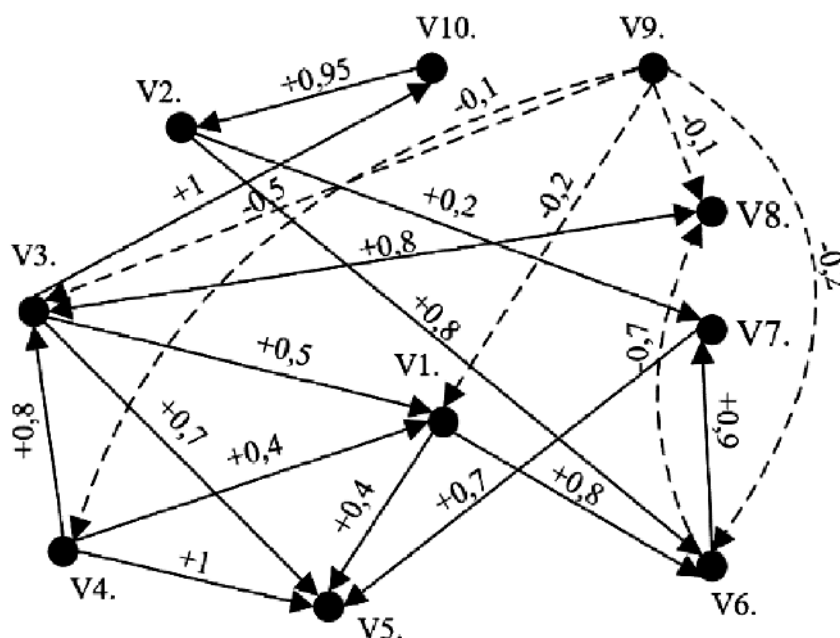


Рис. 3. Увеличенная когнитивная карта управления МИЛ и ИЛ, где $V1$ — взаимодействие и ИЛ и МИЛ; $V2$ — тарифное расстояние перевозки; $V3$ — грузооборот; $V4$ — погрузка/выгрузка; $V5$ — класс линии; $V6$ — управление перевозками; $V7$ — пропускная способность; $V8$ — грузо-напряженность; $V9$ — колебания транспортного потока; $V10$ — плотность транспортной сети

Решение 3. Формирование программы развития МИЛ на период планирования $t \in [0, T]$ на основе нечеткого когнитивного моделирования.

Нечеткие когнитивные карты представляют собой простой граф из узлов и взвешенных дуг, где узлы — концепты предметной области, а дуги — причинно-следственные связи между ними [6–8]. Нечеткое когнитивное моделирование позволяет решать сложно-структурированные задачи управления сложными системами. Такой подход к построению стратегии решения проблем сложной системы позволяет формализовать и систематизировать процесс взаимодействия ИЛ и МИЛ для выявления проблемных факторов взаимосвязей и их влияний.

Моделирование процесса взаимодействия ИЛ и МИЛ направлено на перераспределение транспортных потоков внутри железнодорожной транспортной сети [7–13]. Для снижения неравномерности транспортной работы на ИЛ и ее повышения на убыточных МИЛ, для разработки

когнитивной карты [14–16] выбраны количественный и качественные показатели, прямо или косвенно влияющие на процесс взаимодействия ИЛ и МИЛ.

Модель когнитивной карты $K_{И-М}$ определяется функцией $f_{K_{И-М}}$, которая задает изменение смешанного фактора x_i карты в момент $(t + 1)$ с учетом значения фактора в предыдущий момент времени изменения значений факторов-причин и внешнего воздействия в виде импульса при $t = 0$, в виде:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \sum_{j \in I_i} a_{ij}x_j(t) - x_j(t-1) + g_i(t),$$

где $x_i(t)$ — исходное состояние когнитивной системы в момент времени t ;

$\sum_{j \in I_i} a_{ij}x_j(t) - x_j(t-1)$ — вес взаимного влияния

между факторами a_{ij} , приращение импульса к фактору x_j за время t ;

$g_i(t)$ — внешнее управляющее воздействие.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики нечеткой когнитивной карты

Концепт	Влияние	Влияют	Веса влияния на другие концепты	Веса влияющие на концепт	Количество взаимосвязей
$V1$	$V5, V6$	$V3, V4, V9$	0,4; 0,8	0,5; 0,4; -0,2	5
$V2$	$V7, V6$	$V10$	0,2; 0,8	0,95	3
$V3$	$V1, V8, V5, V10$	$V4, V8, V9$	0,5; 0,8; 0,7; 1	0,8; 0,8; -0,5	7
$V4$	$V1, V5$	$V9$	0,4; 1	-0,1	3
$V5$	—	$V1, V3, V4, V7$	—	0,4; 0,7; 1; 0,7	4
$V6$	$V7$	$V1, V2, V9$	0,9	0,8; 0,8; -0,2	4
$V7$	$V5$	$V2, V6$	0,7	0,2; 0,9	3
$V8$	—	$V3, V6, V9$	—	0,8; -0,7; -0,1	3
$V9$	$V3, V4, V1, V6, V8$	—	-0,5; -0,1; -0,2; -0,1	—	5
$V10$	$V2$	$V3$	0,95	-0,5	2

В укрупненном виде проблему взаимодействия ИЛ и МИЛ предлагается решать с помощью нечетких когнитивных карт (рис. 3).

На процесс управления ИЛ и МИЛ влияет положительно грузооборот ($V3$) и размер погрузки и выгрузки ($V4$). При увеличении грузооборота увеличивается необходимость продвижения грузов по МИЛ. Также при увеличении размера погрузки и выгрузки увеличивается количество станций на МИЛ, где выполняются такие операции.

Отрицательно на ($V1$) влияют колебания транспортных потоков ($V9$). При снижении или резком увеличении колебаний транспортных потоков и планировании организации перевозок снижается интенсивность движения по МИЛ.

Тарифное расстояние перевозки ($V2$) рассчитывается по действующей методике [17] на основании кратчайшего расстояния перевозки и влияет на управление перевозками ($V6$) и пропускную способность линии ($V7$). Тарифное расстояние перевозки определяет систему управления перевозками (выделение наиболее ИЛ, места расположения участковых станций, локомотивных депо и прочее). Определив тарифные расстояния перевозки, составляется план по реализации пропускной способности. Описание укрупненной когнитивной карты приведено в табл. 1.

Наибольшее количество положительных и отрицательных взаимосвязей имеют концепты $V3, V9$, следовательно, по ним необходима разработка детализированных нечетких когнитивных карт по каждому концепту в отдельности.

Повышение эффективности функционирования малоинтенсивных линий — сложный многоэтапный процесс, реализуемый последовательным выполнением решаемых задач, приведенных в настоящей работе.

Разработана когнитивная карта, позволяющая определить характеристики взаимосвязей концептов, которые в наибольшей степени оказывают влияние на повышение эффективности работы МИЛ.

Этап жизненного цикла малодетальных линий характеризуется количественными параметрами, используемыми в качестве входных воздействий в схему математической модели, таких как потребность в перевозках $x_1(t)$, и другие параметры $x_2(t), x_3(t)$.

Результатом моделирования является определение количественных факторов, которые оказывают наибольшее воздействие на процесс взаимодействия ИЛ и МИЛ. Поэтапное решение задач позволит повысить эффективность взаимодействия ИЛ и МИЛ, снизить неравномерность перевозочного процесса и повысить

ритмичность работы железнодорожной транспортной системы.

На основании укрупненного модельного комплекса и предложенного подхода сформулированы концептуальные утверждения: увеличение объема перевозок позволяет повысить потребность в малоинтенсивных линиях; передача части грузопотока на малоинтенсивные линии снижает неравномерность на интенсивных линиях; закрытие и/или консервирование малоинтенсивных линий приводит к более высоким издержкам, чем убыточная эксплуатация линии, на короткий горизонт планирования.

Заключение

В статье дана оценка проблеме функционирования МИЛ в контексте систем автоматики и распределения транспортных потоков. Дана оценка стратегиям развития железнодорожного транспорта на различные горизонты планирования в части функционирования МИЛ. Выделены особенности функционирования МИЛ в современных условиях.

Предложена математическая постановка задачи эффективного функционирования МИЛ, которая решается поэтапной реализацией определения этапа жизненного цикла МИЛ. Предложено разработать математический аппарат для определения траектории устойчивого развития и функционирования и модель управления взаимодействием ИЛ и МИЛ на основе нечеткого когнитивного моделирования.

Предложены и обоснованы шесть этапов жизненного цикла функционирования МИЛ. Установлено логарифмическое уравнение линии тренда, и определена достоверность аппроксимации для устойчивого развития при доходности линии 10 %, от уровня затрат, за весь период эксплуатации. Разработан математический аппарат, и дана общая структура развития МИЛ.

Разработана укрупненная нечеткая когнитивная карта управления МИЛ и ИЛ, определены концепты, оказывающие наибольшее влияние на процесс взаимодействия МИЛ и ИЛ, и определены направления для дальнейших исследований в части составления детализированных нечетких когнитивных карт концептов грузооборота и колебания транспортного потока.

Представленные в статье положения полезны для подразделений железных дорог, занимающихся планированием перевозок и приемом заявок к перевозке грузов, в части повышения использования убыточных малодоходных линий. Решаемые в статье задачи позволяют комплексно или точно использовать МИЛ, количество которых в последнее время увеличивается, также возрастают потребности в механизмах, обеспечивающих снижение их убыточности, а следовательно, происходит повышение общих доходов железной дороги.

Библиографический список

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в российской федерации до 2030 г. Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. — 86 с.
2. Программа инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. Утверждена советом директоров ОАО «РЖД» (протокол № 13 от 24 июня 2011 г.). — М., 2011. — 63 с.
3. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 г. и перспективу до 2025 г. «Белая книга». — 2015. — 83 с.
4. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 г. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р. — 74 с.
5. Кириленко О. Н. Экономическая эффективность методов эксплуатации малодоходных линий / О. Н. Кириленко // Экономика железных дорог. — 2014. — № 8. — С. 79–85.

6. Вакуленко С. П. Малодеятельные линии: состояние и варианты оптимизации / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15. — № 3(70). — С. 174–180.
7. Никитин А. Б. Возможность внедрения цифровой радиосвязи и организации передачи данных между станциями на малодеятельных линиях / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. — 2019. — Т. 5. — № 1. — С. 45–61.
8. Jian W. A Train Control System for Low Density Line in China / W. Jian, J. Cheng Mingm, C. Baigen, L. Jiang // Journal of the China railway society. — 2015. — December. — Pp. 46–53.
9. Romanenko V. E. System analysis and the task of ontological modeling of multimodal transportation / V. E. Romanenko, E. K. Yarkin, V. A. Mokhov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 272. — 2019. — 022231. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022231.
10. Распоряжение ОАО «РЖД» от 13 января 2020 г. № 28/р «Об утверждении Методики классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД»». — М. — 8 с.
11. Епишкин И. А. Причины появления малодеятельных линий в РФ / И. А. Епишкин, К. В. Фионова // Транспортное дело России. — 2018. — № 6. — С. 262–264.
12. Кульба В. В. Управление и контроль реализации социально-экономических программ / В. В. Кульба, С. С. Ковалевский. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 400 с.
13. Новичихин А. В. Когнитивное моделирование для диагностики социально-экономических систем топливно-сырьевого региона / А. В. Новичихин, В. Н. Фрянов // Экономика и менеджмент систем управления. — 2014. — № 2. — С. 72–83.
14. Ковалев К. Е. Развитие научно-технических основ повышения эффективности функционирования транспортной системы при взаимодействии интенсивных и малодеятельных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — Т. 18. — № 2. — С. 169–176.
15. Ковалев К. Е. Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодеятельных линиях / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 2. — С. 252–267.
16. Ковалев К. Е. Модель загруженности оперативно-диспетчерского персонала на малодеятельных линиях / К. Е. Ковалев, В. Л. Белозеров, В. А. Шаров // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 3. — С. 294–308.
17. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозку грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами (утв. Постановлением ФЭК РФ от 17 июня 2003 г. № 47-т/5). — 463 с.
- Дата поступления: 10.01.2022
Решение о публикации: 25.02.2022
- Контактная информация**
КОВАЛЁВ Константин Евгеньевич — канд. техн. наук;
kovalev@pgups.ru
НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук,
доцент; novitchihin@bk.ru

Efficiency Rise in Functioning of Low-Intensity Lines: Problem Statement and Mathematical Models

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Efficiency Rise in Functioning of Low-Intensity Lines: Problem Statement and Mathematical Model // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 28–39. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-28-39

Summary

Purpose: The article proposes a solution of the problem of functioning of low-intensity lines. The provisions of the strategies for the development of railway transport for various planning horizons are considered in the context of improving the efficiency of the operation of low-intensity lines. The mechanism of assessment on the set of indicators and stages of life cycle of the lines has been defined. The scenarios of sustainable development of low-intensity lines depending on life cycle phase are formed. The mechanism for the evaluation and current stimulation of low-intensity lines has been developed to maintain optimal values of key parameters. The features of the functioning of low-intensity lines on Russian railways are determined in terms of high social significance for population and strategic importance for the country and the correlation of the size of traffic in the regions with the country economic development. Mathematical formulation of the problem of effective functioning of low-intensity lines based on its decomposition is proposed to determine the stages of the life cycle. The model of managing the interaction of intense and low-intensity lines has been improved by means of fuzzy cognitive modeling methods. An enlarged fuzzy cognitive map for the control of intense and low-intensity lines is presented. Control concepts that have a significant impact on the control object are defined. **Methods:** Methods of analysis and synthesis, system theory, mathematical modeling are applied. **Results:** A solution for the problem of increasing the efficiency of the operation of low-intensity lines in modern conditions from the standpoint of loosely-structured systems is proposed. **Practical significance:** Mathematical formulation of the problem of low-intensity line functioning is presented which is solved by determining the stages of the life cycle and the model for managing the interaction between intense and low-intensity lines based on fuzzy cognitive modeling for practical application to existing low-intensity lines.

Keywords: Railway transport, managing approach, low-intensity lines, transportation process management, transportation management, fuzzy cognitive maps.

References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v rossiyskoy federatsii do 2030 g. Utverzhdena Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r* [Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2008 No. 877-r]. 86 p. (in Russian)

2. *Programma innovatsionnogo razvitiya OAO "Rossiyskie zheleznnye dorogi" na period do 2015 g. Utverzhdena sovetom direktorov OAO "RZhD" (protokol № 13 ot 24 iyunya 2011 g.)* [Innovative Development Program of Russian Railways OJSC for the period up to 2015. Approved by the Board of Directors of Russian Railways OJSC (Minutes No. 13 dated June 24, 2011)]. Moscow, 2011. 63 p. (in Russian)

3. *Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga "Rossiyskie zheleznye dorogi" na period do 2020 g. i perspektivu do 2025 g. "Belaya kniga"* [The strategy of scientific and technical development of the holding "Russian Railways" for the period up to 2020 and prospects up to 2025 "White Book"]. 2015. 83 p. (in Russian)

4. *Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva "Rossiyskie zheleznye dorogi" do 2025 g. Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19 marta 2019 g. № 466-r* [Long-term development program of the open joint-stock company "Russian Railways" until 2025 by Order of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 No. 466-r]. 74 p. (in Russian)

5. Kirilenko O. N. Ekonomicheskaya effektivnost' metodov ekspluatatsii malodeyatel'nykh liniy [Economic efficiency of low-performance lines operation methods]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of railways]. 2014, I. 8, pp. 79–85. (in Russian)

6. Vakulenko S. P. Malodeyatel'nye linii: sostoyanie i varianty optimizatsii [Low-performance lines: state and optimization options]. *Mir transporta* [World of transport]. 2017, V. 15, I. 3(70), pp. 174–180. (in Russian)

7. Nikitin A. B. Vozmozhnost' vnedreniya tsifrovoy radiosvyazi i organizatsii peredachi dannykh mezhdu stantsiyami na malodeyatel'nykh liniyakh [The possibility of introducing digital radio communication and organizing data transmission between stations on low-density lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation]. 2019, V. 5, I. 1, pp. 45–61. (in Russian)

8. Jian W. A Train Control System for Low Density Line in China / W. Jian, J. Cheng Mingm, C. Baigen, L. Jiang // *Journal of the China railway society*. 2015. December. Pp. 46–53.

9. Romanenko V. E. System analysis and the task of ontological modeling of multimodal transportation / V. E. Romanenko, E. K. Yarkin, V. A. Mokhov // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 272. 2019. 022231. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022231.

10. *Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 13 yanvarya 2020 g. № 28/r "Ob utverzhdenii Metodiki klassifikatsii i spetsializatsii zheleznodorozhnykh liniy OAO "RZhD"* [Order of Russian

Railways dated January 13, 2020 No. 28/r "On Approval of the Methodology for Classification and Specialization of Railway Lines of Russian Railways"]. Moscow: 8 p. (in Russian)

11. Epishkin I. A. Prichiny poyavleniya malodeyatel'nykh liniy v RF [Causes of the appearance of low-performance lines in the Russian Federation]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2018, I. 6, pp. 262–264. (in Russian)

12. Kul'ba V. V. *Upravlenie i kontrol' realizatsii sotsial'no-ekonomicheskikh programm* [Management and control of the implementation of socio-economic programs]. Moscow: Knizhnyy dom "LIBROKOM" Publ., 2009. 400 p. (in Russian)

13. Novichikhin A. V. Kognitivnoe modelirovanie dlya diagnostiki sotsial'no-ekonomicheskikh sistem toplivno-syrevoogo regiona [Cognitive modeling for the diagnosis of socio-economic systems of the fuel and raw materials region]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya* [Economics and management of control systems]. 2014, I. 2, pp. 72–83. (in Russian)

14. Kovalev K. E. Razvitie nauchno-tekhnicheskikh osnov povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya transportnoy sistemy pri vzaimodeystvii intensivnykh i malodeyatel'nykh liniy [Development of scientific and technical foundations for improving the efficiency of the transport system in the interaction of intensive and low-density lines]. *Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2021, V. 18, I. 2, pp. 169–176. (in Russian)

15. Kovalev K. E. Kompleksnyy sinergetiko-indikatornyy podkhod k upravleniyu protsessami perevozok na intensivnykh i malodeyatel'nykh liniyakh [Comprehensive synergy-indicator approach to the management of transportation processes]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation]. 2021, V. 7, I. 2, pp. 252–267. (in Russian)

16. Kovalev K. E. Model' zagruzhennosti operativno-dispatcherskogo personala na malodeyatel'nykh liniyakh [The model of workload of operational and dispatching personnel on low-density lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation]. 2020, V. 6, I. 3, pp. 294–308. (in Russian)

17. *Preyskurant № 10-01. Tarify na perezovozku gruzov i uslugi infrastruktury, vpolnyaemye rossiyskimi zheleznymi dorogami (utv. Postanovleniem FEK RF ot 17 iyunya 2003 g. № 47-t/5)* [Price list No. 10-01. Tariffs for the transportation of goods and infrastructure services performed by Russian railways (approved by Decree of the Federal Energy Commission of the Russian Federation dated June 17, 2003 No. 47-t / 5)]. 463 p. (in Russian)

Received: January 10, 2022

Accepted: February 25, 2022

Author's information

Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering,
Associate Professor; kovalev@pgups.ru

Alexey V. NOVICHKHIN — D. Sci. in Engineering,
Associate Professor; novitchihin@bk.ru

УДК 656.212.5.073

Пути повышения эффективности рынка железнодорожных перевозок Республики Узбекистан на основе модернизации состава и структуры собственников вагонного парка и контейнеров

Е. К. Коровяковский, М. Б. Сабуров

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Коровяковский Е. К., Сабуров М. Б. Пути повышения эффективности рынка железнодорожных перевозок Республики Узбекистан на основе модернизации состава и структуры собственников вагонного парка и контейнеров // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 40–48. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-40-48

Аннотация

Цель: Совершенствование модели рынка железнодорожного грузового транспорта Узбекистана при увеличении количества собственников грузовых вагонов и контейнеров. **Методы:** Применяются методы системного анализа. **Результаты:** Проанализированы модели рынка по предоставлению грузовых вагонов и контейнеров различных собственников, и построены модели организации работы на железнодорожном транспорте при различных собственниках подвижного состава. Предложена модель рынка грузовых перевозок Узбекистана. Перечислены положительные стороны предлагаемой схемы. **Практическая значимость:** Совершенствование модели рынка железнодорожных грузовых перевозок дает возможность для обновления парка грузовых вагонов и контейнеров, создания конкуренции по предоставлению грузовых вагонов и контейнеров под погрузку и снижения транспортной составляющей за счет конкуренции.

Ключевые слова: Грузовая перевозка, операторская компания, вагонная составляющая, перевозочная компания, собственник вагонов, инфраструктура, провозная плата, модель рынка.

Введение

При отсутствии прямого доступа Узбекистана к морским портам железнодорожные грузовые перевозки играют важнейшую роль для развития экономики страны. Во время пандемии использование железнодорожного транспорта позволило перевозить грузы, обеспечивая минимальный контакт людей между собой, однако увеличение грузопотока железнодорожных грузовых перевозок негативно повлияло на качество и затраты оказываемых услуг из-за фактической монополии на рынке грузовых перевозок в Узбекистане по предоставлению грузовых вагонов и контей-

неров [1]. В настоящее время на железных дорогах Узбекистана акционерное общество «Узбекистон темир йуллари» (АО «УТЙ») одновременно является перевозчиком, оператором, экспедитором и владельцем инфраструктуры железнодорожного транспорта. Это не способствует развитию конкуренции в отрасли железнодорожных грузовых перевозок.

Опыт ряда государств показывает, что высокий уровень конкуренции в области железнодорожных грузовых перевозок дает значительные преимущества по сравнению с монопольным развитием железнодорожного транспорта.

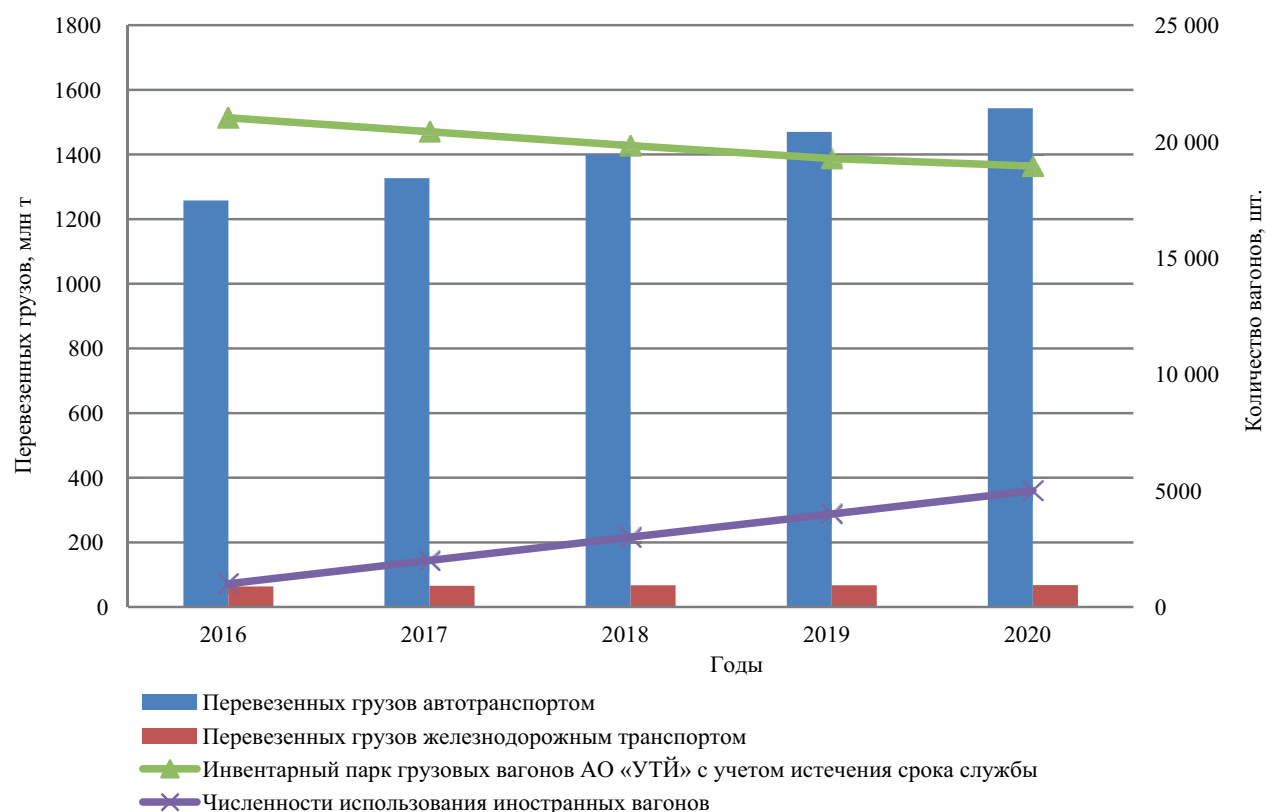


Рис. 1. Диаграмма перевезенных грузов и количество вагонов рабочего парка грузовых вагонов АО «УТЙ» на период 2016–2020 гг.

Из рис. 1 видно, что вагонный парк грузовых вагонов с 2016 по 2020 г. уменьшился за счет истечения срока службы вагонов, а грузооборот увеличился [2]. Использование вагонов сопредельных государств постоянно увеличивалось. Грузовой вагонный парк АО «УТЙ» сокращается, а его восполнения не происходит, что может привести к сложностям в перевозках в международном и внутреннем сообщении. Из-за нехватки грузовых вагонов происходит постепенное перераспределение грузопотока на автомобильный транспорт.

Исходя из вышеперечисленного, задача научного изучения модели рынка грузовых перевозок с различными собственниками грузовых вагонов и контейнеров в настоящее время является актуальной для сети Узбекских железных дорог. Осуществление железнодорожных

грузовых перевозок Узбекистана с участием разнообразных владельцев грузовых вагонов и контейнеров дает возможность реализации модели рынка с равноправной конкуренцией. Реализация услуги по предоставлению грузовых вагонов и контейнеров под погрузку привлечет дополнительные финансовые вложения в парк грузовых вагонов и контейнеров железных дорог Узбекистана со стороны различных инвесторов.

В статье ставится задача по определению особенностей модели рынка грузовых перевозок при участии различных собственников и факторов, влияющих на их деятельность на железных дорогах Узбекистана. В работе выполнен анализ рынка операторских и контейнерных компаний сопредельных государств.

Обзор научно-исследовательских работ и постановка задачи

Вопросам совершенствования деятельности компании с различными собственниками грузовых вагонов и контейнеров и развитию конкуренции в сфере железнодорожного грузового транспорта посвящены работы многих ученых [3–10 и др.]. Однако в большинстве научных работ рассмотрены вопросы создания свободной конкуренции и не предложен механизм создания конкуренции с учетом местных географических условий республик Средней Азии.

Например, в [3] автором изучен вопрос получения экономического стимула при проведении эффективной тарифной политики, основанной на дерегулировании вагонной составляющей тарифа. Разработана схема бизнес-единиц, конкурирующих субъектов при железнодорожных перевозках.

В [4] авторами изучена потребность операторских компаний при развитии перевозочных услуг на железнодорожном транспорте и их совершенствование. В результате разработаны классификационные признаки компаний-операторов.

В [5] автор рассматривает организацию комплексного транспортного обслуживания и обосновывает их развитие, изучает вопросы повышения доходности железнодорожных перевозок. В дальнейшем развитие железнодорожных перевозок автор видит с увязкой с услугами водных перевозок. Представлена существующая и предлагаемая схема взаимодействия грузоотправителя с участниками перевозочного процесса.

В [6] автор приводит противоречие рыночным механизмам при передаче управления приватным вагонным парком через центр фирменного транспортного обслуживания (ЦФТО) на основе агентских соглашений и подчеркивает необходимость комплексной модели управления, которая позволяет при наличии приватного парка вагонов сохранить универсальность парка

и баланс интересов всех участников перевозочного процесса.

В работе [7] автор рассматривает актуальные вопросы развития рынка операторских услуг на железнодорожном транспорте. Для того чтобы сформировать конкурентоспособность на рынке транспорта, автором обоснована передача вагонного парка частным операторам. В результате проведенного исследования перечислены негативные факторы, которые влияют на оптимальность операторской деятельности.

В [8] авторы рассматривают эффективное управление вагонопотоками операторских компаний ОАО «РЖД» и промышленных предприятий на основе единой информационной системы. В этой связи для увеличения обмена взаимной информацией предлагается создание единой информационной базы (ЕИБ). В системе ЕИБ предполагается осуществление управления порожними вагонопотоками.

В данной работе перечислены следующие преимущества при объединении парков в рамках ЕИБ:

1. Операторские компании не будут обременены дополнительными обязательствами, кроме предоставления своих вагонов на условиях аренды, устанавливая плату за них. Таким образом, малые операторы не только не уйдут с рынка, но и по-прежнему будут оказывать стабилизирующее воздействие на цены. ЕИБ будет выступать как электронная биржа вагонов, через которую операторы будут предоставлять свои услуги [9].

2. Грузоотправитель сможет выбирать вагоны той операторской компании, с которой ему будет выгодно работать, что, в свою очередь, повысит конкуренцию среди самих операторов [9].

Сотрудниками и учеными ПГУПС было подготовлено немало работ по изучению данного вопроса. Например, авторы работы [10] провели систематизацию операторских компаний железнодорожного подвижного состава и показали

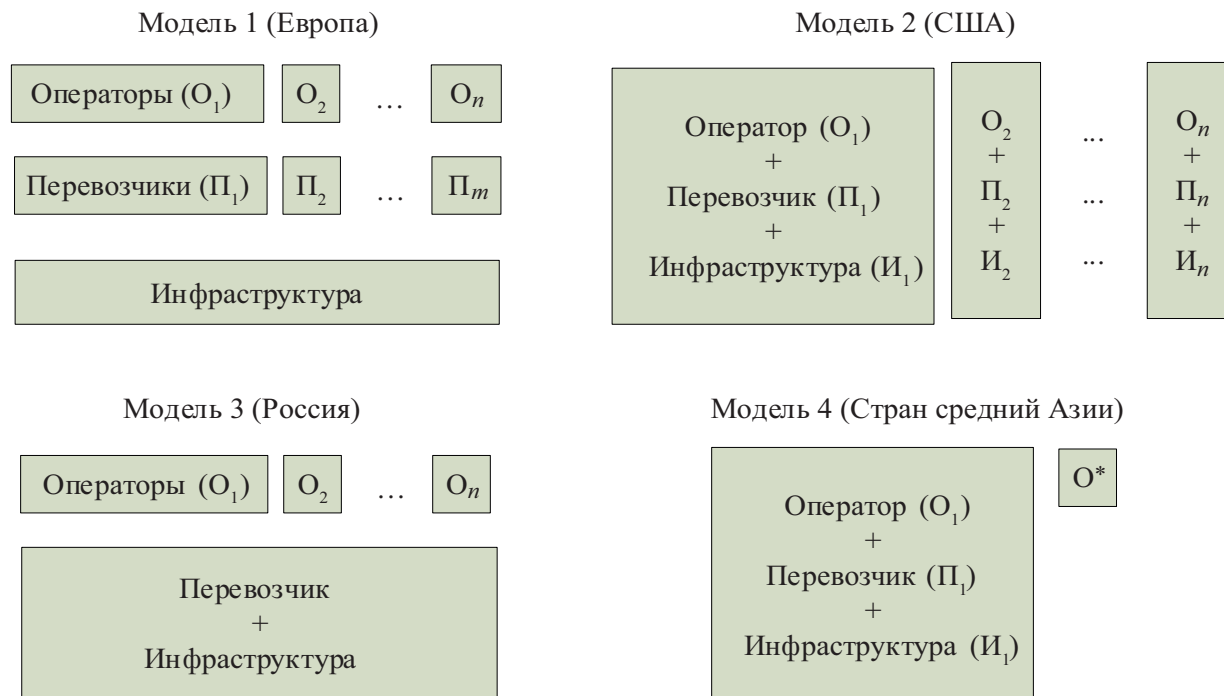
необходимость создания параметров информационного взаимодействия на базе единого сетевого технологического процесса (ЕСТП). Была разработана классификация операторов железнодорожного подвижного состава, и на основе этого определен наиболее доходный сектор рынка железнодорожных перевозок.

В [11] авторы предлагают для эффективного развития железнодорожной грузовой отрасли создание целевой модели рынка грузовых перевозок.

В ходе проделанного анализа научных работ видно, что в научных работах рассмотрены вопросы создания свободной конкуренции и не предложен универсальный механизм создания конкуренции с учетом местных географических условий. В настоящей научной работе предлагается модель рынка при наличии различных собственников подвижного состава в условиях Узбекистана.

Предлагаемая модель взаимодействия различных собственников грузовых вагонов и контейнеров с инфраструктурой железных дорог

В настоящее время в мире в основном работают 3 модельных варианта по использованию вагонного и контейнерного парка, как показано на рис. 2. Модель № 1: клиенты могут использовать только приватные (собственные) вагоны и контейнеры. Эта модель называется моделью «вертикального разделения», по этой модели работают железные дороги Европейских стран. Во второй модели конкуренция идет между вертикально-интегрированными холдингами. По второй модели работают железные дороги континентов Северной Америки и частично Южной Америки. А в третьей модели клиенты могут использовать вагоны и контейнеры и приватного, и инвентарного парка грузовых вагонов и контейнеров. Третья модель рынка грузовых перевозок



Примечание: O^* — иностранные операторы.

Рис. 2. Модели рынка железнодорожного грузового транспорта с различными собственниками грузовых вагонов и контейнеров

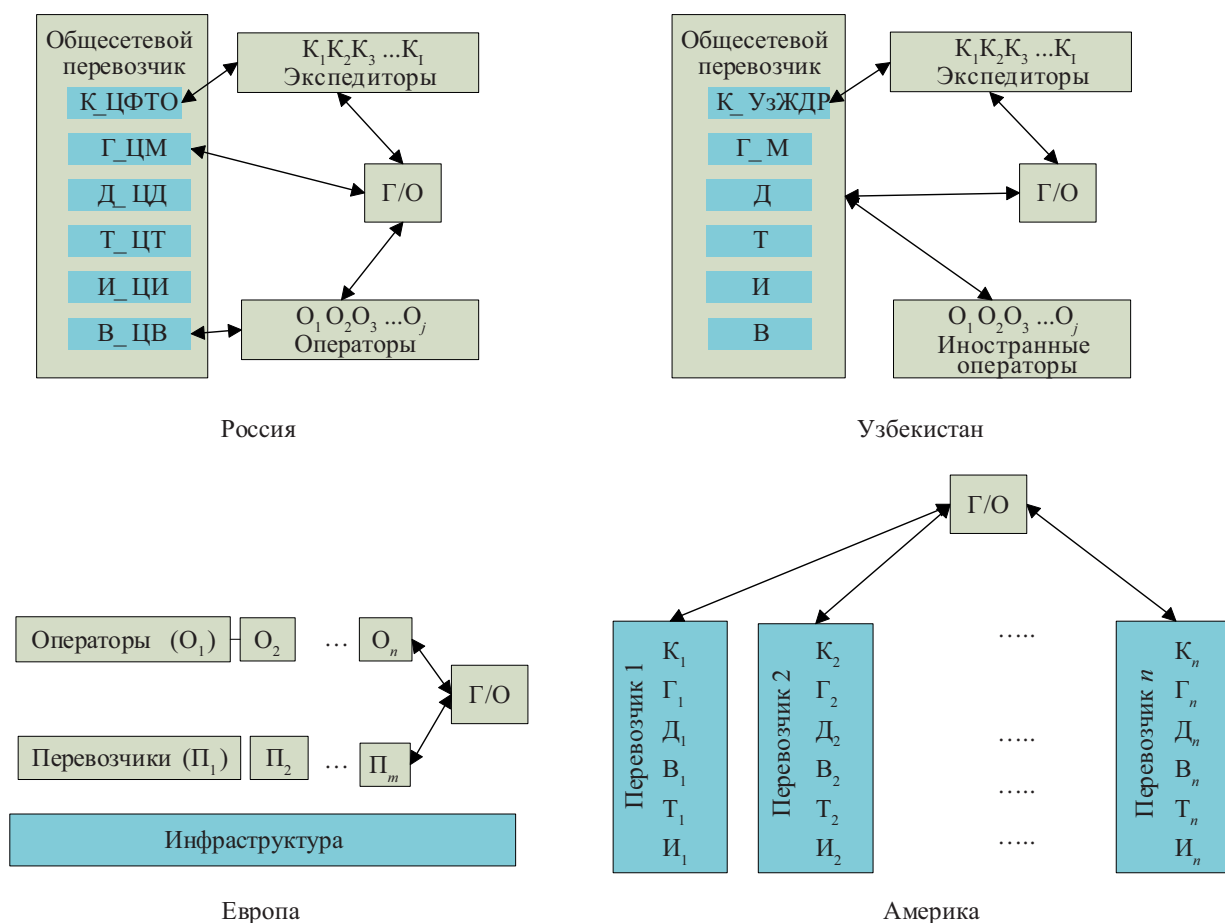


Рис. 3. Подробная модель железнодорожного транспорта.

Виды железнодорожных услуг железнодорожного транспорта:

В — вагонный, Д — движения, Т — тяга, И — инфраструктура, К — структуры, оказывающие коммерческие услуги, Г — предприятия, оказывающие грузовые работы, О — независимые операторы, П — перевозчик

считается комбинированной и характерна для железных дорог пространства 1520.

Далее на рис. 3 изображена более подробная модель организации работы железнодорожного грузового транспорта. В подробной модели изображено обращение грузоотправителей при отправлении грузов. Например, в Узбекистане грузоотправители для выполнения грузовых и коммерческих операций обращаются к нескольким экспедиторам, а при выборе грузовых вагонов и контейнеров у них есть возможность обратиться только в службу движения (Д). При выборе железно-

дорожных операторских услуг сохраняется монополия. Если анализировать модели России, то у грузоотправителей есть выбор между различными независимыми операторами. А в перевозочных и инфраструктурных услугах сохраняется монополия. Страны Европейского союза работают по схожей модели, но основным отличием является наличие множества перевозчиков. В странах Северной Америки железнодорожные компании имеют при себе службы инфраструктуры, перевозочная деятельность осуществляется собственником подвижного состава.

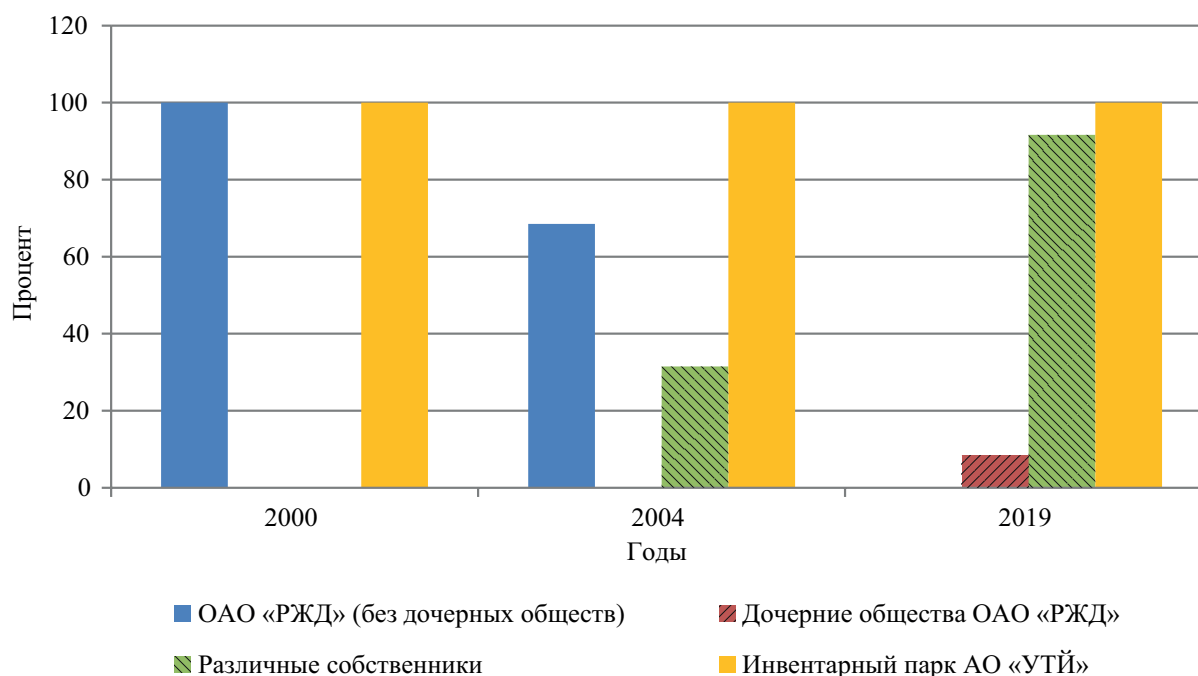


Рис. 4. Сравнение владельцев парка грузовых вагонов и контейнеров России и Узбекистана

Исходя из исторического происхождения железнодорожных стандартов в зависимости от ширины колеи 1520, 1435, 1667 и узкой колеи, в Узбекистане эволюция развития железнодорожного транспорта основана на стандарте 1520 мм. Поэтому для Узбекистана целесообразно выбрать оптимальные модели среди стран 1520. Если анализировать рынок грузовых перевозок стран 1520, то можно отметить, что в процессе реформирования с 2000 по 2004 г. появился более развитый рынок по предоставлению вагонов и контейнеров под погрузку на пространстве 1520 в России, Казахстане и Украине. В начале реформирования наблюдалась острая нехватка грузовых вагонов и контейнеров на железнодорожной сети этих стран, а с 2006 г. дефицит грузовых вагонов и контейнеров сменился на профицит. Это происходило за счет пополнения парка новыми грузовыми вагонами и контейнерами, приобретенными частными инвесторами, то есть финансовыми вложениями различных собственников.

Поэтому в качестве образца для создания модели выбран рынок оперирования грузовых вагонов в Российской Федерации. Если кратко анализировать российский рынок грузовых вагонов с различными собственниками (рис. 4), то можно увидеть, что в 2004 г. в собственности ОАО «РЖД» было 68,5 % парка, а остальные 31,5 % были на балансе различных собственников. В 2019 г. 91,6 % парка грузовых вагонов перешли в парк к различным собственникам, такие как Публичное акционерное общество «Первая грузовая компания» (ПАО «ПГК»), Globaltrans, «НефтеТрансСервис», «Трансойл», «Модум-Транс», Группа компаний «РусТрансКом» (ГК «РТК»), СУЭК, «ТрансКонтейнер», УГМК, Группа компаний «Новотранс» и т. д. [12].

Внедрение предлагаемой модели на железных дорогах Узбекистана может привести к следующим результатам:

- снижению стоимости оперирования вагонов за счет увеличения конкуренции;

- улучшению качества оказываемых услуг по предоставлению вагонов под погрузку клиентам;
- уменьшению порожних пробегов вагонов.

Заключение

При анализе структуры вагонного парка и перевезенных грузов автомобильным и железнодорожным транспортом на Узбекских железных дорогах доказана актуальность изучаемой темы. Были проанализированы работы ученых по вопросам совершенствования перевозочной деятельности с различными собственниками грузовых вагонов и контейнеров. Однако было выявлено, что в большинстве работ рассмотрены вопросы создания свободной конкуренции и не предложен механизм создания конкуренции с учетом местных географических условий Средней Азии.

Внедрение предлагаемой модели рынка позволяет обновить парк инновационными грузовыми вагонами и контейнерами и создать равноправную конкуренцию по предоставлению грузовых вагонов и контейнеров под погрузку. Это позволит грузоотправителям выбирать различных владельцев грузовых вагонов и контейнеров для организации перевозок грузов и снижать транспортные издержки.

Библиографический список

1. Сабуров М. Б. Оценка факторов, влияющих на экспортный потенциал Республики Узбекистан / Е. К. Коровяковский, М. Б. Сабуров, Ш. Х. Султонов // Известия ПГУПС. — 2021. № 1(18). — С. 132–142.
2. Сабуров М. Б. Прогнозирование погрузки грузов на железных дорогах Узбекистана / М. Б. Сабуров, Д. Б. Бутунов // Universum. — 2021. — № 1. — С. 36–42.
3. Коренев П. Г. Конкурентные стимулы частного парка / П. Г. Коренев // Мир транспорта. — 2012. — № 2(20). — С. 50–56 с.
4. Леонтов Р. Г. Формирование субъектов рынка железнодорожных услуг / Р. Г. Леонтов, В. В. Комаров, О. И. Некрасов // Вестник ТОГУ. — 2009. — № 3(14). — С. 115–122.
5. Хусаинов Ф. И. Развитие грузового бизнеса и комплексного транспортно-экспедиционного обслуживания ОАО «РЖД» / Ф. И. Хусаинов, Е. И. Плисова // Вестник. — Самара: СамГУПС. — 2011. — № 1(11). — С. 116–122.
6. Мальцев С. В. Технологический дефицит вагонов универсального парка на сети железных дорог: причины и способы его преодоления / С. В. Мальцев // Транспорт Российской Федерации. — 2011. — № 4(35). — С. 34–36.
7. Гузенко Н. В. Развитие рынка операторских услуг на железнодорожном транспорте: проблемы и перспективы / Н. В. Гузенко // Вестник Томского государственного университета. — 2010. — № 3(340). — С. 6–15.
8. Жаркова А. А. Организация взаимодействия операторских компаний, ОАО РЖД и промышленных предприятий / А. А. Жаркова // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. — Новокузнецк: СибГИУ, 2013. — № 3(16). — С. 92–96.
9. Жаркова А. А. Эффективность управления вагонами операторских компаний в рамках единой информационной базы / А. А. Жаркова // Транспорт Урала. — Екатеринбург: СибГИУ, 2014. — № 2(41). — С. 24–26.
10. Сергеева Т. Г. Повышение конкурентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации / Т. Г. Сергеева, Г. И. Никифорова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2020. — № 3(17). — С. 428–436.
11. Казанская Л. Ф. Повышение эффективности грузовых перевозок на фоне роста конкуренции / Л. Ф. Казанская, А. В. Богомолова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2012. — № 4(15). — С. 157–165.
12. Рынок грузовых железнодорожных перевозок стран Пространств 1520. — М.: ИПЕМ, 2020. — 108 с.

Дата поступления: 28.01.2022

Решение о публикации: 22.02.2022

Контактная информация:

КОРОВЯКОВСКИЙ Евгений Константинович —
канд. техн. наук, профессор; ekorsky@mail.ru
САБУРОВ Мардонбек Баходирович — аспирант;
saburov.mardonbek83@mail.ru

Effectiveness Rise Ways of Railway Transportation in Uzbekistan Republic on the Basis of Owner Composition and Structure Modernization of Railcar Park and Containers

E. K. Korovyakovskiy, M. B. Saburov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Korovyakovskiy E. K., Saburov M. B. Effectiveness Rise Ways of Railway Transportation in Uzbekistan Republic on the Basis of Owner Composition and Structure Modernization of Railcar Park and Containers // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 40–48. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-40-48

Summary

Purpose: Market model improvement for cargo railway transport of Uzbekistan at the raise of number of owners of railcars and containers. **Methods:** The methods of system analysis are applied. **Results:** Market models on provision of cargo railcars and containers of various owners are analyzed and work organization models on rail transport at various owners of rolling stock are built. Model for market of Uzbekistan cargo transportation is proposed. Positive sides of proposed scheme are listed. **Practical significance:** Improvement of market model of rail cargo transportation makes it possible to renew cargo car and container park, to create concurrence in cargo car and container provision for loading and to reduce transport constituent on account of concurrence.

Keywords: Cargo transportation, operator company, railcar constituent, transportation company, railcar owner, infrastructure, freight charge, market model.

References

1. Saburov M. B. Otsenka faktorov, vliyayushchikh na eksportnyy potentsial Respubliki Uzbekistan [Evaluation of factors affecting the export potential of the Republic of Uzbekistan]. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of PGUPS]. 2021, I. 1(18), pp. 132–142. (in Russian)
2. Saburov M. B. Prognozirovanie pogruzki gruzov na zheleznykh dorogakh Uzbekistana [Forecasting cargo loading on the railways of Uzbekistan]. *Universum* [Universum]. 2021, I. 1, pp. 36–42. (in Russian)
3. Korenev P. G. Konkurentnye stimuly privatnogo parka [Competitive incentives for a private park]. *Mir transporta* [World of transport]. 2012, I. 2(20), pp. 50–56. (in Russian)
4. Leontov R. G. Formirovanie sub"ektov rynka zheleznodorozhnykh uslug [Formation of subjects of the market of railway services]. *Vestnik TOGU* [Bulletin of TOGU]. 2009, I. 3(14), pp. 115–122. (in Russian)
5. Khusainov F. I. Razvitie gruzovogo biznesa i kompleksnogo transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya OAO "RZhD" [Development of the freight business and integrated transport and forwarding services of Russian Railways]. *Vestnik* [Bulletin]. Samara: SamGUPS Publ. 2011, I. 1(11), pp. 116–122. (in Russian)
6. Mal'tsev S. V. Tekhnologicheskii defitsit vagonov universal'nogo parka na seti zheleznykh dorog: prichiny i sposoby ego preodoleniya [Technological shortage of cars of the universal fleet on the railway network: causes and ways to overcome it]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2011, I. 4(35), pp. 34–36. (in Russian)
7. Guzenko N. V. Razvitie rynka operatorskikh uslug na zheleznodorozhnom transporte: problemy i perspektivy [Development of the market of operator services in railway transport: problems and prospects]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk State University]. 2010, I. 3(340), pp. 6–15. (in Russian)
8. Zharkova A. A. Organizatsiya vzaimodeystviya operatorskikh kompaniy, OAO RZhD i promyshlennyykh

predpriyatiy [Organization of interaction between operator companies, Russian Railways and industrial enterprises]. *Infrastrukturnye otrasli ekonomiki: problemy i perspektivy razvitiya* [Infrastructure sectors of the economy: problems and development prospects]. Novokuznetsk: SibGIU Publ., 2013, I. 3(16), pp. 92–96. (in Russian)

9. Zharkova A. A. Effektivnost' upravleniya vagonami operatorskikh kompaniy v ramkakh edinoy informatsionnoy bazy [Efficiency of wagon management of operating companies within the framework of a single information base]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. Ekaterinburg: SibGIU Publ., 2014, I. 2(41), pp. 24–26. (in Russian)

10. Sergeeva T. G. Povyshenie konkurentosposobnosti transportno-logisticheskikh kompaniy v usloviyakh tsifrovizatsii [Increasing the competitiveness of transport and logistics companies in the context of digitalization]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2020, I. 3(17), pp. 428–436. (in Russian)

11. Kazanskaya L. F. Povyshenie effektivnosti gruzovykh perevozok na fone rosta konkurentsii [Increasing the efficiency of freight traffic against the backdrop of increased competition]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2012, I. 4(15), pp. 157–165. (in Russian)

12. *Rynok gruzovykh zheleznodorozhnykh perevozok stran Prostranstv 1520* [The market of freight rail transportation of the countries of Spaces 1520]. Moscow: IPPEM Publ., 2020. 108 p. (in Russian)

Received: January 28, 2022

Accepted: February 22, 2022

Author's information:

Evgeny K. KOROVIAKOVSKY — PhD in Engineering, Professor; ekorsky@mail.ru

Mardonbek B. SABUROV — Postgraduate Student; saburov.mardonbek83@mail.ru

УДК 656.2:65.011

Целесообразность применения аутсорсинга при перевозке нефтепродуктов

Т. Г. Сергеева

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сергеева Т. Г. Целесообразность применения аутсорсинга при перевозке нефтепродуктов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 49–55. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-49-55

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопросы снижения транспортной составляющей и расходов компаний — операторов железнодорожного подвижного состава на транспортировку нефтепродуктов. Это может быть достигнуто путем передачи на аутсорсинг части работ, выполняемых компаниями — операторами подвижного состава. **Методы:** Применяется метод сравнительного анализа с учетом минимизации функции затрат на транспортировку нефтепродуктов путем снижения затрат на передачу работ по промывке — пропарке цистерн на промывочно-пропарочных станциях аутсорсинговыми компаниями. **Результаты исследования:** Анализ способов минимизации затрат операторов железнодорожного подвижного состава с использованием методики оценки эффективности применения аутсорсинга. Описаны условия, позволяющие сделать вывод о целесообразности применения аутсорсинга. Разработана методика проведения оценки целесообразности передачи работ по промывке — пропарке цистерн на аутсорсинг. Выведен интегральный показатель уровня целесообразности аутсорсинга с учетом расчета весового коэффициента. Установлена расчетная формула эффективности применения аутсорсинга на магистральном транспорте. **Практическая значимость:** Рассмотрена целесообразность выполнения промывки и пропарки цистерн на промывочно-пропарочных станциях средствами компаний — операторов железнодорожного подвижного состава и средствами аутсорсера. Определена экономическая эффективность передачи работ на аутсорсинг.

Ключевые слова: Нефтяная промышленность, нефтепродукты, аутсорсинг, компания — оператор железнодорожного подвижного состава, матрица оценки целесообразности аутсорсинга.

Нефтяная промышленность является важнейшей отраслью экономики. Она приносит самый большой доход в бюджет страны.

Пандемия COVID-19 и повсеместно введенные в 2020 г. ограничения оказали сильное влияние на все отрасли экономики. Нефтедобыча крупнейших российских и зарубежных компаний резко сократилась. Это было вызвано поддержанием ограничительных мер в большинстве стран, что повлекло за собой ограничение деловой активности и сокращение объемов потребления углеводородов.

Объемы среднесуточной добычи нефти в России позволяют ей входить в мировую тройку лидеров. Также Россия занимает восьмое место в мировом рейтинге стран по доказанным объемам запасов нефти [1].

Однако выполненный анализ среднесуточной добычи нефти среди крупнейших стран мира показал дальнейшие перспективы увеличения объемов добычи и переработки нефти в России. Увеличение объемов добычи и переработки нефти в России ставит перед железнодорожным транспортом задачи по освоению планируемых

объемов перевозок, в том числе путем сокращения оборота вагона и улучшения использования подвижного состава [2].

Временное снижение объемов добычи нефти оказало влияние на объемы перевозок грузов, в том числе и железнодорожным транспортом [3, 4].

Анализ перевозки нефти и нефтепродуктов по сети железных дорог в 2020 г. показал, что среднее расстояние перевозки рассматриваемых грузов составило 1600 км [5].

По данным Института проблем естественных монополий, доля перевозок нефти и нефтепродуктов в структуре перевозок грузов железнодорожным транспортом за последние три года значительно не изменилась и составила 18 %. Структура перевозок грузов железнодорожным транспортом в 2020 г. представлена на рис. 1.

Успешное перемещение нефти и нефтепродуктов во многом зависит от выбранного способа их транспортировки [6, 7].

Применительно к железнодорожному транспорту процесс перемещения нефти и нефтепродуктов зависит от технологии работы предприятий по наливу и сливу нефтегрузов, а также промывочно-пропарочных станций по очистке и пропарке цистерн [8]. Компании — операторы

железнодорожного подвижного состава стремятся минимизировать свои затраты [9].

Целью текущего исследования было выявить целесообразность выполнения промывки и пропарки цистерн на промывочно-пропарочных станциях средствами компаний — операторов железнодорожного подвижного состава и средствами аутсорсера. Определена экономическая эффективность передачи работ на аутсорсинг.

Исследование эффективности применения аутсорсинга при перевозке нефтепродуктов железнодорожным транспортом производится методом сравнительного анализа, с учетом минимизации функции затрат на транспортировку нефти и нефтепродуктов, путем снижения затрат на передачу части работ аутсорсинговым компаниям. На аутсорсинг предлагается передать работы, связанные с промывкой — пропаркой цистерн на промывочно-пропарочных станциях.

При передаче на аутсорсинг работ по выполнению данного вида работ должны выполняться следующие условия:

1) повышение экономической эффективности компании — оператора железнодорожного подвижного состава, что происходит за счет снижения суммарных издержек;



Рис. 1. Структура перевозок грузов железнодорожным транспортом в 2020 г.

2) качество выполнения процесса по промывке — пропарке цистерн на промывочно-пропарочных станциях должно быть выше или на том же уровне, что и при выполнении этого процесса силами компании-оператора;

3) необходимо стремиться к оптимизации и совершенствованию процесса, применению новых технологий при выполнении рассматриваемого вида работ;

4) передача работ и процессов на аутсорсинг является эффективной, если помимо выше перечисленных достоинств сохраняется высокий уровень охраны труда и безопасности производственного процесса.

Сделать выбор в пользу применения аутсорсинга поможет использование матрицы целесообразности. Применение данного метода позволяет проводить сравнение различных вариантов ведения бизнеса (рис. 2).

В качестве проведения оценки можно применять два инструмента: уровень конкурентоспособности операторской компании до и после применения аутсорсинга и интегральный показатель целесообразности ведения бизнеса с применением аутсорсинговых технологий.

Для определения уровня конкурентоспособности компании-оператора до и после применения аутсорсинга можно использовать количественную характеристику предприятия выполнять промывку и пропарку цистерн на высоком качественном уровне, наличие в штате компании квалифицированного персонала, применение новых технологий производства, финансовая стабильность компании на рынке и др.

Интегральный показатель должен быть определен для оператора железнодорожного подвижного состава и предполагаемого аутсорсера. Значение интегрального показателя, близкое к единице, является наиболее предпочтительным.

Дальнейшие выводы можно выполнить, проанализировав, в какое поле матрицы попадет значение выбранного интегрального показателя. Методика расчета интегрального показателя сводится к сравнению выполнения работ по промывке — пропарке цистерн оператором железнодорожного подвижного состава и предполагаемым аутсорсером.

Принятие решения о применении аутсорсинга в деятельности компаний — операторов железнодорожного подвижного состава должно

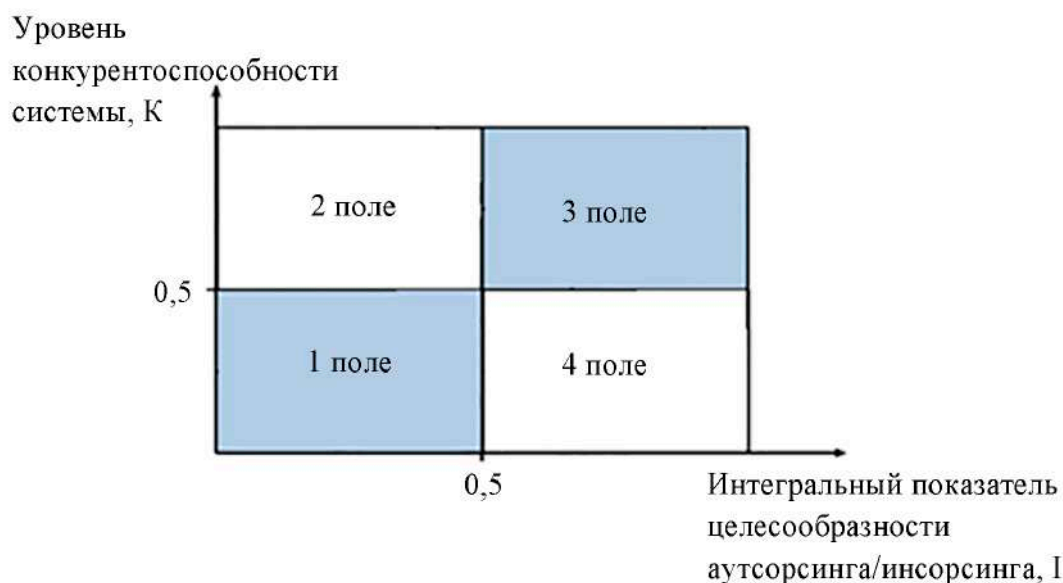


Рис. 2. Матрица целесообразности аутсорсинга

выполняться на основе формирования набора показателей. Эти показатели определяются компанией — оператором подвижного состава. Рекомендуемое количество показателей может варьироваться от 5 до 10. В перечень рассматриваемых показателей должна быть включена стоимость выполнения работ. Затем определяется минимальное, максимальное и фактическое значение для каждого сформированного показателя ($F_n^{\min}, F_n^{\max}, F_n^{\text{факт}}$). Значение, которое показывает действительную величину выбранного показателя в данный момент времени, указывается для компании — оператора подвижного состава и компании-аутсорсера соответственно.

Далее необходимо выполнить расчеты и определить уровень выполнения (Y_k) того или иного выбранного нами показателя. Сравнение производится для каждого сформированного показателя (отдельно для компании-оператора и аутсорсинговой компании соответственно):

$$Y_k = \frac{F_n^{\text{факт}} - F_n^{\min}}{F_n^{\max} - F_n^{\min}}. \quad (1)$$

Стоит обратить внимание, что решение данной задачи будет находиться в интервале $[0; 1]$, что дает возможность выполнять сравнение различных качественных характеристик выбранных показателей. Для компании-оператора рассматриваемые показатели имеют разную значимость. Учитывая в расчетах весовые коэффициенты, т. е. расставляя приоритеты выбранных показателей, можно определить интегральный показатель аутсорсинга. И по полученным значениям сделать выводы о целесообразности его применения, используя матрицу целесообразности аутсорсинга.

Если при выполнении расчетов интегральный показатель попадает в первое поле, то наиболее целесообразным в этом случае являются перспективы увеличения уровня конкурентоспособности и повышения интегрального показателя путем

передачи рассматриваемых работ на выполнение аутсорсинговым компаниям.

Второе поле характеризуется высоким качеством выполнения работ, наличием укомплектованного штата высококвалифицированных работников, применением инновационных технологий в производстве, однако интегральный показатель остается в данном случае на минимальных значениях. Поэтому будет целесообразным провести дальнейшее сравнение интегрального показателя компании — оператора железнодорожного подвижного состава и предполагаемого аутсорсера. Тот, у кого рассматриваемый показатель будет выше, ту стратегию развития бизнеса и следует выбирать. Если интегральный показатель выше для аутсорсера, то выбираем аутсорсинговую стратегию развития бизнеса. Если интегральный показатель выше для компании — оператора железнодорожного подвижного состава, то дальнейшей перспективой развития бизнеса является стратегия инсорсинга.

Третье поле является идеальным для развития инсорсинговой стратегии развития компании. Это поле характеризуется наивысшими значениями уровня конкурентоспособности системы и интегрального показателя. Совершенно очевидно, что в этом случае выполнение работ по промывке и пропарке цистерн компанией — оператором железнодорожного подвижного состава является наиболее целесообразным направлением развития бизнеса.

Если решение попадает в четвертое поле, то здесь, так же как и во втором поле, невозможно однозначно дать ответ на вопрос, какую стратегию развития следует выбрать. Необходимо выполнить сравнение двух стратегий развития. При выборе стратегии развития бизнеса уровень конкурентоспособности будет играть решающее значение. Если качество выполнения работ, наличие штата высококвалифицированных работников, применение инновационных технологий в производстве, т. е. уровень конкурентоспособности аутсорсера выше, чем у компании — оператора железно-

рожного подвижного состава, то данную работу целесообразно предложить выполнять аутсорсинговой компании. В обратном случае, если уровень конкурентоспособности для компании-оператора выше, чем у предполагаемого аутсорсера, то следует применять стратегию инсорсинга.

Окончательные выводы о целесообразности передачи работ по промывке и пропарке цистерн на аутсорсинг следует делать с учетом определения экономического эффекта от использования аутсорсинга.

Экономический эффект от использования аутсорсинга обеспечивается, если затраты компании — оператора подвижного состава, связанные с передачей работ по промывке и пропарке цистерн на аутсорсинг, ниже затрат на выполнение этих видов работ своими силами.

Целесообразность применения аутсорсинга характеризуется выполнением следующего неравенства:

$$C_{\text{аут}} + C_{\text{ликв}} < C_{\text{опер}} \cdot \beta, \quad (2)$$

где $C_{\text{аут}}$ — затраты компании — оператора подвижного состава на оплату услуг аутсорсера; $C_{\text{ликв}}$ — затраты компании — оператора подвижного состава по сокращению персонала, ликвидации производства и др.;

$C_{\text{опер}}$ — затраты компании — оператора подвижного состава на выполнение работ собственными силами;

β — коэффициент, который показывает оптимизацию затрат компании — оператора железнодорожного подвижного состава.

Библиографический список

1. Abboud A., Betz M. R. The local economic impacts of the oil and gas industry: Boom, bust and resilience to shocks / A. Abboud, M. R. Betz // *Energy Economics*. — 2021. — Vol. 99.

2. Никифорова Г. И. Построение дескриптивной модели логистической цепи доставки грузов при взаимо-

действии железнодорожного и морского транспорта / Г. И. Никифорова // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2020. — Т. 17. — № 4. — С. 545–551.

3. Покровская О. Д. Принципы реализации комплексных транспортно-логистических услуг на железнодорожном транспорте и требования к ним / О. Д. Покровская // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2020. — Т. 17. — № 3. — С. 288–303

4. Panova Y. Russian railways on the Eurasian market: issue of sustainability / Y. Panova, E. Korovyakovsky, A. Semerkin, V. Henttu et al. // *European Business Review*. — № 29(6). — Pp. 664–679.

5. Pokrovskaya O. Assessment of Transport and Storage Systems / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2020. — Vol. 1115 AISC. — Pp. 570–577.

6. Pokrovskaya O. Formation of logistics facilities in transport corridors / O. Pokrovskaya, S. Orekhov, N. Kapustina, N. Kizyan // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. — № 918(1).

7. Pokrovskaya O. Cargo transportation and commodity flows management / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko, N. Kizyan // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. № 918(1).

8. Сергеева Т. Г. Повышение конкурентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации / Т. Г. Сергеева, Г. И. Никифорова // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2020. — Т. 17. — № 3. — С. 428–436.

9. Сергеева Т. Г. Совершенствование управления парком частных вагонов / Т. Г. Сергеева // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2019. — Т. 16. — № 3. — С. 449–454.

Дата поступления: 15.01.2022

Решение о публикации: 16.02.2022

Контактная информация:

СЕРГЕЕВА Татьяна Георгиевна — канд. техн. наук, доцент; sergeeva@pgups.ru

Practicability of Outsourcing Application at Transportation of Oil Products

T. G. Sergeeva

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Sergeeva T. G. Practicability of Outsourcing Application at Transportation of Oil Products // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 49–55. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-49-55

Summary

Purposes: To consider the issues to decrease transport constituent and expenditures of companies-operators of rail rolling-stock on oil product transportation. This can be reached by the way of handover for outsourcing of job parts that are implemented by companies-operators of rail rolling stock. **Methods:** The method of comparative analysis inclusive of function minimization for expenditures on oil product transportation by means of expenditure decrease on the handover of jobs on washout-steaming of tanks at washout-steaming stations to outsourcing companies. **Result** of given article's investigation has been the analysis of the ways of expenditure minimization for rail rolling stock operators with the use of evaluation methodology for outsourcing application effectiveness. The conditions, allowing to conclude on outsourcing application practicability, have been described. The methodology of practicability evaluation pursuing for tank washout-steaming job handover to outsourcing has been developed. Integral indicator of outsourcing practicability level inclusive of weight coefficient calculation has been deduced. Calculation formula of application efficiency for outsourcing on arterial transport has been set. **Practical significance:** Practicability of tank washout and steaming implementation at washout-steaming stations by means of companies-operators of rail rolling stock and by means of outsourcer has been considered. Economic effectiveness of job handover to outsourcing has been defined.

Keywords: Oil industry, oil products, outsourcing, company-operator of rail rolling stock, matrix of outsourcing practicability evaluation.

References

1. Abboud A., Michael R. Betz. The local economic impacts of the oil and gas industry: Boom, bust and resilience to shocks, *Energy Economics*, Volume 99, 2021, 105285

2. Nikiforova G. I. Postroenie deskriptivnoy modeli logisticheskoy tsepi dostavki грузов pri vzaimodeystvii zheleznodorozhnogo i morskogo transporta [Construction of a descriptive model of the logistics chain for the delivery of goods in the interaction of rail and sea transport]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. 2020, V. 17, I. 4, pp. 545–551. (in Russian)

3. Pokrovskaya O. D. Printsipy realizatsii kompleksnykh transportno-logisticheskikh uslug na zheleznodorozhnom transporte i trebovaniya k nim [Principles for the implementation of integrated transport and logistics services in railway transport and requirements for them]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications.]. 2020, V. 17, I. 3, pp. 288–303. (in Russian)

4. Panova Y., Korovyakovskiy E., Semerkin A., Henttu V., Li W., Hilmola O.-P. Russian railways on the Eurasian market: issue of sustainability (2017) *European Business Review*, 29 (6), pp. 664–679.

5. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Assessment of transport and storage systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing* (sm. v knigakh). 2020. T. 1115 AISC. S. 570–577.

6. Pokrovskaya O., Orekhov S., Kapustina N., Kizyan N. Formation of logistics facilities in transport corridors (2020) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 918 (1).

7. Pokrovskaya O., Fedorenko R., Kizyan N. Cargo transportation and commodity flows management Elsevier B. V. (2020) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 918 (1).

8. Sergeeva T. G., Nikiforova G. I. Povyshenie konkurentosposobnosti transportno-logisticheskikh kompaniy v usloviyakh tsifrovizatsii [Increasing the competitiveness of transport and logistics companies in the context of digitalization]. *Izvestiya Peterburgskogo*

universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. 2020, V. 17, I. 3, pp. 428–436. (in Russian)

9. Sergeeva T. G. Sovershenstvovanie upravleniya parkom privatnykh vagonov [Improving the management of the fleet of private cars]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. 2019, V. 16, I. 3, pp. 449–454. (in Russian)

Received: January 15, 2022

Accepted: February 16, 2022

Author's information:

Tatyana G. SERGEEVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; sergeeva@pgups.ru



УДК 656.211.3

Развитие транспортно-пересадочного узла Купчино

М. Ю. Калмыков¹, Е. К. Коровяковский¹, А. Е. Поляков³, Я. А. Шолтысек^{1,2}

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Экономический университет в г. Катовице, Польша, 40-287 г. Катовице, ул. 1 Мая, 50

³Акционерное общество по изысканиям и проектированию объектов транспортного строительства «Ленгипротранс», Российская Федерация, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 143

Для цитирования: Калмыков М. Ю., Коровяковский Е. К., Поляков А. Е., Шолтысек Я. А. Развитие транспортно-пересадочного узла Купчино // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 56–67. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-56-67

Аннотация

Цель: Разработка предложения по перераспределению пассажиропотоков в транспортно-пересадочном узле Купчино с увеличением мощностей узла в условиях повышения пассажиропотока. Для выполнения поставленной цели во введении приведены основные требования к транспортно-пересадочным узлам, анализ действующей транспортной системы в транспортно-пересадочном узле, на основании проведенного анализа была построена имитационная модель действующего пассажиропотока в Anylogic с целью выявления «узких мест» в организации работы узла. **Методы:** Моделирование в Anylogic, статистического исследования. **Результаты:** Имитационная модель транспортно-пересадочного узла Купчино с использованием городского наземного транспорта. Разработано предложение по перераспределению пассажиропотоков внутри транспортно-пересадочного узла Купчино путем строительства конкорса над железнодорожными путями и станцией метрополитена с примыканием к торгово-развлекательным комплексам, расширение перечня услуг для пассажиров, анализ и выявление количества узких мест в транспортно-пересадочном узле и способ их ликвидации. Предложена схема развития транспортно-пересадочного узла с учетом развития внутригородского железнодорожного сообщения. **Практическая значимость:** Развитие транспортно-пересадочного узла Купчино в условиях увеличения пассажиропотока, увеличение входной пропускной способности метрополитена, создание новых рабочих мест. Создание доступной и комфортной транспортной инфраструктуры для обслуживания пассажиров всех групп населения, в том числе маломобильных групп.

Ключевые слова: Пассажир, транспортно-пересадочный узел (ТПУ), пассажиропоток, Купчино, инфраструктура.

Введение

В последние десятилетия в мире присутствует тенденция к увеличению населения и площади городских агломераций. Согласно отчету ООН, к

2050 г. 70 % населения мира будет проживать в городах [1]. Эта тенденция бросает вызов в первую очередь объектам транспортной инфраструктуры. По последним исследованиям европейских

ученых, недостаточное внимание к общественному транспорту при развитии городских агломераций ведет к падению качества жизни населения, что в свою очередь ведет к падению экономической привлекательности агломерации [2]. Соответственно, для повышения привлекательности общественного транспорта для населения необходимо создание новых инфраструктурных объектов, в частности транспортно-пересадочных узлов (ТПУ), которые позволят пассажирам комфортно и быстро менять виды транспорта [3].

Согласно «Основным мероприятиям по целям, задачам и этапам реализации транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г.» предполагается создание городских интермодальных систем пассажирского транспорта, а также развитие сети комфортных транспортно-пересадочных узлов.

Свод правил «Транспортно-пересадочные узлы» в настоящий момент несовершенен и имеет существенное допущение: ТПУ признаются любые объекты транспортной инфраструктуры, где существует место пересадки с одного вида транспорта на другой, с дистанциями между местами остановки различных видов транспорта. Поэтому авторы предлагают свою формулировку:

– ТПУ — комплекс объектов недвижимого имущества, включающий в себя объекты транспортно-инженерной инфраструктуры, пересадочный комплекс, а также другие объекты, предназначенные для обеспечения безопасного и комфортного обслуживания пассажиров в местах их передвижения для пересадки с одного вида транспорта на другой;

– пересадочный комплекс — здания и сооружения, или комплекс зданий и сооружений, объединяющий вестибюли станций скоростного внеуличного транспорта, посадочные перроны наземного пассажирского транспорта, перехватывающую стоянку, объекты попутного обслуживания пассажиров и другие объекты, обеспе-

чивающие максимально комфортные условия пересадки пассажиров.

ТПУ изначально интермодален, и именование его «интермодальным» означает тавтологию. Так как интермодальный объект обслуживает два и более видов транспорта, так и ТПУ, по определению, позволяет осуществлять замену транспорта при следовании по маршруту (как минимум 2 вида транспорта). Однако можно заметить, что определения интермодальной транспортной системы (ИТС) и интермодального терминала (центра) имеют явное отличие. Интермодальный терминал по нескольким определениям не обязан входить в интермодальную систему.

Интермодальным центром (комплексом) следует называть места пересадки с одного вида транспорта на другой в случае, когда эта пересадка происходит внутри одной интермодальной транспортной системы. Места, где осуществляется пересадка между различными видами транспорта без интермодальной транспортной системы, следует называть ТПУ [4].

В настоящее время актуальность изменения городской логистики непосредственно связана с качеством жизни населения и экологическим воздействием на окружающую среду человеком. Эколого-логистическое сознание людей формируется в результате формирования их понимания о качестве жизни и о состоянии здоровья. Вследствие этого и происходит ориентация на безопасные виды транспорта, отвечающие экологическим стандартам [5].

Комфортность обслуживания пассажиров на данных объектах должна обеспечиваться высокой физической интеграцией различных видов транспорта, синхронизацией транспортных сетей, наличием торговых и обслуживающих точек, наличием мест отдыха и ожидания, высоким уровнем информативности и безопасности среды. Также должна рассматриваться перспектива развития территории ТПУ, ее интеграция с

общественными и жилыми территориями, увеличение нагрузки на транспортную сеть [4].

При создании узла необходимо создавать «универсальную среду» неотрывно от городской среды и тем самым воспринимать объект как элемент структуры города общего назначения. Это позволит беспрепятственно использовать объект для маломобильных групп населения, что достигается компактными транспортными и пешеходными связями узла [6].

В работе Е. П. Безверхой, А. В. Скопинцева описан спектр моделей ТПУ, которые помогают проанализировать и выбрать наиболее эффективный вариант в зависимости от особенностей и специфики задач интермодального транспортно-пересадочного узла [7].

Анализ транспортно-пересадочного узла Купчино

В любом бизнесе, в том числе в транспортном, необходимо учитывать интересы всех участников процесса. Инвесторы имеют возможность вложить средства в развитие нового проекта с последующей отдачей капитала, производители предлагают инновационные продукты как для всей системы, так и для отдельных ее элементов, для органов власти важна разработка планов для увеличения доли общественного транспорта в жизни населения [8].

Чтобы происходил рост экономических показателей агломерации, необходимо обеспечение ее своевременной транспортной системой с учетом прогнозов развития территории. Тем самым позволяя развиваться другим отраслям и видам деятельности в агломерации, что способствует привлечению государственных и частных инвесторов [9].

Одной из задач государственной программы Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга на 2015–2020 гг.» является повышение безопасности функцио-

нирования транспортного комплекса Санкт-Петербурга, достигаемое в совокупности реализации мероприятий государственной программы, а также путем формирования и развития системы транспортно-пересадочных узлов для комфортной и безопасной пересадки пассажиров. В целях учета территорий транспортно-пересадочных узлов при разработке градостроительной документации и при осуществлении Санкт-Петербургом инвестиционной деятельности сформирован перечень приоритетных транспортно-пересадочных узлов для первоочередной реализации.

Согласно Постановлению Правительства Санкт-Петербурга от 30 июня 2014 г. № 552, ТПУ Купчино является транспортно-пересадочным узлом 2-го уровня [10]. Включение данного узла в программу развития транспортной системы города является подтверждением его значимости и перспектив его развития, что, в свою очередь, подтверждает: в условиях урбанизации крайне необходимо постоянно решать логистические задачи. Организация работы транспортно-пересадочного узла различного уровня осуществляется для выполнения грамотного перераспределения потоков и позволяет сократить время в пути.

ТПУ южного направления имеют исключительно благоприятное транспортно-географическое положение. Такое положение было создано благодаря строительству аэропорта «Пулково», концентрации ж. д. и автомобильной инфраструктуры.

Особая роль отдается ТПУ «Купчино». ТПУ Купчино расположен в южной части города, на границе муниципального образования «Гагаринское» (Московский район) и Балканского муниципального округа (Фрунзенский район) г. Санкт-Петербурга. В него входит остановочный пункт, который относится к пригородному сообщению Витебского направления Октябрьской ж. д. В настоящее время в Купчино останавливаются



Рис. 1. Схема движения общественного транспорта

все электрички (52 в сутки), следующие в Поселок; Великий Новгород; Оредеж; Павловск; Рогавку.

Станция состоит из 2 платформ и 3 путей (2 пассажирских и 1 грузовой). Выход к платформам осуществляется через подземный переход.

В шаговой доступности располагаются остановки общественного транспорта (рис. 1):

- станция метрополитена «Купчино»;
- трамвайное кольцо (маршрут № 25, № 43, № 45, № 62);
- автобусное кольцо «Балканская площадь» (маршрут № 50, № 53, № 54, № 56, № 74, № 96, № 157, № 159, № 326);
- троллейбусное кольцо (маршрут № 39, № 47);
- автобусная остановка на Витебском проспекте (маршрут № 63, № 72, № 186, № 190, № 196, № 388, № 856).

Аэропорт «Пулково» находится в 13 минутах езды (11 км по автодороге), для сравнения, от действующей остановки у метро «Московская» в 15 минутах (11 км по автодороге) [11].

Близость к КАД позволяет увеличивать количество местных и муниципальных, пригородных и междугородних сообщений.

Перепланирование части перехватывающей парковки с последующим переносом действующей автобусной станции «Звездная» (ул. Звездная, 15) увеличит концентрацию пассажиропотока.

Перенос автостанции ближе к КАД (А-118) в ТПУ «Купчино» позволит не только использовать действующие маршруты, но и строить новые с привлечением трасс:

- М-10 «Россия»;
- Р-21 «Кола»;
- А-120 «Южное полукольцо Санкт-Петербурга»;
- А-121 «Сортавала»;
- А-181 «Скандинавия»;
- А-180 «Нарва»;
- Р-23 [12].

Имеются социально значимые объекты:



Рис. 2. Схема подуличного перехода станции метро «Купчино» [13]

- торгово-развлекательный комплекс (ТРК) (Балканский 5, Балканский 3, Балканский 2, Балканский Nova);
- бизнес-центр (Балканский-1);
- гипермаркет «Окей».

Для строительства многоуровневой парковки между трамвайным кольцом и ж. д. путями воспользуемся ст. 56.3. «Условия изъятия земельных участков для государственных или муниципальных нужд» ЗК РФ.

Комплексные предложения по технологическим параметрам ТПУ:

- разработка взаимодействия различных видов транспорта;
- развитие межрайонной и муниципальной сети;
- развитие междугородных и международных автобусных перевозок;

- развитие новых маршрутов;
- наращивание потоков по существующим направлениям;
- развитие местных маршрутов, обслуживающих развивающиеся прилегающие территории;
- развитие международных (Эстония, Латвия, Финляндия, Беларусь) и междугородных сообщений (Псков, Великий Новгород, Вологда, Ярославль, Петрозаводск).

На рис. 2 отображена действующая схема подуличного перехода станции метро «Купчино» и ж. д. остановочного пункта «Купчино», а также связь с другими видами общественного транспорта [13].

На станции метрополитена «Купчино» располагается по 8 турникетов с каждой стороны и кассами между ними.

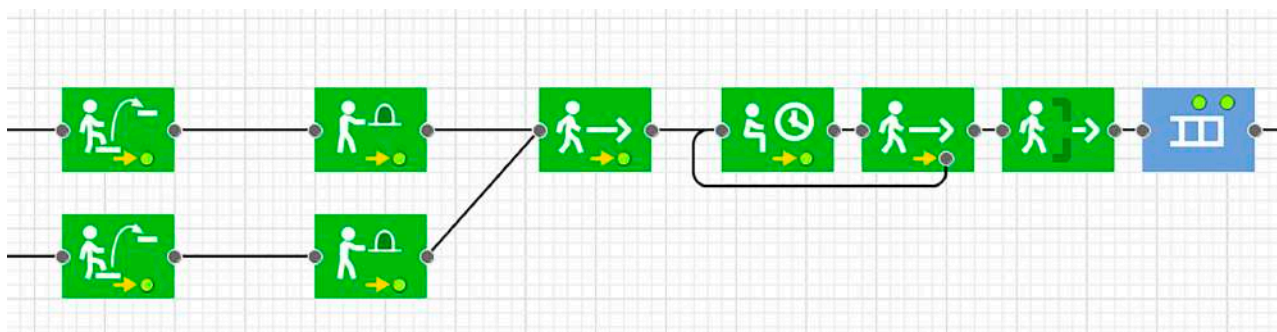


Рис. 3. Фрагмент модели движения пассажиропотоков в ТПУ «Купчино»

Построение действующей модели ТПУ «Купчино»

С помощью программы Anylogic 8.7 была построена модель ТПУ «Купчино» для выявления узких мест в работе узла и последующего принятия решения для их ликвидации (рис. 3).

Для исследования были учтены все транспортные средства, участвующие в работе узла (трамвай, троллейбус, автобус, маршрутное такси, пригородные электропоезда) в период времени с 8 до 9 часов утра. На станции «Купчино» установлены 16 турникетов, путем замеров было выявлено, что в минуту через турникет проходит в среднем 15 человек. Построенная модель показала, что в метрополитен в данный период времени

стремится войти 15 475 человек, однако турникеты могут пропустить всего до 13 500 чел./час, в результате чего происходит скопление людей (рис. 4). Также усугубляет ситуацию тот факт, что многим пассажирам при пересадке необходимо купить проездной билет (кассы и автоматы находятся между турникетами).

Из диаграммы «Пропускная способность группы турникетов в зависимости от пройденных людей в минуту через один турникет» (рис. 5) видно, что рациональное число турникетов — 20, при условии, что пропускная способность турникета составляет 14 чел./мин. Действующая конструкция вестибюля не позволяет установку дополнительных турникетов без перепланировки всего

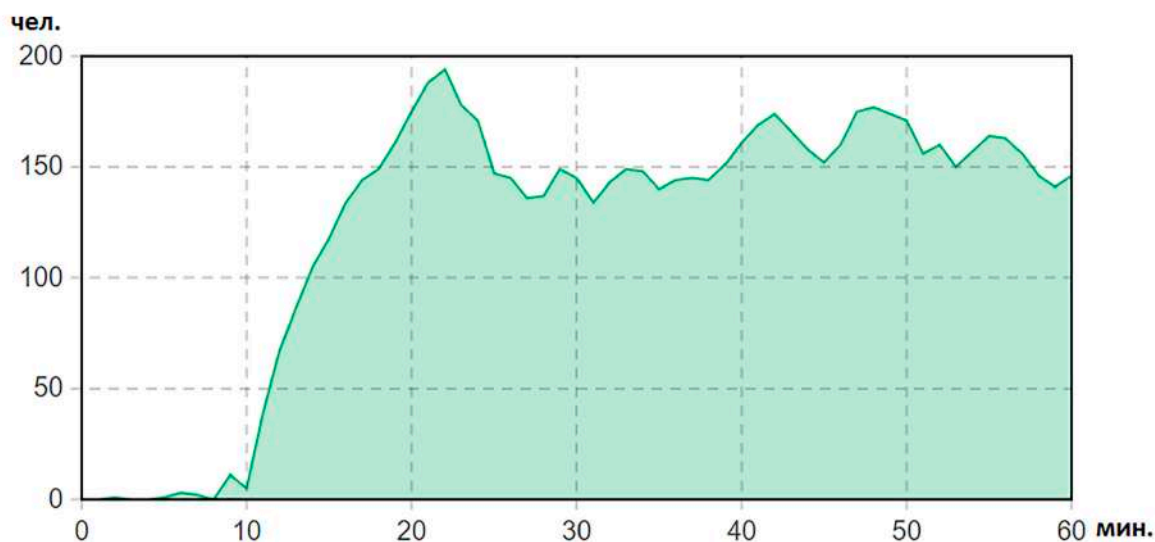


Рис. 4. Количество пассажиров, ожидающих прохождения турникетов

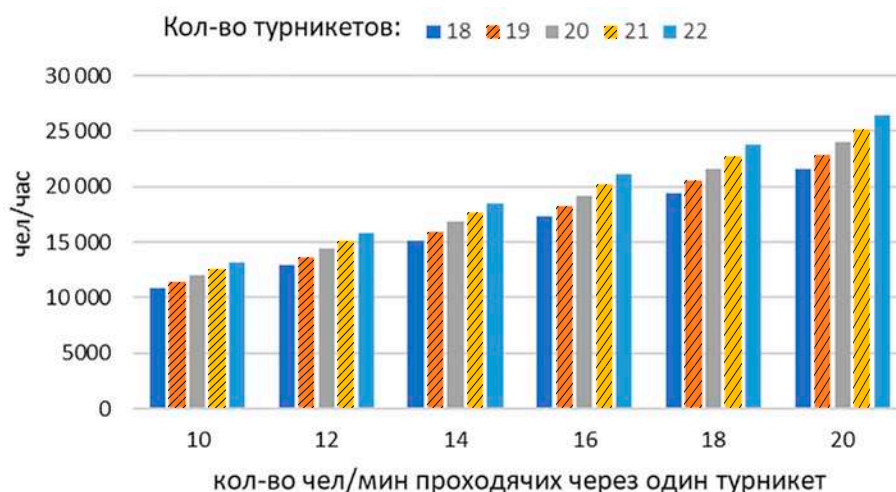


Рис. 5. Пропускная способность группы турникетов в зависимости от пройденных людей в минуту через один турникет

вестибюля. Также на модели видно, что перед лестницей скапливаются люди, данное скопление связано с пропускной способностью самого туннеля, а именно скорость подъема на одном лестничном пролете равна 4267 чел./час [14].

Предложения по реконструкции узла

Действующая станция метрополитена не справляется с имеющимся пассажиропотоком по причине конструктивных особенностей. Принимая во внимание строящиеся новые здания жилищного фонда, в том числе и на территории, имеющей тяготение к станции метрополитена, а также проекты по дальнейшему развитию Санкт-Петербурга, предвидится значительное увеличение пассажиропотока. Авторы предполагают, что запуск городской «электрички» через ТПУ значительно увеличит пассажиропоток. Таким образом действующая модель получит новые вводные данные, значительно увеличится нагрузка на входную группу метрополитена.

В связи с увеличением пассажиропотока предлагается реконструкция ж. д. остановочного пункта «Купчино» со строительством конкорса, по примеру Ладожского вокзала, обеспечение вторым ярусом перехода между платформами и

организация дополнительных входов и выходов на станцию метрополитена «Купчино», надземный коридор, соединяющий многоуровневую парковку со стороны Балканской площади и имеющийся ТРК.

На втором ярусе (конкорс) предполагается разместить залы ожидания, кассы на все виды сообщений, служебные помещения.

Для сокращения порожнего пробега действующих маршрутов электричек пригородного сообщения вне часа пик предлагается создать на основе ТПУ зонную станцию. При этом сокращаются не только порожний пробег подвижного состава, но и другие расходы, например электроэнергия и амортизация путей.

Реконструкция ТПУ «Купчино» позволит повысить системное взаимодействие транспортных инфраструктур местного, межмуниципального, межрегионального, международного уровней. Увеличение и концентрация большого пассажиропотока в одном месте может негативно сказаться на пропускной способности ТПУ, для разгрузки предлагается задействовать железнодорожные пути для «городской электрички».

Для обеспечения надлежащего движения необходимо реконструировать путевое развитие

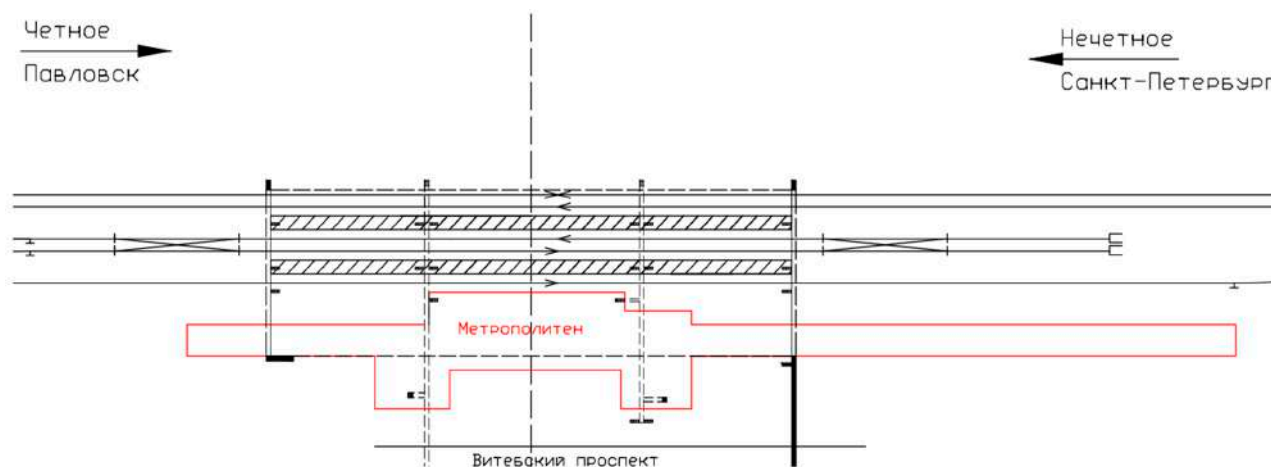


Рис. 6. ТПУ Купчино после реконструкции (предложено автором)

станции. Для сокращения времени на пересадку пассажиров пригородного направления, прибывающих на второй главный путь, предлагается осуществлять пересадку на внутригородское сообщение с 4 пути. Прибывающие пассажиры на остановочный пункт Купчино на 5 путь могли бы беспрепятственно пересаживаться на электропоезда пригородного сообщения (первый главный путь).

В ходе реконструкции необходимо построить 10 стрелочных переводов, тупики 6 и 8 длиной 250 метров, как показано на рис. 6.

Увеличение пассажиропотоков потребует новых переходов, для обеспечения безопасности жизни и здоровья граждан предполагается строительство надпутевого зала, который будет обеспечивать сопутствующие услуги для пассажиров (например, зал ожидания, продажа билетов, информационные услуги и т. д.), административно-технического обеспечения самого ТПУ.

Зал должен обеспечивать перераспределение потоков для исключения узких мест, где может скапливаться большое количество людей. Конструкция комплекса должна обеспечивать доступ ко всем элементам узла, надуличный переход над Витебским проспектом должен соединяться с автостанцией, должны быть созданы допол-

нительные спуски с турникетами в метрополитен, созданы спуски к автобусным остановкам и перехватывающим парковкам на Витебском проспекте и Балканской площади.

На сегодняшний день среднее время, затрачиваемое на поездку в Санкт-Петербургском общественном транспорте, составляет 72 минуты [15].

Транспортно-пересадочный узел «Купчино» является одной из ключевых точек на карте Санкт-Петербурга, развитие которой позволит: сократить время на пригородные, междугородные и международные автосообщения; создать альтернативу действующему маршруту по доставке пассажиров из аэропорта «Пулково»; запуск новых социально значимых маршрутов до близлежащих населенных пунктов (Шушары, Пушкин, Колпино и т. д.); уменьшить количество выбросов вредных веществ в атмосферу; улучшить в целом действующую транспортную инфраструктуру города.

Увеличение пассажиропотоков повлечет за собой увеличение нагрузки на действующую систему организации движения пассажиров.

Для распределения пассажиропотоков, исключаящего большое скопление людей, предлагается строительство над платформами второго (при необходимости более высокого) этажа, зада-

чей которого будет распределение пассажиропотока к различным видам транспорта, в том числе инновационном [16], обеспечение необходимых сопутствующих услуг.

Применяя основные принципы планирования строительства ТПУ, можно реконструировать малоэффективные зоны остановок в многопрофильные зоны с плотной застройкой, развитой системой городского общественного транспорта, новыми маршрутами, в том числе для пешеходов и велосипедистов. В коммерческой части конкурса рекомендуется расположить сеть услуг, направленных на транзитные маршруты [17].

У инфраструктурных проектов большой срок окупаемости при значительных капитальных вложениях, поэтому городу приходится создавать государственно-частное партнерство с инвесторами, для которых коммерческие объекты важнее транспортно-пересадочных, так как инфраструктурные проекты не дают быстрого возврата денежных средств, как это делают краткосрочные объекты [18]. Поэтому предлагается привлечь инвесторов торгово-развлекательных и деловых центров в первую очередь, уже построенных вблизи комплексов, что позволит соединить главное здание транспортно-пересадочного комплекса надуличным переходом с ТРК.

Выводы

Строительство ТПУ требует капитальных вложений и решения ряда задач не только финансовых, но и юридических, логистических и т. д. Транспортно-пересадочный комплекс даст развитие не только социально-значимым и бизнес-проектам, но и всему участку агломерации. Узел должен предусматривать запас мощностей для дальнейшего развития и использования перспективных видов транспорта и сообщений.

Строительство конкурса позволит перераспределить пассажиропотоки по транспортно-пересадочному узлу, обеспечить дополнительными

услугами пассажиров, увеличить его пропускную способность без выделения значительного земельного участка. В статье было рассчитано рациональное число турникетов, которое для заданных условий составляет 20. Благодаря тому, что общественное пространство планируется разместить на втором ярусе, имеется возможность строительства дополнительных входов на перрон станции метрополитена и тем самым получится ликвидировать узкие места в работе ТПУ. Строительство зонной станции в первую очередь предназначено для развития внутригородского сообщения и создания конкуренции метрополитену.

Библиографический список

1. Riffat S. Future cities and environmental sustainability / S. Riffat, R. Powell, D. Aydin // *Future cities and environmental sustainability*. — 2016. — № 2(1).
2. Dingil A. E. Transport indicator analysis and comparison of 151 urban areas, based on open source data / A. E. Dingil, J. Schweizer, F. Rupi et al. // *Eur. Transp. Res. Rev.* — 2018. — № 10(58).
3. Heddebaut O. City-hubs for smarter cities. The case of Lille “EuraFlandres” interchange / O. Heddebaut, F. Di Cionno // *Eur. Transp. Res. Rev.* — 2018. — № 10(10).
4. Воронов В. А. Транспортно-пересадочные узлы и интермодальные комплексы. Термины и определения / В. А. Воронов, К. Ю. Чистяков // *Architecture and Modern Information Technologies*. — 2020.
5. Шолтысек Я. Общественная логистика — направление развития / Я. Шолтысек, П. Колодзийчик. — Польша, 2010.
6. Данилина Н. В. Маломобильные группы населения в транспортно-пересадочных узлах / Н. В. Данилина, С. В. Привезенцева // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. — 2018.
7. Безверхая Е. П. Функционально-типологические модели в архитектуре интермодальных транспортно-пересадочных узлов / Е. П. Безверхая, А. В. Скопинцев // *Architecture and Modern Information Technologies*. — 2019.

8. Федорова М. В. Оценка общественной эффективности стратегии развития скоростного городского транспорта / М. В. Федорова // Транспортные системы и технологии. — 2019. — Т. 5. — № 1. — С. 26–41. DOI: 10.17816/transsyst20195126-41.

9. Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология / А. А. Зайцев, Ю. Ф. Антонов; под ред. В. А. Гапановича. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 476 с.

10. Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 30 июня 2014 № 552.

11. Сайт Яндекс.Карты. — URL: <https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg/?clid=2270456&l=sat%2Cskl&ll=30.431737%2C59.870115&z=12>.

12. Сайт «Управление федеральных автомобильных дорог “Северо-Запад”». — URL: <http://nwroads.ru/ob-upravlenii/avtomobilnye-dorogi-obshhego-polzovaniya-federalnogo-znacheniya-podvedomstvennye-fkusevzapupravtodor/>.

13. Сайт ГУП «Петербургский метрополитен». — URL: <http://www.metro.spb.ru> (дата обращения: 05.03.2021).

14. ТСН 32-302-2003 г. Москвы (МГСН 1.03-02). Пешеходные переходы вне проезжей части улиц. Объекты мелкорозничной торговли и сервиса в пешеходных переходах.

15. Зайцев А. А. Социализация общественного транспорта в новом технологическом укладе / А. А. Зайцев //

Транспортные системы и технологии. — 2019. — Т. 5. — № 3. — С. 4–17.

16. Калмыков М. Ю. Перспективные технологии пассажирских перевозок в условиях урбанизации // М. Ю. Калмыков, Н. В. Малышев // Бюллетень результатов научных исследований. — 2019.

17. Гогина Е. Г. Формирование транспортно-пересадочного узла и его роль в развитии метрополитена / И. В. Ковченко, Е. Г. Гогина // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. — 2020.

18. Кувшинов А. В. Архитектурно-планировочные решения современных транспортно-пересадочных комплексов г. Москвы / А. В. Кувшинов, Т. В. Шамаева // Инновации и инвестиции. — 2020.

Дата поступления: 10.01.2022

Решение о публикации: 16.02.2022

Контактная информация:

КАЛМЫКОВ Михаил Юрьевич —

kalmykov240886@mail.ru

КОРОВАКОВСКИЙ Евгений Константинович —

канд. техн. наук, профессор; ekorsky@mail.ru

ПОЛЯКОВ Антон Евгеньевич — инженер;

anton.formula1996@yandex.ru

ШОЛТЫСЕК Яцек Антони — д-р экон. наук,

профессор; jasek2855@mail.ru

Development of Kupchino Intermodal Passenger Transport Hub

M. Yu. Kalmykov¹, E. K. Korovyakovskiy¹, A. E. Polyakov³, J. Szoltysek^{1,2}

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²University of Economics in Katowice, Poland, ul.1 May 50, 40-287 Katowice

³Joint-stock Company for Research and Design of Transport Construction Objects “Lengiprotrans”, Moskovsky ave., 143, St. Petersburg, 196105 Russian Federation

For citation: Kalmykov M. Yu., Korovyakovskiy E. K., Polyakov A. E., Szoltysek J. Development of Kupchino Intermodal Passenger Transport Hub // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 56–67. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-56-67

Summary

Purpose: Analysis of the current transport system in the intermodal hub and development of a proposal for the redistribution of passenger traffic in the intermodal hub of Kupchino with an increase in the capacity of the node in the conditions of passenger traffic increase that occurred because of the following: larger frequency in time schedule of passenger suburb trains in Vitebsk direction and population increase on the adjacent territory. Analysis of metro capacity and identification of “bottlenecks” of passenger traffic of station platform. **Methods:** Modeling in Anylogic, statistical research. **Results:** Imitative model of Kupchino intermodal hub using urban ground transport. Proposal has been developed to redistribute passenger traffic within Kupchino transport intermodal hub by building a concourse over the railways and the underground station adjacent to shopping and entertainment complexes with expansion of the list of services for passengers. Analysis and discovery of bottleneck number in the intermodal hub and method for their elimination is made. Scheme for the intermodal hub development, taking into account of intra-city railway communication, is proposed. **Practical significance:** The development of Kupchino intermodal hub in the context of passenger traffic increase, raise of underground entrance capacity, creation of new jobs. Formation of accessible and comfortable transport infrastructure for to serve passengers of all population groups, including those with limited mobility.

Keywords: Passenger, intermodal passenger transport hub (IPTH), passenger traffic, Kupchino, infrastructure.

References

1. Riffat S., Powell R. & Aydin D. Future cities and environmental sustainability. *Fut Cit & Env* 2, 1 (2016)
2. Dingil A.E., Schweizer J., Rupi F. et al. Transport indicator analysis and comparison of 151 urban areas, based on open source data. *Eur. Transp. Res. Rev.* 10, 58 (2018)
3. Heddebaut O., Di Ciommo F. City-hubs for smarter cities. The case of Lille “EuraFlandres” interchange. *Eur. Transp. Res. Rev.* 10, 10 (2018)
4. Voronov V. A. Transportno-peresadochnye uzly i intermodal’nye kompleksy. *Terminy i opredeleniya* [Transport interchange hubs and intermodal complexes. Terms and definitions]. *zhurnal: Architecture and Modern Information Technologies* [Journal: Architecture and Modern Information Technologies]. 2020. (in Russian)
5. Sholtysek Ya., Obshchestvennaya logistika — napravlenie razvitiya [Public logistics — the direction of development]. *Pol’sha* [Poland]. 2010. (in Russian)
6. Danilina N. V. Malomobil’nye gruppy naseleniya v transportno-peresadochnykh uzlakh [Low mobility groups of the population in transport hubs]. *zhurnal: Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel’nogo universiteta* [Journal: Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]. 2018. (in Russian)

7. Bezverkhaya E. P. Funktsional'no-tipologicheskie modeli v arkhitekture intermodal'nykh transportno-peresadochnykh [Functional-typological models in the architecture of intermodal transport hubs]. *zhurnal: Architecture and Modern Information Technologies* [Journal: Architecture and Modern Information Technologies]. 2019. (in Russian)
8. Fedorova M. V. Otsenka obshchestvennoy effektivnosti strategii razvitiya skorostnogo gorodskogo transporta [Evaluation of the social effectiveness of the strategy for the development of high-speed urban transport]. *Transportnye sistemy i tekhnologii* [Transport systems and technologies]. 2019, V. 5, I. 1, pp. 26–41. doi: 10.17816/transsyst20195126-41. (in Russian)
9. Zaytsev A. A. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magnetic levitation transport technology]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2014. 476 p. (in Russian)
10. *Postanovlenie Pravitel'stva Sankt-Peterburga ot 30.06.2014 № 552* [Decree of the Government of St. Petersburg dated June 30, 2014 No. 552]. (in Russian)
11. *Sayt Yandex Karty* [Yandex Maps website]. Available at: <https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg/?clid=2270456&l=sat%2Cskl&ll=30.431737%2C59.870115&z=12>. (in Russian)
12. *Sayt "Upravlenie federal'nykh avtomobil'nykh dorog "Severo-Zapad"* [Website "Department of federal highways "North-West"]. Available at: <http://nwroads.ru/ob-upravlenii/avtomobilnye-dorogi-obshhego-polzovaniya-federalnogo-znacheniya-podvedomstvennye-fku-sevzapupravtorod/>. (in Russian)
13. *Sayt GUP "Peterburgskiy metropoliten"* [The website of the State Unitary Enterprise "Petersburg Metro"]. Available at: <http://www.metro.spb.ru> (accessed 05 March 2021). (in Russian)
14. Zaytsev A. A. Sotsializatsiya obshchestvennogo transporta v novom tekhnologicheskom uklade [Socialization of public transport in the new technological order]. *Transportnye sistemy i tekhnologii* [Transport systems and technologies]. 2019, V. 5, I. 3, pp. 4–17. (in Russian)
15. Gogina E. G. Formirovanie transportno-peresadochnogo uzla i ego rol' v razvitii metropolitena [Formation of a transport hub and its role in the development of the subway]. *zhurnal: Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologii "Integral"* [Journal: International Journal of Applied Sciences and Technologies "Integral"]. 2020. (in Russian)
16. Kuvshinov A. V. Arkhitekturno-planirovochnye resheniya sovremennykh transportno-peresadochnykh kompleksov g. Moskvy [Architectural and planning solutions for modern transport interchange complexes in Moscow]. *zhurnal: Innovatsii i investitsii* [magazine: Innovations and investments]. 2020. (in Russian)
17. *TSN 32-302-2003 g. Moskvy (MGSN 1.03-02) Peshekhodnye perekhody vne proezhey chasti ulits. Ob'ekty melkoroznichnoy trgovli i servisa v peshekhodnykh perekhodakh* [TSN 32-302-2003 of Moscow (MGSN 1.03-02) Pedestrian crossings outside the carriageway of streets. Objects of small retail trade and service in pedestrian crossings]. (in Russian)
18. Kalmykov M. Yu. Perspektivnye tekhnologii passazhirskikh perevozok v usloviyakh urbanizatsii [Perspective technologies of passenger transportation in the conditions of urbanization]. *Malyshev ZhURNAL: Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [JOURNAL: Bulletin of scientific research results]. 2019. (in Russian)

Received: January 10, 2022

Accepted: February 16, 2022

Author's information:

Mikhail Y. KALMYKOV — kalmykov240886@mail.ru

Evgeniy K. KOROVIAKOVSKY — PhD in Engineering, Professor; ekorsky@mail.ru

Anton E. POLYAKOV — Engineer;

anton.formula1996@yandex.ru

Jacek A. SHOLTYSEK — D. Sci. in Engineering,

Professor; jacek2855@mail.ru

УДК: 629.4.016.2

Определение затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза по данным микропроцессорной системы управления

Д. Н. Курилкин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Курилкин Д. Н. Определение затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи по данным микропроцессорных систем управления // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 68–74.

DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-68-74

Аннотация

Цель: Разработка и апробация методики определения затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза с целью уточнения тяговых расчетов. При определении затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи необходимо учитывать текущее состояние как самой батареи, так и осуществляющего ее подзарядку стартер-генератора. Эта задача может быть решена в результате статистического анализа информации, регистрируемой подсистемой бортовой диагностики современных тепловозов. **Методы:** Предложены методы препроцессорной обработки массива информации и статистического анализа сформированной выборки. **Результаты:** Определены вероятные значения мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи в процессе эксплуатации тепловоза. С вероятностью 95 % для 14 секций тепловозов серии 2ТЭ116У средняя зарядная мощность аккумуляторной батареи не превышает 2,6 кВт при математическом ожидании 1,4 кВт. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют уточнить величину мощности отбираемой на вспомогательные нужды и, как следствие, повысить точность определения тягово-энергетических свойств локомотива.

Ключевые слова: Энергоэффективность, аккумуляторная батарея, затраты энергии на подзарядку аккумуляторной батареи, вспомогательные нагрузки.

Введение

Решение задачи повышения энергоэффективности локомотивной тяги за счет оптимизации режимов управления локомотивом предполагает выполнение предварительных тяговых расчетов, точность которых во многом определяется достоверностью исходных данных, в том числе информацией реальных тяговых и энергетических характеристиках локомотивов.

Известно, что уровень энергоэффективности тепловоза в эксплуатации определяется главным образом техническим и теплотехническим состоянием его дизеля [1–4]. Влияние технического состояния вспомогательных механизмов не столь существенно, однако от него зависит

выбор режимов ведения поезда при необходимости выдержки времени хода по перегону. Особенно большое влияние изменение технического состояния вспомогательных нагрузок оказывает на тяговую характеристику локомотива в номинальных режимах его работы.

Затраты энергии на подзарядку аккумуляторной батареи являются одной из составляющих затрат энергии на вспомогательные нагрузки автономного локомотива. Микропроцессорные системы управления и подсистемы бортовой диагностики современных тепловозов позволяют решить задачу прогнозирования этих затрат с высокой точностью и достоверностью [5].

Целью данной работы является разработка и апробация методики прогнозирования затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза при расчете уточненной тяговой характеристики.

В статье приведено решение данной задачи применительно к тепловозам серии 2ТЭ116У, однако подобный подход может быть использован и для других серий локомотивов [4].

Определение мощности, затрачиваемой на зарядку аккумуляторной батареи

Мощность для зарядки аккумуляторной батареи можно определить как произведение напряжения стартер-генератора (бортовой сети) на величину зарядного тока, при этом потери в стартер-генераторе, от которого осуществляется зарядка, учитываются величиной его коэффициента полезного действия $\eta_{\text{СТГ}}$, который может быть принят равным 0,85 [6, 7]:

$$P_{\text{заб}} = \frac{U_{\text{бс}} \cdot I_{\text{заб}}}{\eta_{\text{СТГ}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{бс}}$ — напряжение бортовой сети, В;

$I_{\text{заб}}$ — ток заряда аккумуляторной батареи, А.

Учитывая большое количество различных факторов, влияющих на величину зарядного тока (техническое состояние батареи и текущий уровень ее заряда, температура окружающей среды, величина напряжения бортовой сети), можно предположить, что значение мощности, затрачиваемой на зарядку аккумуляторной батареи, является случайной величиной, что позволяет в расчете использовать ее математическое ожидание с обязательной проверкой гипотезы о нормальном законе распределения [8, 9]. Проверка гипотезы о нормальном законе распределения осуществляется с использованием метода Е. И. Пустыльника [8], согласно которому условием соответствия выборки нормальному

закону распределения является выполнение условий:

$$|A_{P_{\text{заб}}}| \leq 3 \cdot \sqrt{D(A_{P_{\text{заб}}})}; \quad (2)$$

$$|E_{P_{\text{заб}}}| \leq 5 \cdot \sqrt{D(E_{P_{\text{заб}}})}; \quad (3)$$

где $A_{P_{\text{заб}}}$ и $E_{P_{\text{заб}}}$ — асимметрия и эксцесс выборки мощности, затрачиваемой на зарядку аккумуляторной батареи;

$D(A_{P_{\text{заб}}})$ и $D(E_{P_{\text{заб}}})$ — дисперсия асимметрии и эксцесса выборки. Указанные параметры определяются по следующим зависимостям:

$$A_{P_{\text{заб}}} = \frac{1}{n \cdot S_{P_{\text{заб}}}^3} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{\text{заб}i} - \overline{P_{\text{заб}}})^3; \quad (4)$$

$$E_{P_{\text{заб}}} = \frac{1}{n \cdot S_{P_{\text{заб}}}^4} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{\text{заб}i} - \overline{P_{\text{заб}}})^4 - 3; \quad (5)$$

$$D(A_{P_{\text{заб}}}) = \frac{6 \cdot (n-1)}{(n+1) \cdot (n+3)}; \quad (6)$$

$$D(E_{P_{\text{заб}}}) = \frac{24 \cdot n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n+1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)}, \quad (7)$$

где i — номер замера; n — число замеров и вычислений мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи;

$P_{\text{заб}i}$ — мощность, затрачиваемая на зарядку аккумуляторной батареи, полученная после вычислений по результатам замера (Вт);

$\overline{P_{\text{заб}}}$ — математическое ожидание мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи (Вт);

$S_{P_{\text{заб}}}$ — среднеквадратичное отклонение выборки определения мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи.

Математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение мощности, затрачиваемой на

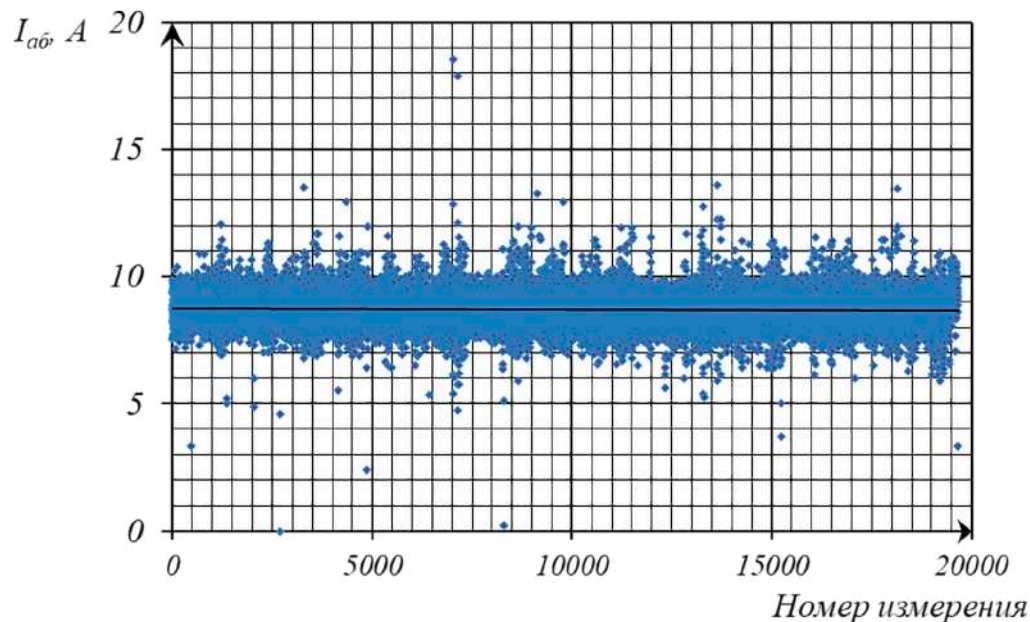


Рис. 1. Результаты измерения тока подзарядки аккумуляторной батареи тепловоза 2ТЭ116У № 078 (секция А)

подзарядку аккумуляторной батареи, определяются по формулам:

$$\overline{P_{\text{заб}}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P_{\text{заб}i}; \quad (8)$$

$$S_{P_{\text{заб}}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{\text{заб}i} - \overline{P_{\text{заб}}})^2}. \quad (9)$$

Для устранения влияния переходных процессов в бортовой сети на результаты определения зарядной мощности аккумуляторной батареи в процессе движения поезда из исходного массива данных должны быть исключены:

- периоды запуска дизеля и первые полчаса работы после них (эти периоды времени характеризуются повышенными значениями зарядного тока);
- периоды работы тормозного компрессора, характеризующиеся значительными колебаниями напряжения бортовой сети.

Характер изменения тока заряда аккумуляторной батареи в установившихся режимах работы силовой цепи тепловоза 2ТЭ116У № 078А показан на рис. 1.

Группированный статистический ряд значений зарядной мощности, соответствующий токам на рис. 1, приведен на рис. 2.

Результаты статистической обработки значений параметров узла зарядки аккумуляторной батареи для 14 секций тепловозов серии 2ТЭ116У приведены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, математическое ожидание мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи для различных секций тепловозов, находится в пределах от 514 до 1417 Вт, а математическое ожидание тока подзарядки аккумуляторной батареи составляет от 3,98 до 10,94 А. У двух секций из 14 зафиксированы отклонения напряжения бортовой сети более четырех вольт от номинального значения.

Гипотеза о нормальном законе распределения мощности на подзарядку аккумуляторной батареи не нашла подтверждения ни для одной из секций тепловозов, так как фактические значения асимметрии и эксцесса существенно превосходят свои допустимые значения.

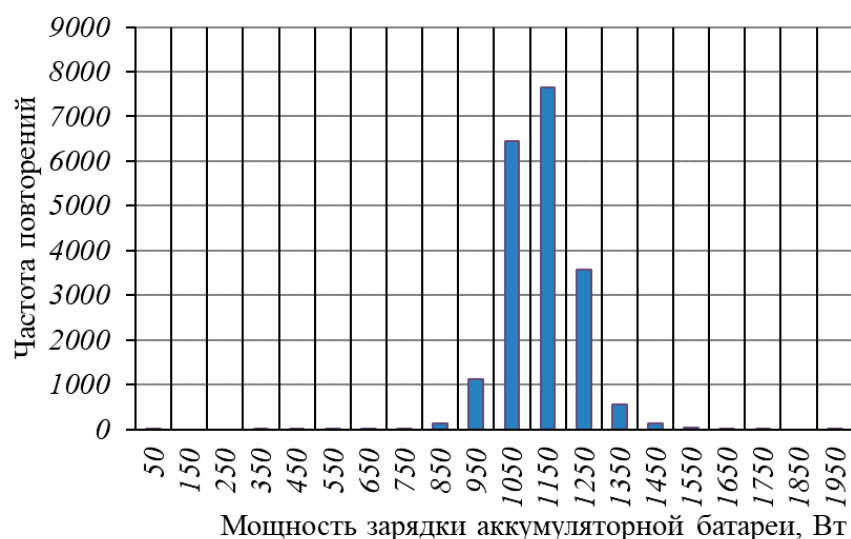


Рис. 2. Группированный статистический ряд значений мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза 2ТЭ116У № 078 (секция А)

ТАБЛИЦА 1. Результаты определения затрат мощности на подзарядку аккумуляторной батареи

№ п/п	Локомотив (секция)	n	Ток батареи, А		Напряжение сети, В		Мощность, затрачиваемая на подзарядку батареи, Вт					
			МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО	АС	ЭК	Доп. А	Доп. Э
1	078 (А)	19 652	8,70	0,75	110,45	0,15	1130	98	0,48	9,8	0,05	0,17
2	078 (Б)	30 817	9,66	1,08	103,74	0,26	1179	137	12,3	723	0,04	0,14
3	079 (А)	30 464	7,30	0,71	110,07	0,17	945	93	0,27	7,3	0,04	0,14
4	080 (А)	30 047	7,27	1,32	108,53	0,26	929	170	1,93	68,6	0,04	0,14
5	082 (Б)	29 686	9,29	1,38	110,13	0,33	1204	179	1,34	12,2	0,04	0,14
6	107 (А)	10 919	6,77	1,21	110,75	0,63	882	158	0,07	6,21	0,07	0,23
7	109 (Б)	24 524	3,98	1,76	109,62	0,29	514	228	0,26	0,008	0,05	0,16
8	110 (А)	19 819	4,56	2,96	105,56	0,37	566	368	0,31	-0,93	0,05	0,17
9	124 (Б)	26 103	5,86	0,79	110,15	0,16	760	103	2,89	86,6	0,05	0,15
10	135 (А)	23 614	5,83	1,76	110,78	0,21	760	230	-0,88	15,6	0,05	0,16
11	143 (А)	15 527	4,39	3,77	109,68	0,44	565	485	1,01	-0,55	0,06	0,20
12	143 (Б)	28 260	6,77	2,68	109,98	0,24	875	345	-0,34	-1,67	0,04	0,15
13	154 (А)	18 393	8,38	1,98	110,98	0,34	1095	261	5,23	27,3	0,05	0,18
14	154 (Б)	19 325	10,94	1,60	110,04	0,25	1417	208	-1,95	15,5	0,05	0,18

Примечание: n — число измерений для данной секции; МО — математическое ожидание величины; СКО — среднеквадратичное отклонение величины; АС — асимметрия измерения; ЭК — эксцесс измерения; Доп. А — допустимая асимметрия измерения мощности подзарядки аккумуляторной батареи; Доп. Э — допустимый эксцесс

Согласно [8], в этом случае для оценки доверительного интервала величины мощности $P_{\text{заб}}$, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи, необходимо воспользоваться следствием из неравенства Чебышева в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{заб}} - S_{P_{\text{заб}}} \cdot p \cdot \sqrt{\frac{1}{1-p}} &\leq P_{\text{заб}} \leq \\ &\leq \bar{P}_{\text{заб}} + S_{P_{\text{заб}}} \cdot p \cdot \sqrt{\frac{1}{1-p}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где p — вероятность нахождения мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи в рассматриваемом интервале.

Приняв вероятность нахождения мощности батареи в заданном диапазоне 0,95 (95 %), получим:

$$\overline{P}_{заб} - 4,24 \cdot S_{P_{заб}} \leq P_{аб} \leq \overline{P}_{аб} + 4,24 \cdot S_{P_{заб}} \quad (11)$$

При этом очевидно, что отрицательные значения мощности, отбираемой на подзарядку аккумуляторной батареи, не будут иметь физического смысла.

Результаты расчета доверительного интервала значений зарядной мощности для доверительной вероятности 95 % приведены в табл. 2.

Как следует из результатов, приведенных в табл. 2, максимальное значение мощности, отбираемой на подзарядку аккумуляторной батареи, не превышает 2,6 кВт. С учетом того, что даже на первой позиции контроллера мощность дизель-генераторной установки составляет 120 кВт, затраты мощности на подзарядку аккумуляторной батареи могут быть оценены на уровне не более 2–2,5 % от мощности дизель-генератора, что позволяет при расчете тяговой характеристики локомотива использовать величину математического ожидания зарядной мощности, вычисленную по данным подсистемы диагностики тепловоза за предшествующий период эксплуатации.

Выводы

1. Предложена методика определения затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи тепловоза по данным подсистемы бортовой диагностики.

2. С вероятностью 95 % средняя зарядная мощность аккумуляторной батареи тепловоза серии 2ТЭ116У в процессе эксплуатации не превышает 2,6 кВт при математическом ожидании от 570 до 1420 Вт.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета доверительного интервала мощности, затрачиваемой на подзарядку аккумуляторной батареи

№ п/п	Локомотив (секция)	Мощность, затрачиваемая на подзарядку батареи, Вт			
		МО	СКО	Min	Max
1	078 (А)	1130	98	814	1545
2	078 (Б)	1179	137	598	1760
3	079 (А)	945	93	551	1339
4	080 (А)	929	170	208	1650
5	082 (Б)	1204	179	445	1962
6	107 (А)	882	158	212	1552
7	109 (Б)	514	228	0	1481
8	110 (А)	566	368	0	2126
9	124 (Б)	760	103	323	1197
10	135 (А)	760	230	0	1735
11	143 (А)	565	485	0	2621
12	143 (Б)	875	345	0	2338
13	154 (А)	1095	261	0	2201
14	154 (Б)	1417	208	535	2298

Примечание: МО — математическое ожидание мощности, отбираемой на подзарядку аккумуляторной батареи, Вт; СКО — величина среднеквадратичного отклонения, Вт; Min — минимальное значение доверительного интервала, Вт; Max — максимальное значение доверительного интервала, Вт.

3. Полученные результаты позволяют повысить точность расчета тяговой характеристики локомотива за счет уточнения прогнозирования затрат энергии на подзарядку аккумуляторной батареи.

Библиографический список

1. Перминов В. А. Влияние технического состояния вспомогательного оборудования тепловозов на их энергоэффективность в эксплуатации / В. А. Перминов, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин, И. Э. Нестеров // Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. — 2015. — № 97. — С. 45–58.
2. Клименко Ю. И. Влияние параметрических отказов оборудования тепловозов на его энергоэффектив-

ность в эксплуатации / Ю. И. Клименко, В. А. Перминов, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин и др. // Локомотив. — 2017. — № 4. — С. 40–45.

3. Перминов В. А. Оперативный контроль уровня энергоэффективности магистрального тепловоза рабочего парка / В. А. Перминов, М. В. Федотов, В. В. Грачев, И. Э. Нестеров // Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. — 2015. — № 97. — С. 45–58.

4. Разработка показателей энергоэффективности тепловозов и методик их определения. Экспериментальные исследования по определению показателя энергоэффективности локомотивов (ПЭЛ) для оценки качества ремонта тепловозов (на примере тепловозов 2ТЭ116У, ТЭП70БС, ТЭМ18ДМ): техн. отчет № 27-2014-19, ОАО «ВНИКТИ»; рук. работы В. А. Перминов. — Коломна, 2014. — 175 с.

5. Система микропроцессорная управления, регулирования и диагностики. Руководство по эксплуатации 27.Т.156.00.00.000 РЭ/АО ВНИКТИ. — Коломна, 2007. — 111 с.

6. Марченко В. С. Электрооборудование тепловозов: справочник / В. С. Марченко, А. А. Сергеев, В. Т. Иванченко и др. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003 — 248 с.

7. Грищенко А. В. Новые электрические машины локомотивов: учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / А. В. Грищенко, Е. В. Казаченко. — М.: ГОУ «Учебного методического центра по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. — 271 с.

8. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. — М.: Наука, 1968 — 288 с.

9. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. — М.: Высш. шк., 2003 — 479 с.

Дата поступления: 15.01.2022

Решение о публикации: 14.02.2022

Контактная информация:

КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич — канд. техн. наук;
kurilkin_d@mail.ru

Definition of Power Expenses on Booster Charge of Rechargeable Battery of Diesel Locomotive According to the Data of Microprocessor Control System

D. N. Kurilkin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kurilkin D. N. Definition of Power Expenses on Booster Charge of Rechargeable Battery of Diesel Locomotive According to the Data of Microprocessor Control System // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 68–74. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-68-74

Summary

Purpose: Development and approbation of the methodology of the definition of power expenses on booster charge of diesel locomotive rechargeable battery with the purpose to clarify tractive calculations. While definition of power expenses on charge of a battery it's necessary to take into account the current state of a battery itself as well as of starter-generator implementing this battery charge. This task can be solved as a result of statistical analysis of information being registered by subsystem of board diagnostics of modern diesel locomotives. **Methods:** The methods of preprocessor treatment of information array and statistical analysis of formed sampling have been proposed. **Results:** Capacity probable values, spent on battery charge in the process of diesel locomotive exploitation, have been defined. With 95 % probability for 14 section of diesel locomotives of

2ТЭ116У series, average charging capacity of rechargeable battery doesn't exceed 2.6 kW at expected value of 1.4 kW. **Practical significance:** The obtained results allow to clarify capacity value selected for auxiliary needs and as a consequence to rise accuracy of locomotive tractive-energetic properties.

Keywords: Power effectiveness, rechargeable battery, power expenses on boost charge of battery, auxiliary loads.

References

1. Perminov V. A. Vliyanie tekhnicheskogo sostoyaniya vspomogatel'nogo oborudovaniya teplovozov na ikh energoeffektivnost' v ekspluatatsii [Influence of the technical condition of the auxiliary equipment of diesel locomotives on their energy efficiency in operation]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo i konstruktorsko-tekhnologicheskogo instituta podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Research and Design Institute of Rolling Stock]. 2015, I. 97, pp. 45–58. (in Russian)
2. Klimenko Yu. I. Vliyanie parametricheskikh otkazov oborudovaniya teplovozov na ego energoeffektivnost' v ekspluatatsii [Influence of parametric failures of diesel locomotive equipment on its energy efficiency in operation]. *Lokomotiv* [Locomotive]. 2017, I. 4, pp. 40–45. (in Russian)
3. Perminov V. A. Operativnyy kontrol' urovnya energoeffektivnosti magistral'nogo teplovoza rabocheho parka [Operational control of the level of energy efficiency of the main diesel locomotive of the working fleet]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo i konstruktorsko-tekhnologicheskogo instituta podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Research and Design Institute of Rolling Stock]. 2015, I. 97, pp. 45–58. (in Russian)
4. Razrabotka pokazateley energoeffektivnosti teplovozov i metodik ikh opredeleniya. Eksperimental'nye issledovaniya po opredeleniyu pokazatelya energoeffektivnosti lokomotivov (PEL) dlya otsenki kachestva remonta teplovozov (na primere teplovozov 2TE116U, TEP70BS, TEM18DM): tekhn. otchet №27-2014-19, OAO "VNIKTi" [Development of indicators of energy efficiency of diesel locomotives and methods for their determination. Experimental studies to determine the energy efficiency index of locomotives (PEL) to assess the quality of repair of diesel locomotives (on the example of diesel locomotives 2TE116U, TEP70BS, TEM18DM)]. Kolomna, 2014. 175 p. (in Russian)
5. Sistema mikroprotsessornaya upravleniya, regulirovaniya i diagnostiki. Rukovodstvo po ekspluatatsii 27.T.156.00.00.000 RE/AO VNIKTi [Microprocessor control, regulation and diagnostics system. Operation manual 27.T.156.00.00.000 RE/JSC VNIKTi]. Kolomna, 2007. 111 p. (in Russian)
6. Marchenko V. S. Elektrooborudovanie teplovozov [Electrical equipment of diesel locomotives]. Moscow: IKTs "Akademkniga" Publ., 2003. 248 p. (in Russian)
7. Grishchenko A. V., Kazachenko E. V. Novye elektricheskie mashiny lokomotivov [New Electric Machines of Locomotives]. Moscow: GOU "Uchebnogo metodicheskoy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2008. 271 p. (in Russian)
8. Pustyl'nik E. I. Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudeniy [Statistical methods of analysis and processing of observations]. Moscow: Nauka Publ., 1968. 288 p. (in Russian)
9. Gmurman V. E. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Theory and Mathematical Statistics: Textbook for High Schools]. Moscow: Vyssh. shk. Publ., 2003. 479 p. (in Russian)

Received: January 15, 2022

Accepted: February 14, 2022

Author's information:

Dmitry N. KURILKIN — PhD in Engineering;
kurilkin_d@mail.ru

УДК 621.337.2.07

Улучшение регулировочных свойств электропоездов постоянного тока с импульсными преобразователями

А. С. Мазнёв, А. А. Калинина, А. В. Волов, С. А. Теличенко, Л. А. Сапожников

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Мазнёв А. С., Калинина А. А., Волов А. В., Теличенко С. А., Сапожников Л. А. Улучшение регулировочных свойств электропоездов постоянного тока с импульсными преобразователями // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 75–81. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-75-81

Аннотация

Цель: Разработка схемных решений импульсных преобразователей с улучшенными регулировочными показателями для электропоездов постоянного тока с коллекторным тяговым приводом. **Методы:** Проведен анализ полупроводниковых систем управления электропоездов постоянного тока. Выполнен расчет частотных характеристик преобразователя при использовании параметров тяговых двигателей электропоезда ЭД4М. **Результаты:** Раздельное регулирование токов обмоток якоря и возбуждения позволяет реализовать устойчивость системы торможения с импульсным преобразователем и отсутствие бросков тока двигателя. **Практическая значимость:** Рассмотренные схемные решения целесообразно применять на электропоездах магистральных железных дорог, что позволит расширить диапазон скоростей в режиме электрического торможения и повысить энергетическую эффективность подвижного состава.

Ключевые слова: Импульсный преобразователь, электропоезд постоянного тока, рекуперативное торможение, частотные характеристики.

Введение

Повышение энергетической эффективности рельсового транспорта путем использования современной полупроводниковой элементной базы в преобразователях, реализующих режимы тяги и торможения в требуемых диапазонах скоростей движения, является важной задачей [1, 2].

Более чем на 80 % электропоездов постоянного тока, составляющих не менее 70 % всего парка моторвагонного подвижного состава (МВПС), использованы коллекторные тяговые двигатели [3].

Импульсное регулирование позволяет снизить потери электроэнергии при пуске электропоезда и реализовать рекуперативное и реостатное торможение в более широком диапазоне скоростей движения. Со снижением стоимости компонентов

силовой электроники открываются большие возможности для модернизации МВПС постоянного тока [4], успех которых зависит от разработки более совершенных силовых преобразователей и систем управления ими [5, 6].

На рис. 1 приведена силовая схема преобразователя моторного вагона электропоезда постоянного тока, которая позволяет реализовать регулирование напряжения на зажимах тяговых двигателей с обмотками возбуждения, постоянно соединенными с якорями двигателей (жесткая связь), и независимых в интервале времени выключенного состояния главного ключевого элемента (VS1) [7].

Для осуществления режима пуска двигателей якоря и обмотки возбуждения подключены

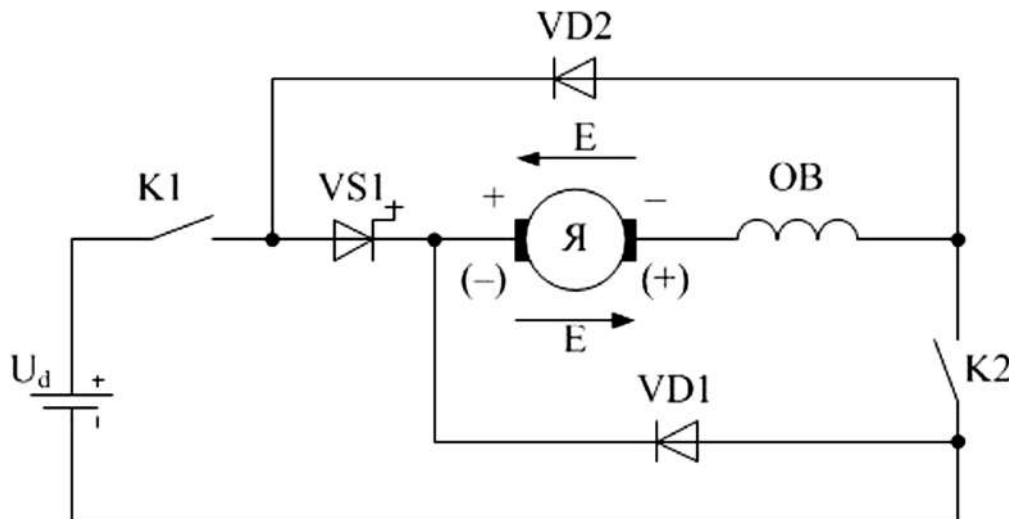


Рис. 1. Принципиальная схема импульсного регулирования в моторном и тормозном режимах

в группы по четыре последовательно в каждой, которые соединены постоянно последовательно при включенном и выключенном ключе VS1.

Моторный режим схемы (рис. 1)

После включения VS образуется контур протекания тока двигателей: «+» источника — контактор K1 — тиристор VS — обмотки двигателей — контактор K2 — «-» источника.

VS — выключен. Ток двигателей замыкается в контуре: обмотка якоря Я — обмотка возбуждения ОБ — контактор K2 — диод VD1.

Режим рекуперации (двигатели реверсируются)

Контактор K1 — замкнут, контактор K2 — разомкнут. Включение VS приведет к образованию контура самовозбуждения генераторов: обмотка якоря Я — обмотки возбуждения ОБ — диод VD2 — тиристор VS — минусовая клемма двигателей. Запирание тиристора VS приведет к образованию контура отдачи энергии источнику питания: Обмотка якоря Я — обмотка возбуждения ОБ — диод VD2 — контактор K1 — источник питания — диод VD1.

Недостаток преобразования — низкая скорость начала рекуперативного торможения, обусловленная свойствами генератора с последовательным возбуждением, и возможность потери управляемости системы регулирования при скорости, превышающей критическую, определяемую параметрами схемы двигателей и напряжением питания.

Структура системы регулирования скорости моторного вагона с разделением обмоток якорей и обмоток возбуждения позволяет воздействовать на магнитный поток в интервале времени, когда обмотки якоря и возбуждения разделены. Схема, приведенная на рис. 2, дает возможность регулировать напряжение двигателей в моторном режиме, величину сопротивления тормозного резистора R_T и влиять на магнитный поток.

Моторный режим схемы (рис. 2)

При замкнутом контакторе K1 периодическое включение тиристора VS1 обеспечивает потребление энергии источника питания, выключение тиристора VS1 разделяет цепи якорей и обмоток возбуждения, ток которых будет замыкаться через диоды VD1, VD2 и резистор R соответственно, степень ослабления или усиления может регулироваться ключом VS3.

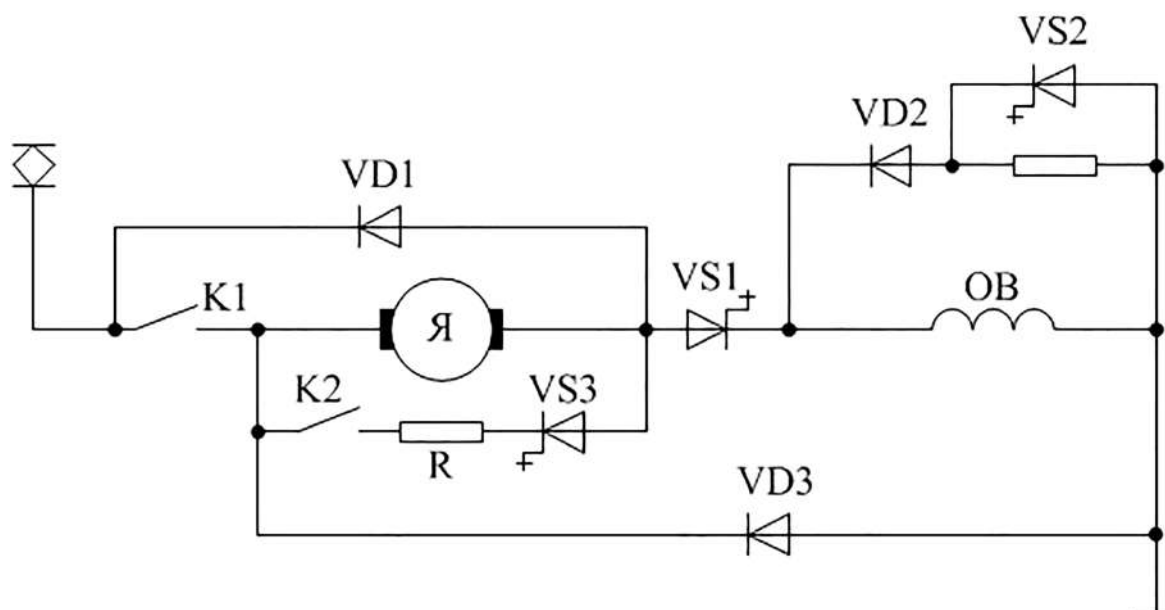


Рис. 2. Комбинированная схема пуска и торможения тяговых двигателей

Рекуперативный режим

Контактор К1 разомкнут, якоря реверсированы, после отпирания VS1 образуется контур самовозбуждения двигателей в генераторном режиме: «+» якорей — VS1 — обмотки возбуждения ОБ — диод VD3 — «-» якорей. При выключении VS1 образуется контур возврата энергии источнику питания: якорь Я — диод VD1 — источник питания — диод VD3 — якорь. Ток обмотки возбуждения замыкается в контуре ОБ — R — VD2 — ОБ или (при необходимости) в контуре с ключом VS3, при отсутствии потребителя энергии реализуется режим реостатного торможения. При разомкнутом контакторе К и реверсированных якорях включение VS1 приведет к нарастанию тока двигателей по контуру «+» якорей — VS1 — обмотки возбуждения ОБ — диод VD2 — «-» якорей. После запираания VS1 ток якорей замкнется через VS3 и тормозной резистор R_Т.

Для регулирования выходного напряжения с целью изменения скорости моторного вагона могут быть использованы системы управления ключевыми элементами, построенные по различным принципам (широтно-импульсное с постоян-

ной частотой, широтно-частотное, с обратными связями по току двигателей, однопозиционные и двухпозиционные системы управления и т. д.).

В данном случае рассматриваются системы управления преобразователями по заданным максимальному ($I_{\max}$) и минимальному ($I_{\min}$) значениям токов двигателей, которые определяют средний пусковой (тормозной) ток и размах пульсации тока ΔI в интервалах времени Δt_1 и Δt_2 (рис. 3) [4].

Размах пульсаций тока тяговых двигателей $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$ при заданных параметрах силовой цепи и напряжения источника питания определяются соотношением интервалов времени открытого состояния импульсного преобразователя Δt_1 , закрытого Δt_2 и периода T .

В установившемся режиме после подключения нагрузки к сети в интервале времени Δt_1 в нем накапливается электромагнитная энергия W_1 :

$$W_1 = \frac{L_n \cdot I_{\max}^2}{2} = \frac{L_n}{2} \left(I_{\text{cp}} + \frac{\Delta I}{2} \right)^2,$$

где L_n — индуктивность цепи тяговых двигателей; I_{cp} — среднее значение пускового тока.

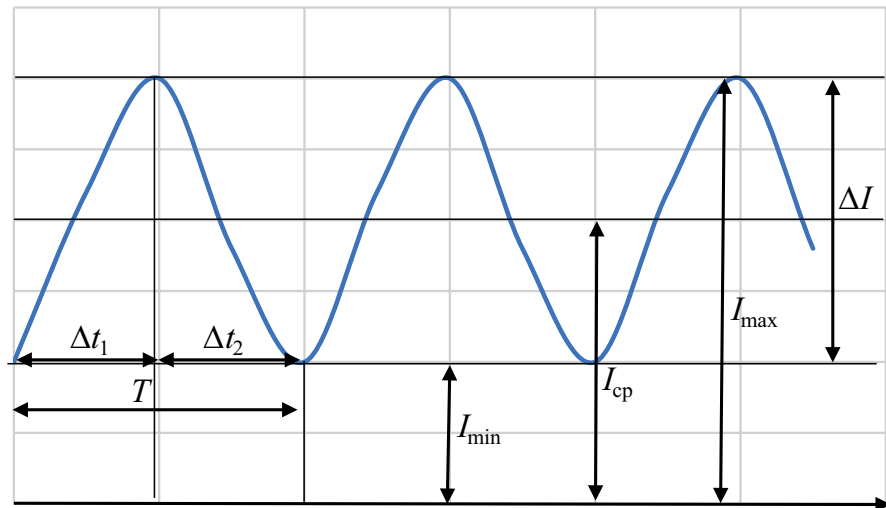


Рис. 3. Форма тока тяговых двигателей T — период частоты регулирования, $T = \Delta t_1 + \Delta t_2$

После отключения двигателей от источника питания в интервале Δt_2 ток снижается до значений $I_{\min}$, определяя запас электромагнитной энергии:

$$W_2 = \frac{L_n \cdot I_{\min}^2}{2} = \frac{L_n}{2} \left(I_{\text{cp}} + \frac{\Delta I}{2} \right)^2.$$

Учитывая данные соотношения, можно записать:

$$\Delta W = W_1 - W_2 = \frac{L_n}{2} \left(I_{\text{cp}}^2 + 2I_{\text{cp}} \frac{\Delta I}{2} + \frac{\Delta I^2}{4} \right) - \left(I_{\text{cp}}^2 + 2I_{\text{cp}} \frac{\Delta I}{2} - \frac{\Delta I^2}{4} \right) = L_n I_{\text{cp}} \Delta I.$$

Следовательно, можно написать:

$$L_n I_{\text{cp}} \cdot \Delta I = U_{\text{cp}} I_{\text{cp}} \Delta t_2,$$

где U_{cp} — среднее значение напряжения двигателей.

Откуда:

$$\Delta I = U_{\text{cp}} \Delta t_2.$$

Так как

$$U_{\text{cp}} = U_d \cdot \lambda, \Delta t_2 = (T - \Delta t_1),$$

где U_d — напряжение питания;

λ — коэффициент заполнения,

то:

$$\Delta I = \frac{U_d \cdot \lambda (1 - \lambda)}{L_n \cdot f},$$

где f — частота регулирования $f = \frac{1}{T}$;

L_n — суммарная индуктивность обмоток тяговых двигателей.

Используя параметры тяговых двигателей электропоезда ЭД4М, можно рассчитать на основе известных соотношений частотные характеристики, под которыми понимаются зависимости частоты регулирования преобразователя в функции скорости моторного вагона при пуске и рекуперативном торможении [8, 9].

Частота регулирования f и параметры преобразования, в свою очередь, связаны соотношением:

$$f = \frac{U_d \cdot \lambda (1 - \lambda)}{L_n \cdot \Delta I},$$

где ΔI — размах пульсации тока двигателей в схеме преобразования в замкнутой системе регулирования с контролем мгновенных значений тока $I_{\max}$, $I_{\min}$;

$V_{\text{кр}}$ — критическая скорость (максимально допустимая скорость импульсного рекуперативного торможения двигателями с последовательным возбуждением), определяемая выражением:

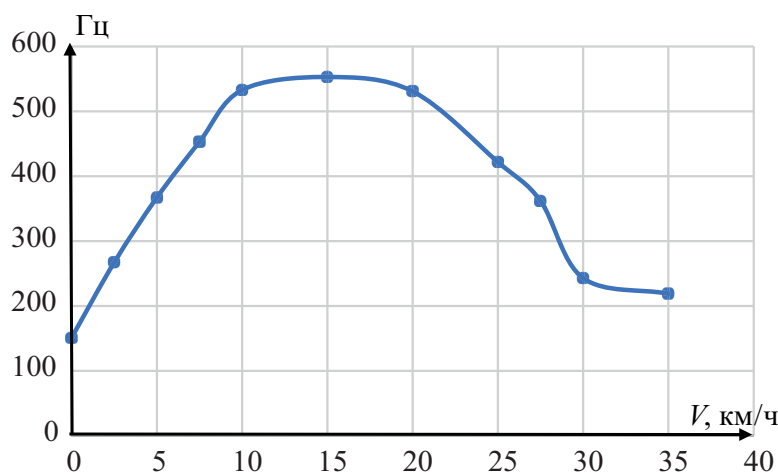


Рис. 4. Частотная характеристика преобразователя

$$V_{кр} = \frac{U_d - I_{ср} \cdot \sum R}{n \cdot C_v \Phi},$$

где $\sum R$ — сопротивление обмоток двигателей, включенных последовательно;

$C_v \Phi$ — магнитный поток;

$n = 4$ — количество тяговых двигателей.

По результатам расчетов на рис. 4 представлена частотная характеристика.

Влияние ослабления магнитного потока (изменение коэффициента ослабления возбуждения β) на критическую скорость рекуперативного торможения, что реализуется рассмотренными схемами преобразования и подтверждается расчетом для следующих исходных данных:

$$I_{дв} = 400 \text{ А}; C_v \Phi = 21,5 \text{ В/км/ч};$$

$$\sum R = 0,77 \text{ Ом}; U_{кс} = 3300 \text{ В};$$

$$\beta = 1; V_{кр} = 42 \text{ км/ч};$$

$$\beta = 0,5; V_{кр} = 51,2 \text{ км/ч};$$

$$\beta = 0,25; V_{кр} = 71,6 \text{ км/ч}.$$

Выводы

1. Жесткая связь обмоток якорей и возбуждения ограничивает скорость начала рекуперативного торможения.

2. Для исключения потери управления преобразователем целесообразно использовать раздельное регулирование в режиме торможения обмотки якорей и возбуждения двигателей, что дает возможность сохранить устойчивость системы торможения, исключив броски тока якорей на превышающие установленные значения.

Библиографический список

1. Титова Т. С. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 1 / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, А. Н. Сычугов // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 6(79). — С. 40–44.
2. Титова Т. С. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 2 / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, А. Н. Сычугов // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 2(81). — С. 52–55.
3. Мазнев А. С. Влияние принципа управления полупроводниковым преобразователем на регулировочные свойства и характеристики электропоездов постоянного тока / А. С. Мазнев, А. А. Киселев, А. В. Волов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2020. — Вып. 1. — С. 70–84.
4. Киселев А. А. Структура и принципы управления многорежимным полупроводниковым преобразователем постоянного тока / А. А. Киселев, А. С. Мазнев, А. В. Третьяков и др. // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2019. — № 6. — С. 27–31.

5. Розанов Ю. К. Силовая электроника: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электроника, электромеханика и электротехнологии» / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. — 2-е изд., стер. — М.: МЭИ, 2009. — 631 с.

6. Антюхин В. М. Устройства силовой электроники железнодорожного подвижного состава: учеб. пособие / В. М. Антюхин, А. А. Богомяков, Ю. А. Евсеев и др.; под ред. Ю. М. Инькова и Ф. И. Ковалева. — М.: ФГБОУ «Учебно методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. — 471 с.

7. Мазнев А. С. Поиск эффективных технических решений тягового привода электрического подвижного состава с тиристорными преобразователями: дисс. ... д-ра техн. наук / А. С. Мазнев. — Ленинград, 1991. — 502 с.

8. Назаров О. Н. Совершенствование методов определения и сравнительного анализа тягово-энергетических показателей пригородных электропоездов: дисс. ... канд. техн. наук / О. Н. Назаров. — М., 2000. — 161 с.

9. Некрасов В. И. Импульсное управление тяговыми двигателями электрического подвижного состава постоянного тока: учебное пособие / В. И. Некрасов; Ленингр. ин-т инженеров ж.-д. транспорта им. акад. В. Н. Образцова. Кафедра «Электр. тяга». — Ленинград: [б. и.], 1972. — 114 с.

Дата поступления: 11.02.2022

Решение о публикации: 25.02.2022

Контактная информация:

МАЗНЕВ Александр Сергеевич — д-р техн. наук, профессор; maznev-as@mail.ru

КАЛИНИНА Анна Андреевна — старший преподаватель; anya-c@mail.ru

ВОЛОВ Алексей Викторович — старший преподаватель; alekseyvolov@yandex.ru

ТЕЛИЧЕНКО Станислав Алексеевич — старший преподаватель; telichenko@pgups.ru

САПОЖНИКОВ Лев Александрович — аспирант; leonshumacher@yandex.ru

Improvement of Regulating Properties of DC Electric Trains with Pulse Converters

A. S. Maznev, A. A. Kalinina, A. V. Volov, S. A. Telichenko, L. A. Sapozhnikov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Maznev A. S., Kalinina A. A., Volov A. V., Telichenko S. A., Sapozhnikov L. A. Improvement of Regulating Properties of DC Electric Trains with Pulse Converters // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 75–81. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-75-81

Summary

Purpose: Development of circuit solutions for pulse converters with improved control parameters for DC electric trains with a collector traction drive. **Methods:** The analysis of semiconductor control systems of DC electric trains is carried out. The calculation of frequency characteristics of the converter at using the parameters of traction motors of ED4M electric train is made. **Results:** Separated regulation of the currents of the armature and excitation windings makes it possible to realize the stability of braking system with pulse converter and the absence of motor current surges. **Practical importance:** It is expedient to use the considered circuit solutions on mainline railway electric trains that will allow expanding the speed range in electric braking mode and increasing the energy efficiency of a rolling stock.

Keywords: Pulse converter, DC electric train, regenerative braking, frequency characteristics.

References

1. Titova T. S. Perspektivy razvitiya tyagovogo podvizhnogo sostava. Chast' 1 [Prospects for the development of traction rolling stock. Part 1]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2018, I. 6(79), pp. 40–44. (in Russian)

2. Titova T. S. Perspektivy razvitiya tyagovogo podvizhnogo sostava. Chast' 2 [Prospects for the development of traction rolling stock. Part 2]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2019, I. 2(81), pp. 52–55. (in Russian)

3. Maznev A. S. Vliyaniye printsipa upravleniya poluprovodnikovym preobrazovatelem na regulirovochnyye svoystva i kharakteristiki elektropoezdov postoyannogo toka [Influence of the control principle of a semiconductor converter on the control properties and characteristics of direct current electric trains]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2020, I. 1, pp. 70–84. (in Russian)

4. Kiselev A. A. Struktura i printsipy upravleniya mnogorezhimnym poluprovodnikovym preobrazovatelem postoyannogo toka [Structure and principles of control of a multi-mode semiconductor DC converter]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2019, I. 6, pp. 27–31. (in Russian)

5. Rozanov Yu. K. *Silovaya elektronika: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy, obuchayushchikhsya po napravleniyu podgotovki "Elektronika, elektromekhanika i elektrotekhnologii"* [Power electronics: a textbook for students of higher educational institutions studying in the direction of training "Electronics, electromechanics and electrotechnology"]. Moscow: MEI Publ., 2009. 631 p. (in Russian)

6. Antyukhin V. M. *Ustroystva silovoy elektroniki zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Devices of power electronics of railway rolling stock]. Moscow: FGOU "Uchebno-

metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2011. 471 p. (in Russian)

7. Maznev A. S. *Poisk effektivnykh tekhnicheskikh resheniy tyagovogo privoda elektricheskogo podvizhnogo sostava s tiristornymi preobrazovatelyami. Dokt. Diss* [Search for effective technical solutions for the traction drive of electric rolling stock with thyristor converters. Doct. Diss]. Leningrad, 1991. 502 p. (in Russian)

8. Nazarov O. N. *Sovershenstvovanie metodov opredeleniya i sravnitel'nogo analiza tyagovo-energeticheskikh pokazateley prigorodnykh elektropoezdov. Kand. Diss* [Improvement of methods for determining and comparative analysis of traction and energy indicators of suburban electric trains. Cand. Diss]. Moscow, 2000. 161 p. (in Russian)

9. Nekrasov V. I. Impul'snoe upravlenie tyagovymi dvigatelyami elektricheskogo podvizhnogo sostava postoyannogo toka [Impulse control of traction motors of DC electric rolling stock]. *Leningr. in-t inzhenerov zh.-d. transporta im. akad. V. N. Obratsova. Kafedra "Elektr. tyaga"* [Leningrad. Institute of Railway Engineers transport them. acad. V. N. Obratsova. Department of "Electr. traction"]. Leningrad: 1972. 114 p. (in Russian)

Received: February 11, 2022

Accepted: February 25, 2022

Author's information

Alexander S. MAZNEV — D. Sci. in Engineering, Professor; maznev-as@mail.ru

Anna A. KALININA — Senior Lecturer; anya-c@mail.ru

Aleksey V. VOLOV — Senior Lecturer; alekseyvolov@yandex.ru

Stanislav A. TELICHENKO — Senior Lecturer; telichenko@pgups.ru

Lev A. SAPOZHNIKOV — Graduate student; leonshumacher@yandex.ru

УДК 656.2

Исследование информационного взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в логистических цепях доставки груза

Г. И. Никифорова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Никифорова Г. И. Исследование информационного взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в логистических цепях доставки груза // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 82–89. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-82-89

Аннотация

Цель: Исследовать развитие логистической цепи поставок от простой до максимальной, рассмотреть эволюцию информационных потоков логистического процесса до единой цифровой платформы. Проанализировать предпосылки перехода к цифровой логистике и уровень развития в настоящее время. Построить дескриптивную модель взаимодействия железнодорожного и морского транспорта. **Материалы и методы:** Исследование взаимодействия станции и порта производится по двум основным направлениям: передача информации, продвижение грузопотока. Представлен анализ развития и классификация цепей поставок. Построены и проанализированы дескриптивные модели документооборота продвижения импортного грузопотока. **Результаты:** Указана необходимость параллельного развития транспортных и терминальных комплексов, инфраструктуры ОАО «РЖД» для перехода к этапу сетевой логистики. Представлена классификация информационных потоков. Построена дескриптивная модель информационного взаимодействия порта и станции. **Практическая значимость:** Показана возможность сокращения излишнего документооборота между портом и припортовой станцией, представлена необходимость таких действий для перехода к единой сетевой платформе.

Ключевые слова: Логистический процесс, передача груза, взаимодействие смежных видов транспорта, припортовая станция, морской порт, терминал, дескриптивная модель, информационное взаимодействие, документооборот, алгоритм передачи, импортный грузопоток.

Введение

Исследование взаимодействия смежных видов транспорта приобретает особое значения в условиях развития международных транспортных коридоров. При этом важно использовать огромный потенциал географического положения Российской Федерации и ее транспортной системы [1]. Таким образом, различные виды транспорта на внутреннем рынке транспортных услуг следует рассматривать не только как конкурирующих участников, а как партнеров — представителей логистических цепей поставки грузов [2]. Взаимодействие смежных видов транспорта широко

исследовалось в работах ученых в последние годы [3–5]. Традиционно терминалы крупных портов обслуживают железнодорожный и автомобильный виды транспорта [6–9]. Для повышения эффективности взаимодействия смежных видов транспорта используются различные методы, такие как теория игр, оптимизационные методы, теория управления запасами [10] и др. Особенности конкретных логистических цепей поставок во многом определяют выбор вида транспорта, маршрута, перевозчика и проч. Однако нельзя не отметить возрастающий интерес к железнодорожным перевозкам в последние годы [11, 12], особенно в сфере контейнер-

ных перевозок. Стыковым пунктом во взаимодействии железнодорожного и морского видов транспорта является система «порт — станция». Именно работа этой системы, анализ факторов взаимодействия и специфики проблем требует внимательного и глубокого исследования. В данной работе приведены результаты анализа информационного взаимодействия железнодорожной станции и морского порта, построена дескриптивная модель указанного процесса.

Материалы и методы

Исследование взаимодействия станции и порта производится по двум основным направлениям: передача информации, продвижение грузопотока. Представлен анализ развития и классификация цепей поставок. Построены и проанализированы дескриптивные модели документооборота продвижения импортного грузопотока.

Переход к сетевой логистике связан с неизбежной глобализацией мировой торговли и цифровизацией транспортных процессов. Спад мировой экономики в связи с пандемией в последние годы служит переходным этапом для последующего скачкообразного роста мировой торговли. Таким образом, транспортная отрасль должна своевременно и в полном объеме обеспечить потребности в перевозках. Например, уже в конце 2021 — начале 2022 г. наблюдается дефицит вагонного парка для перевозки нефтепродуктов на фоне возрастающих объемов их добычи. Современные условия производства, распределения и сбыта продукции ведут к переходу от традиционных производственно-сбытовых цепей поставок к организации сетей снабжения.

Продвижение груза в логистических цепях поставки неизбежно связано со взаимодействием различных участников перевозки. Даже при перевозке груза одним видом транспорта происходит передача груза со склада терминала на транспортное средство в начале перевозки и из транс-

портного средства на терминал при окончании перевозки. На практике, конечно, такие упрощенные схемы при продвижении больших грузопотоков крайне редки. Как правило, в логистических цепях поставки грузов участвует несколько видов транспорта, при этом передача и преобразование грузопотока с одного вида транспорта на другой происходит через терминал. Прямой вариант передачи груза по расчетам не выгоден для того или иного перевозчика. Продвижение грузопотока с использованием железнодорожного транспорта, как правило, в силу специфики его работы связано на каком-то этапе с передачей груза на автомобильный или водный транспорт. При этом грузовой терминал будет служить не столько для хранения груза, сколько для преобразования грузопотока. Именно поэтому все чаще возникает обоснованная необходимость в строительстве «сухих портов», которые, по сути, служат буферами, сглаживающими неравномерность грузопотоков в железнодорожных и морских перевозках.

Известно, что логистический процесс поставки груза — это взаимодействие двух подсистем информационной и материальной. Чем сложнее структура логистической цепи, тем сложнее информационное взаимодействие между ее участниками. В связи с этим целесообразно исследовать развитие логистических цепей и их классификацию.

Прямая логистическая цепь состоит из фокусной компании, грузоотправителя и грузополучателя первого уровня, т. е. компании и предприятия, которые передают груз фокусной компании с использованием того или иного вида транспорта. Следует отметить, что вектор движения информационного и материального потока не совпадает, так как необходим обмен информацией между участниками логистической цепи во «встречном» материальному потоку направлении. Расширенная логистическая цепь характеризуется добавлением грузоотправителей и грузополучателей

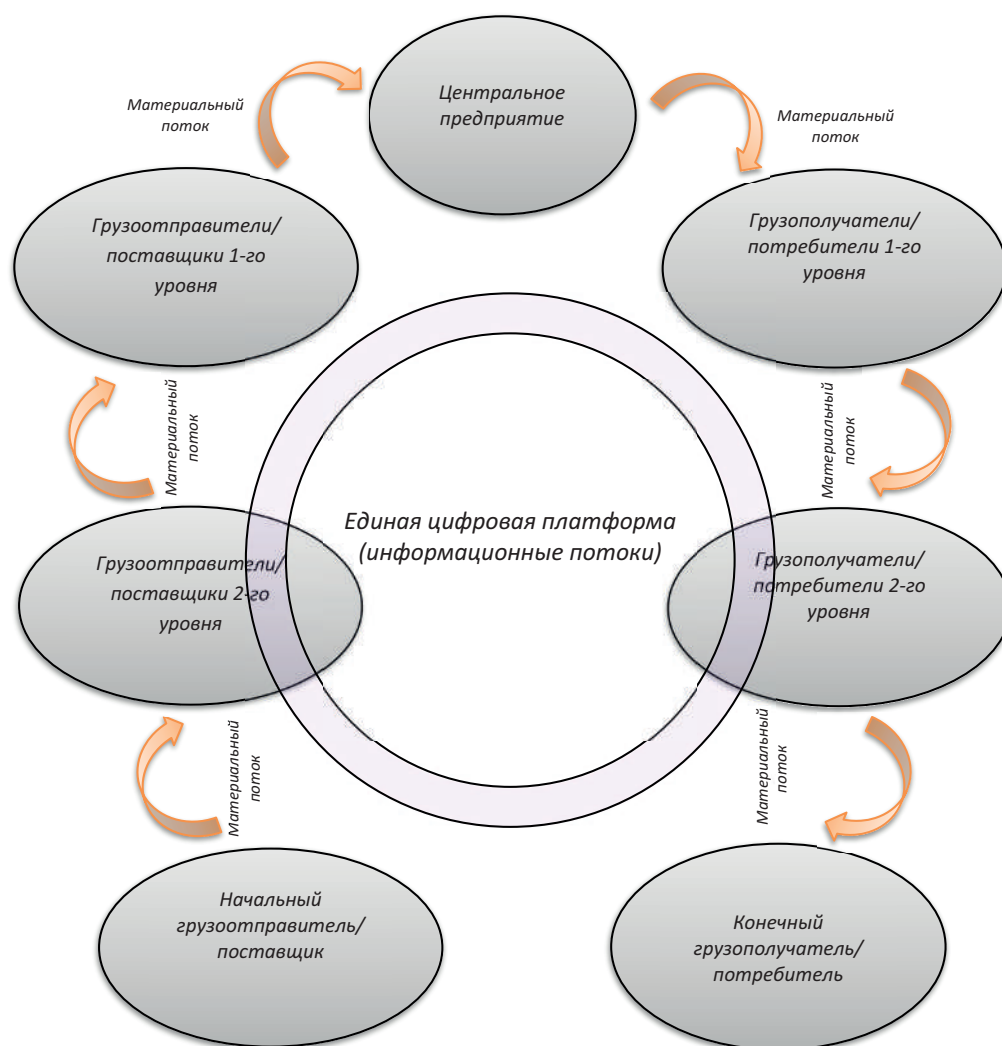


Рис. 1. Единая цифровая платформа в максимальной логистической цепи

второго уровня. При этом информационное взаимодействие неизбежно усложняется.

Максимальная логистическая цепь начинается от поставщиков исходного сырья, далее следуют грузоотправители различных уровней и транспортно-логистические предприятия вплоть до фокусной компании, сети распределения до конечных (индивидуальных) грузополучателей, включая логистических и прочих посредников (рис. 1). Таким образом, информационные потоки усложняются, происходит обмен информацией между участниками максимальной логистической цепи, который необходимо преобразовать до единой цифровой платформы.

Единая цифровая платформа представляет собой модель, объединяющую всех участников логистической цепи, обеспечивающую передачу информации в режиме реального времени. Таким образом, возрастает скорость передачи информации и адаптивность логистической цепи. Эффективность функционирования логистической цепи и всех ее участников возрастет за счет принятия своевременных управляющих решений, основанных на совокупности информации единой сетевой платформы. Переход к сетевой логистике характеризуется не только и не столько цифровизацией производственных процессов, сколько перестройкой в качественно новое состояние,

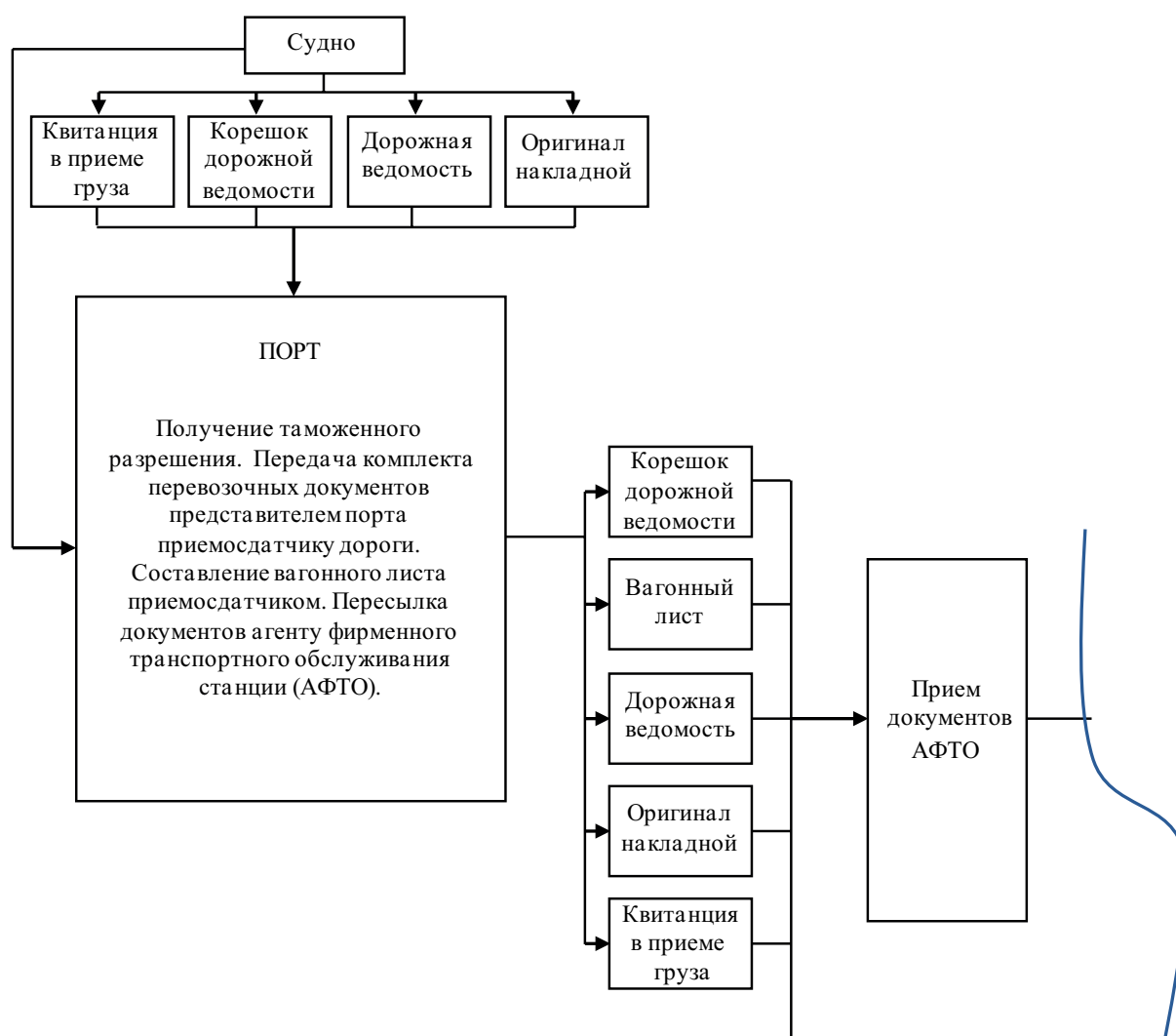


Рис. 2. Deskриптивная модель документального сопровождения импортного груза от момента прибытия судна до момента передачи документов в агентство фирменного транспортного обслуживания (АФТО)

начальным этапом которого и послужит создание единой цифровой платформы.

Рассмотрим участие железнодорожного транспорта во взаимодействии с морским в логистической цепи поставки груза. Прежде чем сформируется материальный поток, необходимо осуществить планирование, передачу данных о предстоящей перевозке и т. д. Учитывая перспективы создания единой цифровой платформы, важность фактора информационного взаимодействия смежных видов транспорта сложно переоценить. Опыт развития железнодорожного транспорта и

транспортной системы в целом показывает, что со временем объем передаваемой информации только возрастает. Проблему передачи и обработки информационных потоков решает усложнение технических средств и устройств, повышение их мощности, внедрение новейших технологий в области передачи данных, цифровизация грузовых перевозок. По тому, в каком виде передается информация, сегодня можно судить об уровне оснащённости перевозчика, о его конкурентоспособности на рынке транспортных услуг. Однако даже новейшие технологии передачи информации

- информационная подсистема обеспечивает функционирование логистического процесса, предшествует, сопровождает грузопоток и действует после окончания перевозки;
- эволюция логистических систем возможна при параллельном развитии транспортных и терминальных комплексов;
- классификация и анализ развития информационной подсистемы логистических цепочек позволяет говорить о создании единой цифровой платформы и переходе к сетевой логистике;
- построение дескриптивной модели информационного обмена на стыке взаимодействия железнодорожного и морского видов транспорта позволяет выявить избыточность документооборота и наметить пути оптимизации.

Библиографический список

1. Покровская О. Д. Международная логистика транс-сибирской магистрали: использование транзитного потенциала России / О. Д. Покровская, В. М. Самуйлов // *Инновационный транспорт*. — 2016. — № 3(21). С. 3–7.
 2. Сергеева Т. Г. Повышение конкурентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации / Т. Г. Сергеева, Г. И. Никифорова // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2020. — Т. 17. — № 3. — С. 428–436.
 3. Титова Т. С. Междисциплинарное положение теории терминалистики / Т. С. Титова, О. Д. Покровская // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2018. — Т. 15. — № 2. — С. 248–260.
 4. Pokrovskaya O. Formation of logistics facilities in transport corridors (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering / O. Pokrovskaya, S. Orekhov, S. Kapustina, N. Kizyan. — DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012032.
 5. Bersenev A. Silk Road Rail Corridors Outlook and Future Perspectives of Development / A. Bersenev, M. Chikilevskaya, I. Rusinov // *Procedia Computer Science*. — 2020. — Vol. 167. — Pp. 1080–1087. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.407>.
 6. Никифорова Г. И. Построение дескриптивной модели логистической цепи доставки грузов при взаимодействии железнодорожного и морского транспорта / Г. И. Никифорова // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2020. — Т. 17. — № 4. — С. 545–551.
 7. Маликов О. Б. Классификация, иерархия и идентификация объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Б. Маликов, О. Д. Покровская // *Транспорт: наука, техника, управление*. — 2017. — № 8. — С. 13–21.
 8. Маликов О. Б. *Деловая логистика* / О. Б. Маликов. — СПб.: Политехника, 2003. — 223 с.
 9. Кудрявцев В. А. Основы эксплуатационной работы железных дорог: учеб. пособие / В. А. Кудрявцев, В. И. Ковалев, А. П. Кузнецов и др.; под ред. В. А. Кудрявцева. — М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 352 с.
 10. Стерлигова А. Н. Управление запасами в цепях поставок: учебник / А. Н. Стерлигова. — М.: ИНФРА-М, 2013. — 430 с.
 11. Сергеева Т. Г. Совершенствование управления парком частных вагонов / Т. Г. Сергеева // *Известия Петербургского ун-та путей сообщения*. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Т. 16. — Вып. 3. — С. 449–454.
 12. Сатторов С. Б. Исследование способа размещения технических станций / С. Б. Сатторов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. — Брянск, 2017. — № 4 — С. 463–468. — DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-04-463-468.
- Дата поступления: 28.01.2022
Решение о публикации: 17.02.2022
- Контактная информация:**
НИКИФОРОВА Гузель Исламовна — канд. техн. наук, доцент; guzel.spb@mail.ru

Research of Informational Interaction Between Railway and Sea Transport in Logistic Chains of Cargo Delivery

G. I. Nikiforova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Nikiforova G. I. Research of Informational Interaction Between Railway and Sea Transport in Logistic Chains of Cargo Delivery // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 82–89. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-82-89

Summary

Purpose: To investigate the development of logistic chain of supplies from simple to maximal one, to consider informational flow evolution of logistic process till a single digital platform. To analyze the prerequisites for the transfer to a digital logistics and the level of development at the moment. To build the descriptive model of the interaction between a railway and sea transport. **Methods:** The research of the interaction between a station and a port is pursued in two major directions: information transfer, cargo traffic progression. The analysis of the development and classification of delivery chains is submitted. The descriptive models of document flow on import cargo traffic progression are built and analyzed. **Results:** The necessity of parallel development of transport and terminal complexes, RZD JCS infrastructure is pointed out for the transfer to network logistics stage. Information flow classification is presented. The descriptive model of the information interaction between a sea and port is built. **Practical importance:** The possibility to cut surplus document flow between a port and near-the-port station is shown, the need in such actions for the transfer to a single network platform is presented.

Keywords: Logistic process, cargo transfer, interaction of transport adjacent kinds, near-the-port station, seaport, terminal, descriptive model, informational interaction, document flow, transfer algorithm, imported flow of cargo.

References

1. Pokrovskaya O. D., Samuylov V. M. Mezhdunarodnaya logistika transsibirskoy magistrali: ispol'zovanie tranzitnogo potentsiala Rossii [International logistics of the Trans-Siberian Railway: the use of the transit potential of Russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2016, I. 3 (21), pp. 3–7. (in Russian)
2. Sergeeva T. G., Nikiforova G. I. Povyshenie konkurentosposobnosti transportno-logisticheskikh kompaniy v usloviyakh tsifrovizatsii [Improving the competitiveness of transport and logistics companies in the context of digitalization]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Izvestiya of the Petersburg University of Communications]. 2020, V. 17, I. 3, pp. 428–436. (in Russian)
3. Titova T. S., Pokrovskaya O. D. Mezhdistsiplinarnoe polozhenie teorii terminalistiki [Interdisciplinary position of the theory of terminalistics]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2018, V. 15, I. 2, pp. 248–260. (in Russian)
4. Pokrovskaya O., Orekhov S., Kapustina, N., Kizyan, N. Formation of logistics facilities in transport corridors (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 918 (1), stat'ya No 012032//DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012032
5. Aleksander Bersenev, Marina Chikilevskaya, Igor Rusinov. Silk Road Rail Corridors Outlook and Future Perspectives of Development, *Procedia Computer Science*, 2020, V. 167, pp. 1080–1087, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.407>.
6. Nikiforova G. I. Postroenie deskriptivnoy modeli logisticheskoy tsepi dostavki грузов pri vzaimodeystvii zhe-

leznodorozhnogo i morskogo transporta [Construction of a descriptive model of the logistics chain for the delivery of goods in the interaction of rail and sea transport]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2020, V. 17, I. 4, pp. 545–551. (in Russian)

7. Malikov O. B. Klassifikatsiya, ierarkhiya i identifikatsiya ob"ektov terminal'no skladskoy infrastruktury [Classification, hierarchy and identification of objects of terminal warehouse infrastructure]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management]. 2017, I. 8, pp. 13–21. (in Russian)

8. Malikov O. B. *Delovaya logistika* [Business logistics]. St. Petersburg: Politehnika Publ., 2003. 223 p. (in Russian)

9. *Osnovy ekspluatatsionnoy raboty zheleznnykh dorog* [Fundamentals of operational work of railways]. Moscow: "Akademiya" Publ., 2005. 352 p. (in Russian)

10. Sterligova A. N. *Upravlenie zapasami v tsepyakh postavok* [Inventory management in supply chains]. Moscow: INFRA-M Publ., 2013. 430 p. (in Russian)

11. Sergeeva T. G. Sovershenstvovanie upravleniya parkom privatnykh vagonov [Improving the management of the fleet of private cars]. *Izvestiya Peterburgskogo un-ta putey soobshcheniya* [News of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2019, V. 16, I. 3, pp. 449–454. (in Russian)

12. Sattorov S. B. Issledovanie sposoba razmeshcheniya tekhnicheskikh stantsiy [Study of the method of placing technical stations]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and technical bulletin of the Bryansk State University]. Bryansk, 2017, I. 4, pp. 463–468. DOI: 10.22281/2413-9920- 2017-03-04-463-468. (in Russian)

Received: January 28, 2022

Accepted: February 17, 2022

Author's information:

Guzel I. NIKIFOROVA — PhD in Engineering, Associate Professor; guzel.spb@mail.ru

УДК 624.21

Методика определения динамических воздействий подвижного состава на мосты при высокоскоростном движении

В. Н. Смирнов, А. В. Ланг, Н. А. Лабутин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Смирнов В. Н., Ланг А. В., Лабутин Н. А. Методика определения динамических воздействий подвижного состава на мосты при высокоскоростном движении // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 90–96. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-90-96

Аннотация

Цель: Учет динамического характера воздействий сил от подвижного состава на мост при учете неровностей проезда в условиях высокоскоростного движения в расчетной модели «Подвижные динамические силы на балке». **Методы:** Вывод системы дифференциальных уравнений предлагаемой системы аналитическим методом. **Результаты:** Уравнения для определения величины сил инерции X_1 и X_2 подрессоренной части экипажа. **Практическая значимость:** Получение уточненной картины динамической работы мостового сооружения в условиях высокоскоростного движения путем замены расчетной модели «Подвижные силы на балке» моделью «Подвижные динамические силы на балке».

Ключевые слова: Мост, поезд, динамика, высокоскоростные магистрали.

Решение динамической задачи взаимодействия элементов системы «мост — поезд» в настоящее время осуществляется преимущественно в результате численного моделирования. При этом выбор расчетной модели зависит от поставленной задачи и вследствие этого необходимой детализации элементов системы «мост — поезд». Возможно использование различных динамических моделей (рис. 1, 2).

Модель 1. Тип «Подвижные силы на балке». Пролетное строение моделируется упругой балкой конечной массы с вязким затуханием, поезд — системой движущихся сил (рис. 1). Такая модель позволяет учесть «эффект скорости», получить значения критических скоростей и пиковые значения деформаций и ускорений пролетного строения.

Модель 2. Тип «Подвижные массы на балке». Пролетное строение моделируется аналогично расчетной модели I, а поезд — системой движущихся масс с упругими и вязкими связями в элементах системы «мост — поезд» (рис. 2). Данный подход позволяет оценить уровень комфорта пассажиров на основе анализа ускорений в кузовах вагонов, а также влияние дефектов пути и колес на величину сил динамического взаимодействия ходовых частей подвижного состава.

В настоящее время в динамических расчетах мостовых сооружений широко используется численное моделирование. При этом часто задача взаимодействия элементов системы «мост — поезд» [1] решается с применением модели «Подвижные силы на балке». В этом случае пролетное строение представляется упругой балкой, а поезд — системой движущихся сил [2]. Модель позволяет получить значения критических (резонансных) скоростей движения и максимальные значения прогибов и ускорений пролетного строения моста.

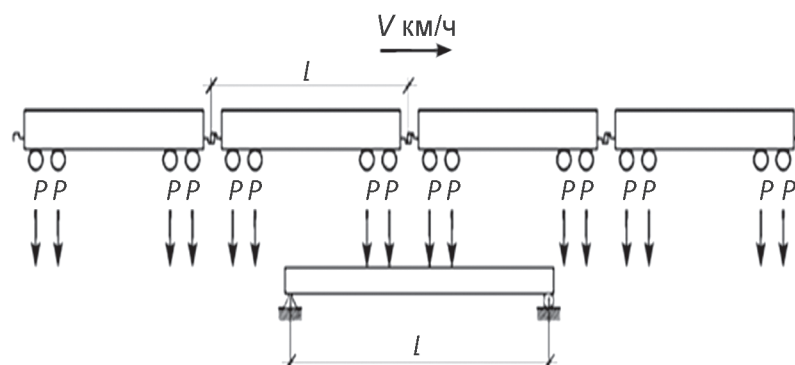


Рис. 1. Расчетная модель 1 «Подвижные силы на балке»

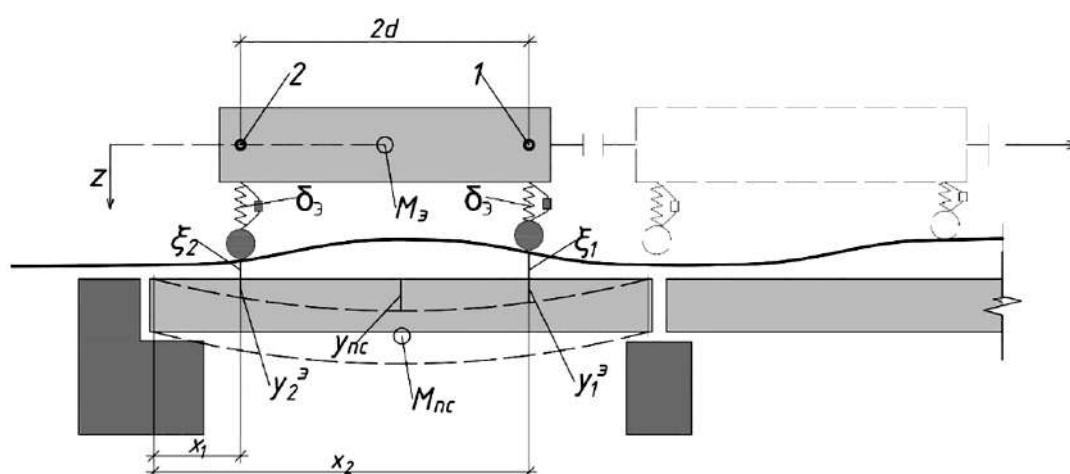


Рис. 2. Расчетная динамическая модель 2 «Взаимодействие элементов системы «мост — поезд» в условиях высокоскоростного движения подвижного состава»

При этом учитывается скорость движения поезда, длины пролетов, массы элементов сооружения, собственные частоты конструкций, параметры экипажей (в частности, длина, число осей экипажа, осевые нагрузки и интервалы между ними).

Данная модель позволяет исследовать работу пролетных строений во время прохода по мосту высокоскоростной нагрузки, но характер воздействия на мост в данном случае статичен, поскольку не учитываются силы инерции от колебаний подрессоренных экипажей. Данный фактор делает расчеты пролетных строений для условий высокоскоростного движения достаточно приближенными.

В статье предлагается использование динамической модели системы «мост — поезд» типа «Подвижные силы на балке» (рис. 1), но с учетом динамического характера воздействий данных сил на мост [3–5].

На рис. 2 представлена схема воздействия экипажа высокоскоростного поезда на мост при расчетной модели «Подвижные массы на балке».

На рис. 3 приведена предлагаемая расчетная модель «Подвижные динамические силы на балке».

Ниже приводится метод определения подвижных динамических сил (см. рис. 3), действующих на мост при проходе высокоскоростной подвижной нагрузки.

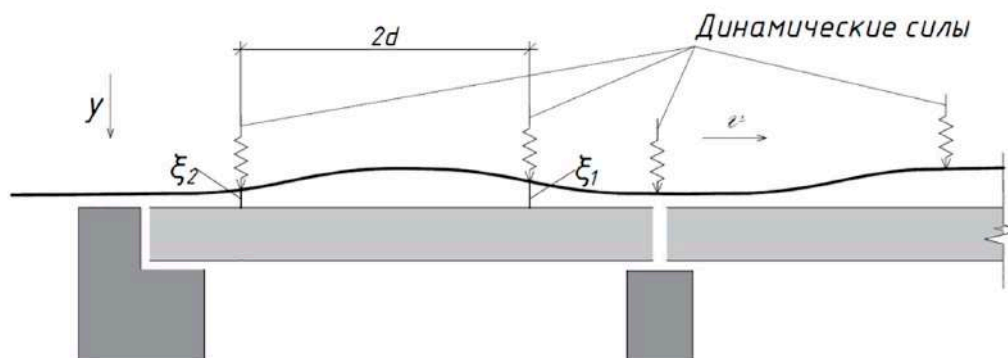


Рис. 3. Предлагаемая расчетная модель воздействия экипажей на мост

Дифференциальные уравнения движения поддрессоренного экипажа на мосту можно представить в виде [6–8]:

$$\begin{aligned}(X_1 + \beta_3 \dot{\Delta}_1) \delta_3 + z_1 + \xi_1 &= y_{13}; \\ (X_2 + \beta_3 \dot{\Delta}_2) \delta_3 + z_2 + \xi_2 &= y_{23},\end{aligned}\quad (1)$$

где z_1, z_2 — абсолютные перемещения поддрессоренного экипажа в точках 1, 2 (рис. 2);

Δ_1, Δ_2 — деформации рессор первой и второй по ходу движения тележек экипажа;

y_{13}, y_{23} — упругие прогибы пролетного строения под осями первой и второй по ходу движения тележек экипажа;

ξ_1, ξ_2 — ординаты неровностей и пути катания под осями первой и второй по ходу движения тележек экипажа;

δ_3 — податливость рессорного подвешивания тележек экипажа;

β_3 — коэффициент сопротивления колебаниям тележек экипажа;

X_1, X_2 — силы инерции поддрессоренной части экипажа, возникающие в точках 1, 2 экипажа и определяемые решением системы уравнений равновесия:

$$X_1 + X_2 = \frac{M}{2} \ddot{z}_1 + \frac{M}{2} \ddot{z}_2;$$

$$2d(X_1 - X_2) = \frac{J\ddot{z}_1 - J\ddot{z}_2}{2d}. \quad (2)$$

Откуда:

$$\begin{aligned}X_1 &= \frac{M}{4}(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_2) + \frac{J}{8d}(\ddot{z}_1 - \ddot{z}_2); \\ X_2 &= \frac{M}{4}(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_2) - \frac{J}{8d}(\ddot{z}_1 - \ddot{z}_2).\end{aligned}\quad (3)$$

здесь M — масса поддрессоренной части экипажа;

$2d$ — база экипажа;

J — момент инерции поддрессоренной части экипажа относительно центральной главной оси инерции, определяемой по формуле:

$$J = Mr^2, \quad (4)$$

где r — радиус инерции.

Из (1) следует:

$$\begin{aligned}z_1 &= y_{13} - \delta_3(X_1 + \beta_3 \dot{\Delta}_1) - \xi_1; \\ z_2 &= y_{23} - \delta_3(X_2 + \beta_3 \dot{\Delta}_2) - \xi_2.\end{aligned}\quad (5)$$

С другой стороны (см. рис. 2):

$$\begin{aligned}z_1 &= \Delta_1 + y_{13} - \xi_1; \\ z_2 &= \Delta_2 + y_{23} - \xi_2.\end{aligned}\quad (6)$$

Приравняв значения z_1, z_2 в (5) и (6), получим:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta_1}{\delta_3} + X_1 + \beta_3 \dot{\Delta}_1 &= 0; \\ \frac{\Delta_2}{\delta_3} + X_2 + \beta_3 \dot{\Delta}_2 &= 0.\end{aligned}\quad (7)$$

Подставляя выражения для z_1, z_2 из (6) в (3), получим выражения для X_1 и X_2 :

$$\begin{aligned}X_1 &= \frac{M}{4} \left[(\ddot{\Delta}_1 + \ddot{y}_{13} - \ddot{\xi}_1) + (\ddot{\Delta}_2 + \ddot{y}_{23} - \ddot{\xi}_2) \right] + \\ &+ \frac{J}{8d} \left[(\ddot{\Delta}_1 + \ddot{y}_{13} - \ddot{\xi}_1) - (\ddot{\Delta}_2 + \ddot{y}_{23} - \ddot{\xi}_2) \right]; \\ X_2 &= \frac{M}{4} \left[(\ddot{\Delta}_1 + \ddot{y}_{13} - \ddot{\xi}_1) + (\ddot{\Delta}_2 + \ddot{y}_{23} - \ddot{\xi}_2) \right] - \\ &- \frac{J}{8d} \left[(\ddot{\Delta}_1 + \ddot{y}_{13} - \ddot{\xi}_1) - (\ddot{\Delta}_2 + \ddot{y}_{23} - \ddot{\xi}_2) \right].\end{aligned}\quad (8)$$

Значения упругих прогибов пролетного строения под осями первой и второй тележек экипажа определяются с учетом скорости движения экипажей в предположении изгиба балки под нагрузкой по синусоиде [9, 10]:

$$\begin{aligned}y_{13} &= y_{\text{пс}} \sin \pi u_1 + y_{\text{оп}}^{\text{лев}} (1 - u_1)^2 + y_{\text{оп}}^{\text{прав}} u_1^2; \\ y_{23} &= y_{\text{пс}} \sin \pi u_2 + y_{\text{оп}}^{\text{лев}} (1 - u_1)^2 + y_{\text{оп}}^{\text{прав}} u_2^2,\end{aligned}\quad (9)$$

где $y_{\text{пс}}$ — вертикальное перемещение середины пролетного строения относительно линии, проходящей через точки его опирания;

$y_{\text{оп}}^{\text{лев}}$ — вертикальное перемещение левого конца балки пролетного строения;

$y_{\text{оп}}^{\text{прав}}$ — вертикальное перемещение правого конца балки пролетного строения.

$$\begin{aligned}u_1 &= \frac{x_1}{l} = \frac{v t_1}{l}; \\ u_2 &= \frac{x_2}{l} = \frac{v t_2}{l}.\end{aligned}\quad (10)$$

Здесь l — длина пролета, м;

v — скорость движения подвижной нагрузки;

t_1, t_2 — время.

Заключение

Найденные с использованием уравнений (8) величины сил инерции X_1 и X_2 подрессоренной части экипажа, учитывающие неровности проезда, и упругость рессорного подвешивания, используются при загрузении пролетного строения моста временной подвижной нагрузкой, следующей по мосту с критической (резонансной) скоростью. Это позволяет получить более точную картину динамической работы мостового сооружения в условиях высокоскоростного движения, чем при использовании расчетной модели 1 [11–13]. Эффект достигается путем замены модели «Подвижные силы на балке» моделью «Подвижные динамические силы на балке».

Библиографический список

1. Dyachenko L. An assessment of the dynamic interaction of the rolling stock and the long-span bridges on high-speed railways / L. Dyachenko, A. Benin // MATEC Web of Conferences. — Т. 107. — № 2017107000014. — DOI: 10.1051/mateconf/2017.
2. Смирнов В. Н. Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, А. А. Барановский, Г. И. Богданов и др. — СПб.: ПГУПС, 2015. — 274 с.
3. Специальные технические условия «Сооружения искусственные участка Москва — Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва — Казань — Екатеринбург». Технические нормы и требования к проектированию и строительству». — СПб.: ПГУПС, 2014. — 76 с.
4. Дьяченко Л. К. Оценка уровня вибраций с точки зрения их воздействия на пассажиров поездов при движении по мостовым сооружениям на высокоскоростных железнодорожных магистралях / Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов, Е. П. Дудкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2017. — Т. 14. — Вып. 1 — С. 33–42.
5. Смирнов В. Н. Взаимодействие бесстыкового пути с мостовым сооружением на высокоскоростных магистралях / В. Н. Смирнов // М.: Учебно-методический

центр по образованию на железнодорожном транспорте. — 2015. — 96 с.

6. Бенин А. В. Особенности проектирования и строительства мостов высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва — Казань» / А. В. Бенин, Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов // СПб.: Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — Вып. 4(45) — С. 15–20.

7. Смирнов В. Н. Факторы, влияющие на усилия в рельсах бесстыкового пути на мостах высокоскоростных железнодорожных магистралей / В. Н. Смирнов, В. А. Бешлиу // Промышленное и гражданское строительство — 2001. — № 5 — С. 32–34.

8. Смирнов В. Н. Динамическое взаимодействие высокоскоростного подвижного состава и пролетных строений мостов / В. Н. Смирнов, Л. К. Дьяченко // Путь и путевое хозяйство. — 2018. — № 11. — С. 16–21.

9. Смирнов В. Н. Технология сооружения железобетонных пролетных строений мостов на высокоскоростной магистрали Москва — Санкт-Петербург / В. Н. Смирнов, Е. В. Непряхин // Дорожная держава. — СПб., 2021. — С. 78–83.

10. Смирнов В. Н. Исследования работы мостов с бесстыковым путем / В. Н. Смирнов // Путь и путевое хозяйство. — 2018. — С. 15–17.

11. СП 13.13330. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*. — М., 2011.

12. Бондарь Н. Г. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом / Н. Г. Бондарь, Ю. Г. Козьмин, З. Г. Ройтбурд и др.; под ред. Н. Г. Бондаря. — М.: Транспорт, 1984. — 272 с.

13. Чижов С. В. Оценка безопасности мостов с учетом динамического фактора надежности / С. В. Чижов, Э. Т. Якшиев, Л. К. Дьяченко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2016. — № 2(47). — С. 247–254.

Дата поступления: 15.01.2022

Решение о публикации: 02.03.2022

Контактная информация:

СМИРНОВ Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор; svn193921@rambler.ru

ЛАНГ Андрей Владимирович — инженер; langandrew@yandex.ru

ЛАБУТИН Никита Андреевич — инженер; n_labutin@outlook.com

Determination of Dynamic Effects of a Rolling Stock on Bridges During High-Speed Traffic

V. N. Smirnov, A. V. Lang, N. A. Labutin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Smirnov V. N., Lang A. V., Labutin N. A. Determination of Dynamic Effects of a Rolling Stock on Bridges During High-Speed Traffic // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 90–96. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-90-96

Summary

Purpose: Accounting for dynamic nature of the effects of forces from a rolling stock on a bridge taking into account passway roughness in high-speed traffic conditions in the calculation model “Moving Dynamic Forces on the Beam”. **Methods:** Derivation of the differential equations of the proposed system by analytical method. **Results:** Equations for determining the magnitude of the inertia forces X_1 и X_2 of a rolling stock sprung part. **Practical importance:** Obtaining the updated picture of bridge structure dynamic operation in high-speed traffic conditions by the way of change of “Moving Forces on the Beam” calculation model to “Moving Dynamic Forces on the Beam” model.

Keywords: Bridge, train, dynamics, high-speed mainline railways, roughness, acceleration.

References

1. Dyachenko L. An assessment of the dynamic interaction of the rolling stock and the long-span bridges on high-speed railways / L. Dyachenko, A. Benin // MATEC Web of Conferences. T. 107. № 2017107000014. DOI: 10.1051/matec-conf/2017.
2. Smirnov V. N. *Mosty na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh* [Bridges on high-speed railway lines]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2015. 274 p. (in Russian)
3. *Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya "Sooruzheniya iskusstvennye uchastka Moskva — Kazan' vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali "Moskva — Kazan' — Ekaterinburg". Tekhnicheskie normy i trebovaniya k proektirovaniyu i stroitel'stvu* [Special technical conditions “Artificial structures of the Moscow-Kazan section of the Moscow-Kazan-Yekaterinburg high-speed railway line”. Technical norms and requirements for design and construction]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2014. 76 p. (in Russian)
4. D'yachenko L. K. Otsenka urovnya vibratsiy s tochki zreniya ikh vozdeystviya na passazhirov poezdov pri dvizhenii po mostovym sooruzheniyam na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh [Evaluation of the level of vibrations from the point of view of their impact on train passengers when moving along bridge structures on high-speed railway lines]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University. ways of communication]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2017, V. 14, I. 1, pp. 33–42. (in Russian)
5. Smirnov V. N. *Vzaimodeystvie besстыkovogo puti s mostovym sooruzheniem na vysokoskorostnykh magistralyakh* [Interaction of a seamless path with a bridge structure on high-speed highways]. Moscow: Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte Publ. 2015. 96 p. (in Russian)
6. Benin A. V. *Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva mostov vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali "Moskva — Kazan'.* [Features of the design and construction of bridges of the Moscow-Kazan high-speed railway line].

St. Petersburg: Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya Publ. 2015, I. 4(45), pp. 15–20. (in Russian)

7. Smirnov V. N. Faktory, vliyayushchie na usiliya v rel'sakh besstykovogo puti na mostakh vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralei [Factors influencing the efforts in the rails of a seamless track on bridges of high-speed railway lines]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2001, I. 5, pp. 32–34. (in Russian)

8. Smirnov V. N. Dinamicheskoe vzaimodeystvie vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava i proletrykh stroeniy mostov [Dynamic interaction of high-speed rolling stock and spans of bridges]. *Put' i putevye khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2018, I. 11, pp. 16–21. (in Russian)

9. Smirnov V. N. Tekhnologiya sooruzheniya zhelezo-betonnykh proletrykh stroeniy mostov na vysokoskorostnoy magistrali Moskva — Sankt-Peterburg [Technology for the construction of reinforced concrete span structures of bridges on the high-speed highway Moscow — St. Petersburg]. *Dorozhnaya derzhava* [Road power]. St. Petersburg, 2021, pp. 78–83. (in Russian)

10. Smirnov V. N. Issledovaniya raboty mostov s besstykovym putem [Research work of bridges with jointless way]. *Put' i putevye khozyaystvo* [Way and track economy]. 2018, pp. 15–17. (in Russian)

11. SP 13.13330. *Mosty i truby. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIiP 2.05.03-84** [SP 13.13330. Bridges and pipes. Updated edition of SNIiP 2.05.03-84*]. Moscow, 2011. (in Russian)

12. Bondar' N. G. *Vzaimodeystvie zheleznodorozhnykh mostov s podvizhnym sostavom* [Interaction of railway bridges with rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1984. 272 p. (in Russian)

13. Chizhov S. V. Otsenka bezopasnosti mostov s uchetom dinamicheskogo faktora nadezhnosti [Safety assessment of bridges taking into account the dynamic factor of reliability]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2016, I. 2(47), pp. 247–254. (in Russian)

Received: January 15, 2022

Accepted: March 2, 2022

Author's information:

Vladimir N. SMIRNOV — D. Sci. in Engineering,
Professor; svn193921@rambler.ru

Andrey V. LANG — Engineer; langandrew@yandex.ru

Nikita A. LABUTIN — Engineer; n_labutin@outlook.com



УДК 621.86.067

Анализ и выбор геометрических параметров бункера для изучения процесса выгрузки сыпучих материалов

А. А. Воробьев, А. А. Мигров

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Воробьев А. А., Мигров А. А. Анализ и выбор геометрических параметров бункера для изучения процесса выгрузки сыпучих материалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 97–104. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-97-104

Аннотация

Цель: Определить наиболее распространенные конструкции бункеров и выявить их основные особенности. **Методы:** В качестве инструмента исследований выбран метод теоретического анализа параметров, определяющих размеры основных элементов бункеров и статистического анализа размеров. **Результаты:** Представлены результаты статистического анализа конструктивных особенностей и геометрических параметров бункеров для сыпучих материалов. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы для обоснования размеров и конструкции экспериментального бункера, на котором предполагается проверка теоретических исследований в области сводообразования.

Ключевые слова: Бункер, сыпучие материалы, сводообразование, погрузочно-разгрузочные устройства, статистический анализ.

Введение

При производстве погрузочно-разгрузочных работ на железнодорожном транспорте приходится иметь дело с большим количеством сыпучих материалов. Операции по переработке и перемещению сыпучих материалов осуществляются с помощью погрузочно-разгрузочных устройств и механизмов, где в качестве основных или промежуточных звеньев применяются бункерные установки.

Опыт эксплуатации бункерных установок показывает, что они имеют серьезные недостатки. Одним из них является сводообразова-

ние. Сводообразование можно рассматривать как форму зависания материала, когда при истечении его над отверстием бункера в воронке возникают зависания, временно или постоянно препятствующие истечению по всему периметру выпускного отверстия [1].

Негативными последствиями сводообразования являются:

- остановка технологического процесса выгрузки на срок от нескольких часов до нескольких суток;
- нестабильность качества конечного продукта (например, клинкера, строительного цемента,

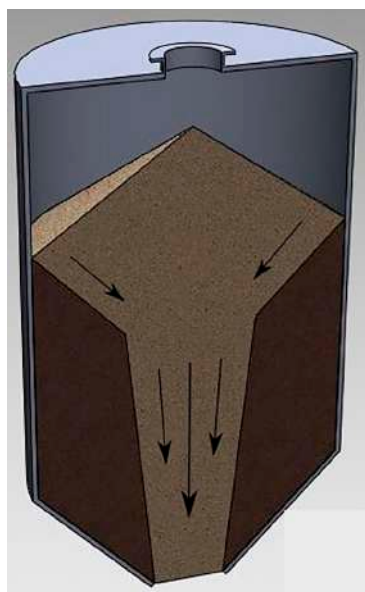
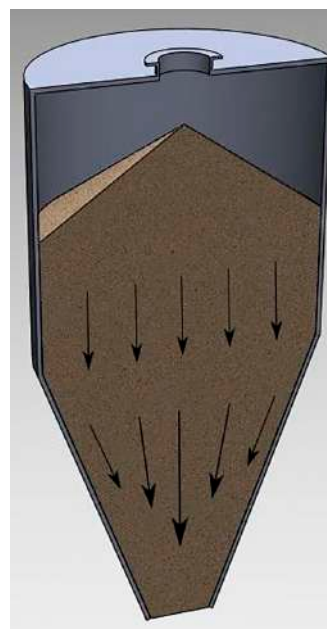
*a**б*

Рис. 1. Виды истечения сыпучего материала из бункера [9]:
a — нормальное истечение; *б* — гидравлическое истечение

сухих строительных смесей и т. п.) из-за сегрегации материала;

- необходимость привлечения дополнительных материальных, трудовых и энергетических ресурсов для разрушения свода материала;

- необходимость использования специальных побудителей истечения, снижающих ресурс оборудования;

- частые случаи нарушения техники безопасности при ручной шуровке сводов.

Поэтому всестороннее изучение проблемы сводообразования и разработка на его основе средств и методов борьбы с зависанием строительных материалов является актуальной задачей.

Процессы сводообразования и сводоразрушения изучались в работах [2–7] и др. Однако до сих пор некоторые вопросы, например вопрос о рациональных параметрах пневматических устройств, побуждающих истечение, до сих пор не нашли должного теоретического обоснования. Для изучения этих вопросов необходимо выполнить обоснование формы и геометрических параметров экспериментального бункера.

Классификация конструкций бункеров и теоретические зависимости, влияющие на их геометрические параметры

Форма бункеров зависит от назначения бункера, компоновки сооружения, требуемого запаса материала, физических свойств сыпучего материала, типа несущих конструкций и др. [8]. По форме бункера можно разделить на прямоугольные, круглые и корытообразные.

Прямоугольные бункеры, имеющие форму пирамиды или обелиска, называют пирамидальными или обелисковыми. У пирамидальных открытых бункеров верхнее загрузочное и нижнее разгрузочное отверстия геометрически подобны; у обелисковых бункеров этого подобия нет [7].

Форма бункера влияет на вид истечения сыпучего материала при выгрузке. Известны два вида истечения сыпучего материала из бункера: нормальное и гидравлическое.

При нормальной форме истечения (рис. 1, *a*) материал движется только в пределах зоны, рас-

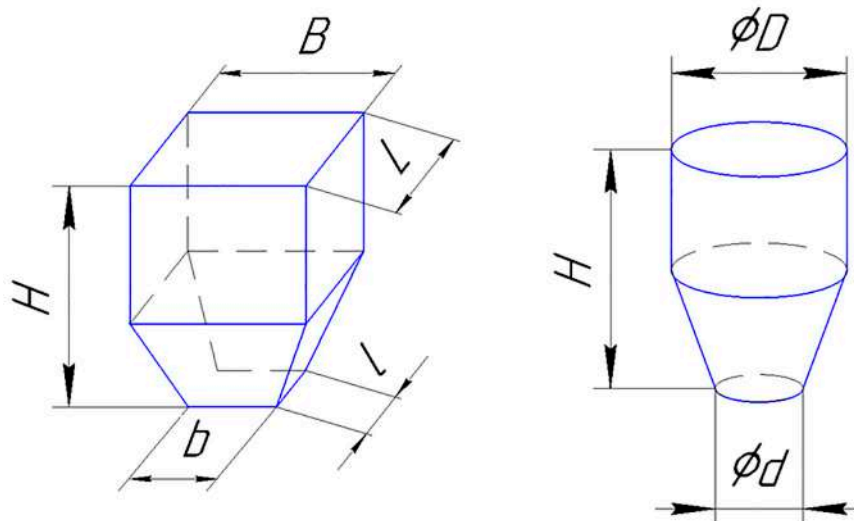


Рис. 2. Основные геометрические параметры бункеров

положенной над выпускным отверстием. У стенок за счет сил внешнего трения материала о стенки происходит постепенное торможение материала, он начинает двигаться с меньшей скоростью, здесь неизбежно возникает остановка движения.

При гидравлической форме истечения (рис. 1, б) сыпучий материал движется по всему объему одновременно, подобно движению жидкости. Бункер опорожняется полностью, вероятность образования сводов или локальных перемычек резко уменьшается.

Нормальную форму истечения рекомендуется использовать для крупнокускового не слеживающегося материала [10].

К основным геометрическим параметрам бункеров относятся (рис. 2):

- размеры сечений прямоугольных бункеров $L \times B$, где L и B — длина и ширина сечения, м;
- диаметры сечений круглых бункеров D , м;
- размер выпускного отверстия $l \times b$ для прямоугольных и диаметр d для круглых бункеров;
- высота бункера H , м;
- угол наклона стенок в вертикальной плоскости α , град.;
- толщина стенки S , мм.

Кроме того, для бункеров, форма которых отличается от перечисленных трех, могут быть и другие геометрические размеры.

Из перечисленных параметров на производительность бункерных установок влияют размеры сечений, высота бункера и угол наклона стенок. Толщина стенки имеет значение для прочностных характеристик бункера. Также на производительность влияет и такой параметр, как шероховатость стенок бункера.

Сводообразование сыпучих материалов объясняется возникновением в зоне разгрузочного отверстия такого напряженного состояния, при котором горизонтальные напряжения в слое частиц достигают наивысшего значения. Горизонтальные давления уплотняют материал, создают соответствующую вертикальную составляющую распора свода, которая становится достаточной для восприятия массы груза над отверстием [11].

На сводообразование при выгрузке сыпучего материала значительное влияние имеет размер сводообразующего отверстия.

Для определения размеров наименьшего допустимого отверстия в бункере легкосыпучих грузов Алферовым была предложена следующая формула [12]:

$$A = k' (a' + 80) \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где A — размер стороны квадратного или диаметр круглого отверстия, мм;

k' — опытный коэффициент (для сортированных грузов $k' = 2,6$, для рядовых $k' = 2,4$);

a' — наибольший размер типичных кусков (до 300 мм);

φ — угол внутреннего трения.

Дженике предложил формулу для определения минимального размера B выпускного отверстия конических и прямоугольных бункеров, м [13]:

$$B = \frac{\overline{\sigma}_1 \cdot H(\alpha)}{g\rho_b} \quad (2)$$

где $\overline{\sigma}_1$ — максимальное значение напряжения, требующегося для разрушения свода, Н/м²;

$H(\alpha)$ — безразмерная функция, зависящая от угла наклона стенки бункера α . Значение функции обычно лежит в интервале от 2 до 2,3 для конических бункеров при гидравлической форме истечения и составляет половину от этого диапазона для прямоугольных бункеров [14];

g — ускорение свободного падения 9,81 м/с²;

ρ_b — плотность сыпучего материала при давлении, измеренном у выпускного отверстия бункера, кг/м³.

В работе [13] представлен ряд зависимостей угла внешнего трения по стенке бункера от угла наклона стенки в вертикальной плоскости. Графически определены границы между нормальным и гидравлическим истечением материала. Основными переменными, определяющими эти границы, являются:

— угол внешнего трения по стенке бункера, φ_w . Это значение уменьшается с повышением давления;

— эффективный угол внутреннего трения, δ ;

— форма бункера, например конусная или клиновидная.

Результаты статистического анализа формы бункеров и соотношений их основных геометрических параметров

Задачами исследования являлось определение наиболее часто встречающейся формы бункеров и соотношений их основных геометрических параметров, а именно:

— отношение площадей сечения основной части прямоугольных бункеров к площади выпускного сечения;

— отношение диаметра основной части к диаметру выпускного сечения для конических бункеров;

— отношение высоты к площади сечения основной части либо высоты к диаметру основной части для прямоугольных и конических бункеров соответственно.

Исходные данные для анализа были взяты из опросных листов, заполненных инженерно-техническими работниками предприятий промышленности и транспорта за период с 2014 по 2022 г. Всего было проанализировано 126 опросных листов.

Проведенный анализ показывает, что 36 % бункеров в выборке — конической формы, 62 % — прямоугольной. Из рассмотренных бункеров 2 % имеют более сложную пространственную форму.

Площадь сечения основной части 40 % прямоугольных бункеров лежит в интервале от 6 до 21 м² (часто встречаются значения 6 и 16 м²), еще 30 % — в интервале от 21 до 36 м². Значительные размеры сечений наблюдаются редко и характерны для бункеров с рудным концентратом или углем.

Площадь сечения выпускного отверстия 44 % прямоугольных бункеров лежит в интервале от 0,06 до 0,35 м². У 14 процентов бункеров площадь выпускного отверстия составляет от 0,35 до 0,65 м². У остальных прямоугольных бункеров размеры выпускного отверстия примерно равномерно распределяются от 0,65 м² до максимального значения 6,7 м².

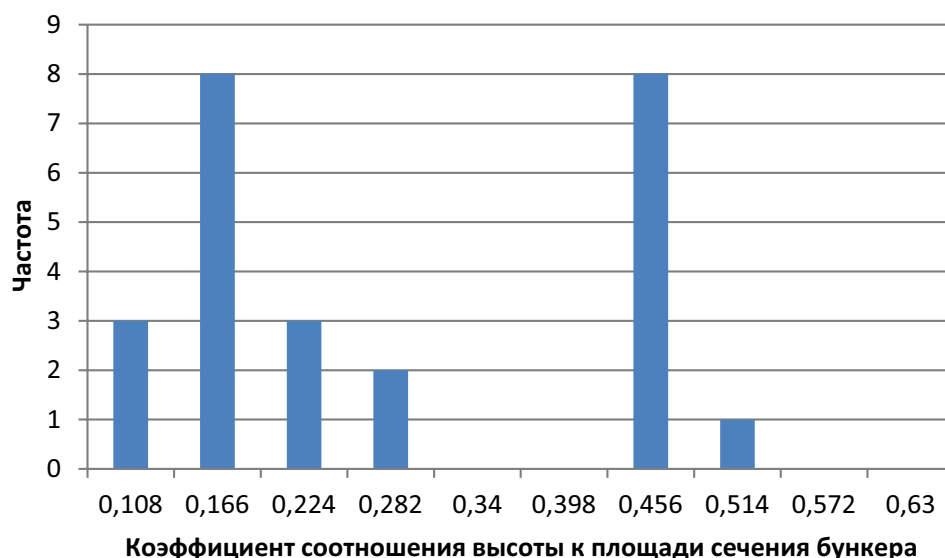
Рис. 3. Соотношение площадей S_1/S_2 Рис. 4. Соотношение площадей D_1/D_2

Анализ соотношений площадей основного и выпускного сечений прямоугольных бункеров показал (рис. 3), что у 30 % бункеров этот коэффициент лежит в интервале от 120 до 149 (типичные размеры сечений бункеров кварца и глины цементных заводов: основного сечения 4×4 м, выпускного сечения $0,35 \times 0,35$ м). По 25 % бункеров имеют соотношение площадей сечений от 4 до 33 и от 33 до 62. Бункеры со значительным соотношением площадей сечений (более 150) встречаются редко.

Для конических бункеров (рис. 4) наиболее частое соотношение диаметров сечений от 2 до 3,9 наблюдается у 42 % бункеров. Далее, по убывающей: 18 % имеют соотношение от 3,9 до 6,3, 12 % — от 6,3 до 8,7 и т. д.

Отношение высоты к площади сечения основной части, а также высоты к диаметру основной части для прямоугольных и конических бункеров показано на рис. 5 и 6 соответственно.

У 30 % прямоугольных бункеров это соотношение находится в интервале 0,108–0,166. Еще

Рис. 5. Соотношение $K/S1$ Рис. 6. Соотношение $K/D2$

у 30 % бункеров отношение высоты к площади сечения 0,398–0,456.

Примерно по 18 % конических бункеров имеют отношение высоты к диаметру сечения 0,5–0,6 и 1,3–1,4. По 12 % бункеров имеют отношение высоты к диаметру сечения в интервалах 0,4–0,5, 0,6–0,7 и 0,9–1 (рис. 6).

Заключение

Таким образом, анализ формы и основных геометрических параметров бункеров сыпучих грузов

показывает, что в практике наиболее часто встречающимся типом бункеров являются прямоугольные с площадью основного сечения до 36 м^2 и с площадью выпускного сечения до $0,65 \text{ м}^2$. У большинства прямоугольных бункеров отношение высоты к площади основного сечения не превышает 0,3.

Полученные данные могут быть использованы для обоснования размеров и конструкции экспериментального бункера, на котором предполагается проверка теоретических исследований в области сводообрушения.

Библиографический список

1. Рогинский Г. Л. Дозирование сыпучих материалов / Г. Л. Рогинский. — М.: Химия, 1978.
2. Гячев Л. В. Основы теории бункеров и силосов: учебное пособие / Л. В. Гячев; Алтайский политехнический институт им. И. И. Ползунова. — Барнаул: Алтайский политехнический институт, 1986. — 84 с.
3. Drescher A. Arching in hoppers: I. Arching theories and bulk material flow properties / A. Drescher, A. J. Waters, C. A. Rhoades // *Powder Technology*. — 1995 — Vol. 84. — Iss. 2. — Pp. 165–176. — URL: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(95\)02981-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)02981-7).
4. Enstad G. On the theory of arching in mass flow hoppers / G. Enstad // *Chemical Engineering Science*. — 1975. — Vol. 30. — Iss. 10. — Pp. 1273–1283. — URL: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(75\)85051-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(75)85051-2).
5. Nguyen T. Gravity Flow of Granular Materials in Conical Hoppers / T. Nguyen, C. Brennen, R. Sabersky // *Journal of Applied Mechanics*. — 1979. — Vol. 46.
6. Schulze D. Powders and bulk solids: Behavior, characterization, storage and flow. *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow* / D. Schulze, J. Schwedes, J. W. Carson. — 2008.
7. Зенков Р. Л. Бункерные устройства / Р. Л. Зенков, Г. П. Гриневич, В. С. Исаев. М.: Машиностроение, 1977.
8. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров. — М.: Стройиздат, 1983.
9. Oginni O. Contribution of Particle Size and Moisture Content to Flowability of Fractionated Ground Loblolly Pine / O. Oginni, F. Oladiran, S. Adhikari, J. Fulton. — 2014. — DOI: 10.13140/RG.2.1.4752.6643.
10. Руководство по определению характеристик материала заполнения и геометрических параметров бункеров. — М.: Стройиздат, 1978. — 29 с.
11. Шубин И. Н. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства: учеб. пособие / И. Н. Шубин, М. М. Свиридов, В. П. Таров. — Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2005. — 76 с.
12. Алферов К. В., Зенков Р. Л. Бункерные установки. — М.: Машгиз, 1955. — 308 с.
13. Jenike A. W. Storage and Flow of Solids / A. W. Jenike // *University of Utah Engineering Experiment Station. Bulletin*. — 1964. — № 123.
14. McGlinchey D. Bulk Solids Handling Equipment Selection and Operation / D. McGlinchey // Blackwell Publishing Ltd. — 2008.

Дата поступления: 01.02.2022

Решение о публикации: 24.02.2022

Контактная информация:

ВОРОБЬЁВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, профессор; 79219751198@yandex.ru,
МИГРОВ Александр Алексеевич — ст. преподаватель; amigrov@gmail.com

Analysis and Selection of Geometric Parameters of a Hopper to Study the Process of Unloading of Bulk Materials

A. A. Vorobyev, A. A. Migrov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Vorobyev A. A., Migrov A. A. Analysis and Selection of Geometric Parameters of a Hopper to Study the Process of Unloading of Bulk Materials // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 97–104. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-97-104

Summary

Purpose: To determine the most common structures of hoppers and identify their main features. **Methods:** Theoretical analysis of the parameters determining the dimension of the main elements of hoppers and statistical analysis of the dimension. **Results:** The results of statistical analysis of frame features and geometric parameters of hoppers for bulk materials are presented. **Practical significance:** Results can be used to substantiate the dimension and frame of an experimental hopper which on, the check is supposed of theoretical research of vault destruction.

Keywords: Hopper, bulk materials, arch formation, loading and unloading devices, statistical analysis.

References

1. Roginskiy G. L. *Dozirovanie sypuchikh materialov* [Dosing of bulk materials]. Moscow: Khimiya Publ., 1978. (in Russian)
2. Gyachev L. V. *Osnovy teorii bunkerov i silosov* [Fundamentals of the theory of bunkers and silos: study guide]. *Altayskiy politekhnicheskiy institut im. I. I. Polzunova* [Altai Polytechnic Institute. I. I. Polzunova]. Barnaul: Altayskiy politekhnicheskiy institute Publ., 1986. 84 p. (in Russian)
3. Drescher A. Arching in hoppers: I. Arching theories and bulk material flow properties / A. Drescher, A. J. Waters, C. A. Rhoades // *Powder Technology*. 1995 Vol. 84. Iss. 2. Pp. 165–176. Available at: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(95\)02981-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)02981-7).
4. Enstad G. On the theory of arching in mass flow hoppers / G. Enstad // *Chemical Engineering Science*. 1975. Vol. 30. Iss. 10. Pp. 1273–1283. Available at: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(75\)85051-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(75)85051-2).
5. Nguyen T. Gravity Flow of Granular Materials in Conical Hoppers / T. Nguyen, S. Brennen, R. Sabersky // *Journal of Applied Mechanics*. 1979. Vol. 46.
6. Schulze D. Powders and bulk solids: Behavior, characterization, storage and flow. *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow* / D. Schulze, J. Schwedes, J. W. Carson. 2008.
7. Zenkov R. L. *Bunkernye ustroystva* [Bunker devices]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. (in Russian)
8. *Rukovodstvo po raschetu i proektirovaniyu zhelezobetonnykh, stal'nykh i kombinirovannykh bunkerov* [Guidelines for the calculation and design of reinforced concrete, steel and combined bunkers]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1983. (in Russian)
9. Oginni O. Contribution of Particle Size and Moisture Content to Flowability of Fractionated Ground Loblolly Pine / O. Oginni, F. Oladiran, S. Adhikari, J. Fulton. 2014. DOI: 10.13140/RG.2.1.4752.6643.
10. *Rukovodstvo po opredeleniyu kharakteristik materiala zapolneniya i geometricheskikh parametrov bunkerov* [Guidelines for determining the characteristics of the filling material and the geometric parameters of the bunkers]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1978. 29 p. (in Russian)
11. Shubin I. N. *Tekhnologicheskie mashiny i oborudovanie. Sypuchie materialy i ikh svoystva* [Technological machines and equipment. Bulk materials and their properties]. Tambov: Tamb. gos. tekhn. un-t Publ., 2005. 76 p. (in Russian)
12. Alferov K. V., Zenkov R. L. *Bunkernye ustanovki* [Bunker installations]. Moscow: Mashgiz Publ., 1955. 308 p. (in Russian)
13. Jenike A. W. Storage and Flow of Solids / A. W. Jenike // University of Utah Engineering Experiment Station. Bulletin. — 1964. — № 123.
14. McGlinchey D. Bulk Solids Handling Equipment Selection and Operation / D. McGlinchey // Blackwell Publishing Ltd. 2008

Received: February 1, 2022

Accepted: February 24, 2022

Author's information:

Alexandr A. VOROBYEV — Professor;

79219751198@yandex.ru

Alexandr A. MIGROV — Senior Lecturer;

amigrov@gmail.com

УДК 371.851

Сравнительный анализ активной жизни выдающихся ученых-математиков, рожденных в разные столетия

П. В. Герасименко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Герасименко П. В. Сравнительный анализ активной жизни выдающихся ученых-математиков, рожденных в разные столетия // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 105–115. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-105-115

Аннотация

Цель: Провести анализ долголетия выдающихся ученых-математиков мирового уровня, жизнь которых продолжалась после шестидесяти лет. Установить уровни дожития ученых, родившихся в XX столетии и до XX столетия. **Методы:** Построены модели дожития по двум выборкам ученых-математиков: рожденных до XX столетия и в XX столетии. В основу построения моделей положены регрессионный анализ и метод наименьших квадратов. **Результаты:** Определены с помощью инструмента «Регрессия» ППП Excel функции распределения вероятности дожития выдающимися учеными-математиками после достижений ими шестидесятилетнего возраста. **Практическая значимость:** Выполнен сравнительный анализ функций распределения, и установлены вероятности дожития по двум выборкам. Установлены уровни увеличения дожития ученых, рожденных в XX столетии, по сравнению с рожденными до XX столетия. Рекомендован анализ продолжительности жизни выдающихся ученых-математиков, которые прожили до 60 лет, дополняя использованную в работе статистику.

Ключевые слова: Ученые-математики, модель, вероятность, возраст, показатель прожития, демография.

Безотносительно к наличию заболеваний, человеческая жизнь имеет всегда пределы, т. е. всегда существует риск умереть. Поэтому геронтологи определяют старение как возрастающий риск смерти, так как в большинстве случаев с возрастом риск увеличивается. Старение, конечно, не единственный определяющий фактор. На продолжительность жизни, помимо старения, оказывают влияние и другие факторы. Но, вне всяких сомнений, старение — это коренное изменение, затрагивающее все аспекты жизни. Люди постоянно ищут биологические признаки старения, но до сих пор не удалось обнаружить постоянных и независимых от болезней показателей, определяющих длительность жизни человека [1].

Среди факторов, определяющих темп старения и продолжительность жизни человека, наряду с генетическими факторами существенную роль играют особенности образа жизни, включающие географические факторы (широта, высота над уровнем моря, регион, проживание в городе или сельской местности), уровень доходов, доступность медицинской помощи, образование и др. [2]. В геронтологии большое число исследований посвящено установлению признаков ускоренного старения у представителей самых разных профессий [3, 4]. Имеются данные о продолжительности жизни у людей с высоким социально-экономическим статусом, в частности у лауреатов Нобелевской премии, членов национальных

академий наук, известных писателей, музыкантов и актеров [5, 6]. В серии работ были выявлены существенные различия в среднем возрасте представителей различных творческих специальностей (литераторов, музыкантов, художников, артистов, ученых) [7]. Полученные данные подтверждают гипотезу о том, что высокий интеллект способствует большей продолжительности жизни и долголетию [8].

Научные исследования показывают, что причина долгой жизни обусловлена условиями и образом жизни на уровне 75 %. Оставшиеся 25 % заложены в генах. Полагают, что если будут определены особенности жизни, влияющие на долголетие, то появится возможность максимально увеличить ее продолжительность в отведенных человеку биологией пределах [9].

К числу людей с наиболее типичными особенностями относятся творческие люди, обладающие широтой своих интересов. Творческая деятельность в известной мере выступает в качестве фактора не только психологического и социального, но и биологического долголетия. Жизненный опыт людей творческого труда показывает, что они наиболее удовлетворены своей работой. Творческие люди живут своей деятельностью, а смысл своего существования видят в своей работе, не разделяя свое время на рабочее и нерабочее. Особенно это характерно для ученых-математиков. Математики относятся к категории творческих лиц, у которых деятельность направлена на концентрацию теоретической мысли. Именно они не обременены конкретным рабочим местом, и их труд не обусловлен ограничением по времени в сутках. Поэтому их долголетие можно считать активным в процессе всей жизни.

Опыт последних столетий наглядно показывает, сколь велико значение математики в мировом развитии. Поразительные успехи, которые повлекли за собой развитие науки и техники, связаны с именами выдающихся математиков. Каждый из них

оказал неповторимый вклад мирового уровня не только в математику. Ни один из элементов современной цивилизации не мог бы существовать без результатов их научных работ. Поэтому вполне заслуженно их жизни и достижениям посвящено несчетное количество работ. Их идеи живут и теперь, как в педагогическом, так и в научном плане. Представляет огромный научный интерес связь их гениальности с длительностью жизни.

Не умаляя роль и значение каждого выдающегося ученого-математика, для иллюстрации вклада в мировую цивилизацию приведем только несколько из них, те имена, которые известны всему миру. Почти 400 лет назад великий Галилео Галилей (1564–1642) считал, что: «...Книга природы написана на естественном языке разума — языке математики...».

Новые подходы и новые пути в науке были разработаны И. Ньютоном (1643–1727), Д. Бернулли (1700–1782), Л. Эйлером (1707–1783), Ж. Лагранжем (1736–1813), П. Лапласом (1749–1827), Ж. Фурье (1767–1830), О. Коши (1789–1857), Н. И. Лобачевским (1792–1856), М. В. Остроградским (1801–1862), В. А. Стекловым (1864–1926), А. А. Марковым (1856–1922), А. М. Ляпуновым (1857–1918), А. Н. Колмогоровым и многими их предшественниками и последователями.

Следует отметить, что великие ученые-математики, такие как Гюйгенс (1629–1695), В. Лейбниц (1646–1716), Э. Галлей (1656–1742), Л. Эйлер (1707–1783) и П. Лаплас (1749–1827) стояли у истоков обобщений статистических данных о смертности людей, предложив таблицы продолжительности жизни [1]. Именно ученые-математики с мировым именем заложили первый краеугольный камень в фундаментальное здание науки о длительности жизни.

Таким образом, у истоков теории продолжительности активной жизни стояли в том числе ученые-математики с мировым именем, которые заложили прочный фундамент для дальнейших

исследований. Он показывает, как на основании количественного анализа одних только традиционных демографических таблиц смертности можно получать нетривиальные результаты. Однако составление таблиц смертности сделать весьма непросто и нередко для этого требуется совершать поиск необходимой информации в сотнях книг и научных статей.

Один из подходов к изучению длительности жизни человека заключается в поиске закона распределения ее показателя по времени. Большинство показателей продолжительности жизни, как это отмечено в [1], содержит одну и ту же информацию. Переход от одного к другому обычно осуществляется путем пересчета. В настоящей работе в основном используется в качестве такого показателя вероятность смерти или вероятность дожития, соответственно, исследованию подлежат законы распределения вероятности смерти или распределения вероятности дожития.

Продолжительность жизни конкретного человека невозможно наблюдать опытным путем, поскольку ее возможно измерить только один раз.

Поэтому о продолжительности жизни с научной точки зрения можно говорить как о некотором представителе, как обобщение определенной выборки людей, имеющих у каждого из них одни и те же признаки. Такому обобщенному представителю выборки можно приписать вероятность смерти или вероятность дожития в любой момент времени на заданном промежутке.

В настоящей работе для построения таблиц смертности ученых-математиков в основном использованы статистические данные [10], которые дополнялись данными, представленными в [11]. Выборка включает 193 выдающихся ученых-математиков, которые рождены с XVI по XX столетия.

Поскольку ученые-математики рождены в разные столетия, то, согласно математической статистике, возникла необходимость оценки однород-

ности списка и возможности рассматривать все статистические данные в одной выборке. Ответ на этот вопрос позволила дать проверка гипотезы однородности выборки с помощью критерий Стьюдента.

Для проверки однородности выборки из 193 ученых-математиков в работе она была разделена на две группы: рожденные до XX столетия и в XX столетии. Такое разделение обусловлено включением в каждую из групп ученых, которые жили в разные столетия, и примерным равенством их количества. Применение процедуры, согласно критерию Стьюдента, позволило установить невозможность их включения в одну выборку для проведения исследования, что позволило представить всех ученых в двух выборках.

В выборках данных, которые представлены в табл. 1 и 2, в основном включены данные тех математиков, именами которых названы математические теории, теоремы, критерии, формулы и другие математические понятия.

На основании представленных выборок дальнейшее построение исследования выполнено по следующему алгоритму. Выборки обобщаются в виде таблиц смертности (таблицы коэффициентов смертности). На их основании выявляется общая закономерность и строится математическая модель, количественно объясняющая обнаруженную закономерность.

Согласно алгоритму, в таблицах смертности (табл. 3 и 4) представлены коэффициенты, или частоты смерти, соответственно для выборки выдающихся ученых-математиков, родившихся до XX и в XX столетии, но проживших более 60 лет. В них указано только количество умерших за год от общего числа ученых, имеющих возраст шестьдесят и более лет.

Эти таблицы рассматриваются как модели процесса вымирания ученых, включенных в рассматриваемые выборки выдающихся математиков. За счет перестроения включенных в таблицы частот

ТАБЛИЦА 1. Год рождения (Г. р.) и количество прожитых лет учеными, рожденными до XX столетия

ФИО	Г. р.	лет	ФИО	Г. р.	лет	ФИО	Г. р.	лет
Мерсенн Марин	1588	60	Кантор Георг	1845	73	Куммер Эрнст	1810	83
Гамильтон сэр	1805	60	Жевре Морис	1884	73	Сильвестр Д.	1814	83
Гурвиц Адольф	1859	60	Пеано Д.	1858	74	Кельвин У.	1824	83
Биркофф Джордж	1884	60	Ден Макс	1878	74	Рис Марсель	1886	83
Гекке Эрих	1887	60	Вольф К.	1679	75	Бохнер С.	1899	83
Фредхольм Ивар	1866	61	Пирс Чарльз	1839	75	Стоукс Г.	1819	84
Витгештейн Л.	1889	61	Лоренц А.	1853	75	Морс Марстон	1892	84
Госсет Уильям	1876	61	МакМахон П.	1854	75	Кураковский К.	1896	84
Ландау Эдмунд	1877	61	Левнер Ч.	1893	75	Мандельбройт С.	1899	84
Фурье Жан Батист	1768	62	Эйлер Л.	1707	76	Ньютон Исаак	1642	85
Баннера Джузеппе	1865	62	Хилл Джордж	1838	76	Дедекин Р.	1831	85
Гессен Людвиг	1811	63	Кляйн Феликс	1849	76	Пикард Эмиль	1856	85
Гиббс Джозайя	1839	64	Рис Фриджес	1880	76	Лармор Джозеф	1857	85
Бор Харальд	1887	64	Сколем А.	1887	76	Кейзер Джексон	1862	85
Артин Эмиль	1898	64	Важевский Т.	1896	76	Борель Эмиль	1871	85
Салем Рафаэль	1898	65	Мальбранш Н.	1638	77	Такаги Тейджи	1875	85
Марков Андрей	1856	66	Рэйли Джон	1842	77	Брауэр Луитцен	1881	85
Лебег Анри	1875	66	Фреге Готлоб	1848	77	Леви Пол	1886	85
Шур Иссай	1875	66	Беллавитис Ж.	1803	77	Пирсон Шарп	1895	85
Штайнер Якоб	1796	67	Радемахер Г.	1892	77	Сигель Карл	1896	85
Дарвин Джордж	1845	67	Хопф Хайнц	1894	77	Хилле Эйнар	1894	86
Молодой Альфред	1873	67	Мебиус А.	1790	78	Серпинский В.	1882	87
Чех Эдуард	1893	67	Шварц Г.	1843	78	Нейман Ежи	1894	87
Обрешков Никола	1896	67	Лукаевич Ян	1878	78	Зарисский Оскар	1899	87
Кронекер Л.	1823	68	Уолш Джозеф	1895	78	Лефшец Соломон	1884	88
Фробениус Георг	1849	68	Пирсон Карл	1857	79	Био Жан Батист	1774	88
Фукс Лазарь	1833	69	Фейер Липот	1880	79	Сеге Габор	1895	90
Нильсен Якоб	1890	69	Бэббидж Ч.	1791	80	Ньюман Уильям	1805	92
Дезарг Жерар	1591	70	Юль Георгий	1871	80	Литтлвуд Джон	1885	92
Лейбниц Готфрид	1646	70	Диксон Л.	1874	80	Виноградов Иван	1891	92
Харди Годфри	1877	70	Бернулли Жан	1667	81	Островский А.	1893	93
Мизес Ричард	1883	70	Гильберт Д.	1862	81	Нагель Трюгве	1895	93
Вейль Германн	1885	70	Ланцош К.	1893	81	Фреше Морис	1878	95
Винер Норберт	1894	70	Хассе Гельмут	1898	81	Адамар Жак	1865	98
Фишер Рональд	1890	72	Вейерштрасс К.	1815	82	Рассел Бертран	1872	98
Круль Вольфганг	1899	72	Картан Эли	1869	82	Полиа Георгий	1887	98

смерти, путем соотнесения их к суммарному числу ученых в выборке, сформированы таблицы частоты смерти, которые рассматриваются как приближенные значения вероятностей смерти.

Под вероятностью смерти понимается вероятность такого события, при котором если ученый

вступил в определенный возрастной интервал лет, то он доживет только до его верхней границы. Другими словами, что если ученый вступил в определенный возрастной интервал лет, то вероятность дожить до конца срока этого возрастного интервала составляет 100 %.

ТАБЛИЦА 2. Год рождения (Г. р.) и количество прожитых лет учеными, рожденными в XX столетии

ФИО	Г. р.	лет	ФИО	Г. р.	лет	ФИО	Г. р.	лет
Сюй Пао-лу	1910	60	Стечкин Сергей	1920	75	Клингенберг В.	1924	86
Бучи Дж. Ричард	1924	60	Брауэр Ричард	1901	76	Мандельброт Б.	1924	86
Сузуки Сатоши	1930	61	Кендалл Морис	1907	76	де Рам Жорж	1903	87
Давенпорт Г.	1907	62	Атья Майкл	1929	76	Орлич Владислав	1903	87
Моцкин Теодор	1908	62	Борсук Кароль	1905	77	Шенберг И. Дж.	1903	87
Райнер Ирвинг	1924	62	Хеффдинг В.	1914	77	Чоула С.	1907	88
Альмгрен Дж.	1933	64	Холл Филипп	1904	78	Альфорт Ларс В.	1907	89
Туран Пол	1910	66	Берс Липман	1914	79	Инкери Кустаа А.	1908	89
Робинсон Д.	1919	66	Витт Эрнст	1911	80	Джейкобсон Н.	1910	89
Альберт Авраам	1905	67	Пятецкий-Ш.	1929	80	Дилворт Роберт	1914	89
Мойсил Григор	1906	67	Хопф Эберхард	1902	81	Каплански Ирвинг	1917	89
Хайльбронн Г.	1908	67	Ботт Рауль	1924	81	Халмос Пол Р.	1916	90
Обер Карл Эгиль	1924	67	Грауэрт Ганс	1930	81	Сельберг Агле	1917	90
Адамс Джон	1930	67	Тарский А.	1901	82	Дынкин Евгений	1924	90
Рота Д.-Карло	1932	67	Кодаира К.	1915	82	Лере Жан	1906	92
Юнгтун В.	1905	68	Зайдель Дж.	1919	82	Вайль Андре	1906	92
Ауслендер М.	1926	68	Менгер Карл	1902	83	Куайн Уиллард	1908	92
Кац Марк	1914	70	Магнус В.	1907	83	Бартлетт Морис	1910	92
Кокран Уильям	1909	71	Эрдеш Пауль	1913	83	Стейнберг Роберт	1922	92
Гедель Курт	1906	72	Джон Фриц	1910	84	ван дер Варден Б.	1903	93
Бинг Р. Х.	1914	72	Хирцебрух Ф.	1928	84	Черн ШинингШэнь	1911	93
Ланг Серж	1927	72	Эйленберг С.	1913	85	Какутани Шизуо	1911	93
Амикур С.А.	1921	73	Тьюки Джон	1915	85	Шафаревич Игорь	1923	94
Арнольд В. И.	1937	73	Тутте В. Т.	1917	85	Кокстер Гарольд	1907	96
Новиков Петр	1901	74	Моришима Таро	1903	86	Мак-Лейн С.	1909	96
Эресманн Ч.	1905	74	Лемер Деррик	1905	86	Гельфанд Израиль	1913	96
Улам Станислав	1909	75	Курепа Дуро	1907	86	Борель Арман	1923	97
Хуа Ло-кенг	1910	75	Роббинс Герберт	1915	86	Картан Анри	1904	98

Используя таблицу вероятностей смерти, можно построить ряд распределения вероятности смерти, где каждая вероятность рассчитывается для определенного возрастного интервала лет. Правило, по которому устанавливается вероятность смерти на заданном интервале, носит название «Ряд распределения вероятности смерти».

Ряд распределения вероятности смерти путем несложных вычислений преобразуется в ряд распределения вероятности дожития — модели дожития, представляющих собой таблицу, элементы которой вычисляются как единица минус вероятность смерти. Как отмечалось в работе, смерть

и дожитие рассматриваются как случайные события, а величины, характеризующие их, рассматриваются как дискретные случайные величины. В табл. 5 и 6 приведены ряды распределения вероятности дожития до рассматриваемого года жизни ученых, включенных в выборку, соответственно до XX и в XX столетии.

Для исчерпывающей характеристики случайной величины, выражающей дожитие, в работе используется функция распределения вероятности.

Для повышения возможности более качественно оценивать степень дожития по выборке ученых необходимо построить функцию дожи-

ТАБЛИЦА 3. Смертность ученых, рожденных до XX столетия и проживших 60 и более лет

№ п. п.	Возраст ученого	Количество умерших	№ п. п.	Возраст ученого	Количество умерших	№ п. п.	Возраст ученого	Количество умерших
1	60	5	14	73	2	27	86	1
2	61	4	15	74	2	28	87	3
3	62	2	16	75	5	29	88	1
4	63	1	17	76	6	30	89	0
5	64	3	18	77	6	31	90	1
6	65	1	19	78	4	32	91	0
7	66	3	20	79	2	33	92	3
8	67	5	21	80	3	34	93	2
9	68	2	22	81	4	35	95	1
10	69	2	23	82	2	36	96	0
11	70	6	24	83	5	37	97	0
12	71	0	25	84	4	38	98	4
13	72	2	26	85	12	39	99	0

ТАБЛИЦА 4. Смертность ученых, рожденных в XX столетии и проживших 60 и более лет

№ п. п.	Возраст ученого	Количество умерших	№ п. п.	Возраст ученого	Количество умерших	№ п. п.	Возраст ученого	Количество умерших
1	60	2	14	73	2	27	86	6
2	61	1	15	74	2	28	87	3
3	62	3	16	75	3	29	88	1
4	63	0	17	76	3	30	89	5
5	64	1	18	77	2	31	90	3
6	65	0	19	78	1	32	92	0
7	66	2	20	79	1	33	93	5
8	67	6	21	80	2	34	94	3
9	68	2	22	81	3	35	95	1
10	69	0	23	82	3	36	96	0
11	70	1	24	83	3	37	97	3
12	71	1	25	84	2	38	98	1
13	72	3	26	85	3	39	99	0

тия. Она позволяет определить вероятности того, что индивидuum доживет до некоторого заданного возраста x лет, где x — любое действительное число. Для моделирования длительности активной жизни ученых-математиков в работе построена функция распределения вероятности дожития, область задания которой ограничена возможным интервалом значений лет дожития от 60 до 101 года. Она построена по табл. 5 и 6.

График непрерывной функции распределения вероятности дожития ученых-математиков, пред-

ставляющий собой кривую распределения вероятности дожития, ее выражение и коэффициент детерминации, представлен на рис. 1.

Моделирование и графическое представление функции распределения в работе выполнено с помощью инструмента «Регрессия» ППП Excel. Как видно из рис. 1, коэффициенты детерминации превышают 0,99 для обеих выборок. Они свидетельствуют, что связь между результатом применения модели (вероятностью) и фактором (годы жизни) достаточно тесная и соответствует порядка 99 %.

ТАБЛИЦА 5. Вероятности дожития ученых, рожденных до XX столетия и проживших 60 и более лет

№ п. п.	Возраст ученых	Вероятность дожития	№ п. п.	Возраст ученых	Вероятность дожития	№ п. п.	Возраст ученых	Вероятность дожития
1	60	0,95412844	14	73	0,65137615	27	86	0,13761468
2	61	0,91743119	15	74	0,63302752	28	87	0,11009174
3	62	0,89908257	16	75	0,58715596	29	88	0,10091743
4	63	0,88990826	17	76	0,53211009	30	89	0,10091743
5	64	0,86238532	18	77	0,47706422	31	90	0,09174312
6	65	0,85321101	19	78	0,44036697	32	92	0,09174312
7	66	0,82568807	20	79	0,42201835	33	93	0,06422018
8	67	0,77981651	21	80	0,39449541	34	94	0,04587156
9	68	0,76146789	22	81	0,35779817	35	95	0,04587156
10	69	0,74311927	23	82	0,33944954	36	96	0,03669725
11	70	0,68807339	24	83	0,29357798	37	97	0,03669725
12	71	0,68807339	25	84	0,25688073	38	98	0
13	72	0,66972477	26	85	0,14678899	39	99	0

ТАБЛИЦА 6. Вероятности дожития ученых, рожденных в XX столетии и проживших 60 и более лет

№ п. п.	Возраст ученых	Вероятность дожития	№ п. п.	Возраст ученых	Вероятность дожития	№ п. п.	Возраст ученых	Вероятность дожития
1	60	0,976190476	14	73	0,714285714	27	86	0,30952381
2	61	0,964285714	15	74	0,69047619	28	87	0,273809524
3	62	0,928571429	16	75	0,654761905	29	88	0,261904762
4	63	0,928571429	17	76	0,619047619	30	89	0,202380952
5	64	0,916666667	18	77	0,595238095	31	90	0,166666667
6	65	0,916666667	19	78	0,583333333	32	92	0,166666667
7	66	0,892857143	20	79	0,571428571	33	93	0,107142857
8	67	0,821428571	21	80	0,547619048	34	94	0,071428571
9	68	0,797619048	22	81	0,511904762	35	95	0,05952381
10	69	0,797619048	23	82	0,476190476	36	96	0,05952381
11	70	0,785714286	24	83	0,44047619	37	97	0,023809524
12	71	0,773809524	25	84	0,416666667	38	98	0,011904762
13	72	0,738095238	26	85	0,380952381	39	99	0

В демографической литературе часто значения функции дожития приводятся в таблицах дожития, то есть в виде ряда распределения, где вероятность соответствует целым значениям аргумента x . В случае задания возраста дискретно целыми числами функция позволяет легко построить ряд распределения вероятности дожития.

Таблицы дожития выдающихся ученых-математиков, согласно двум выборкам, позволяют оценить прирост вероятности дожития ученых, рожденных в XX столетии относительно рожден-

ных до XX столетия, как разность вероятностей дожития в соответствующее время. На рис. 2 представлена эта разность и ее аппроксимация в виде кривой, полиномиальной функции регрессии и коэффициента детерминации.

На основании величины коэффициента детерминации можно заключить, что возможности построения по статистическим данным принятой регрессионной зависимости приращения вероятности длительности жизни обеспечивается относительно высокой его величиной, порядка 0,879.

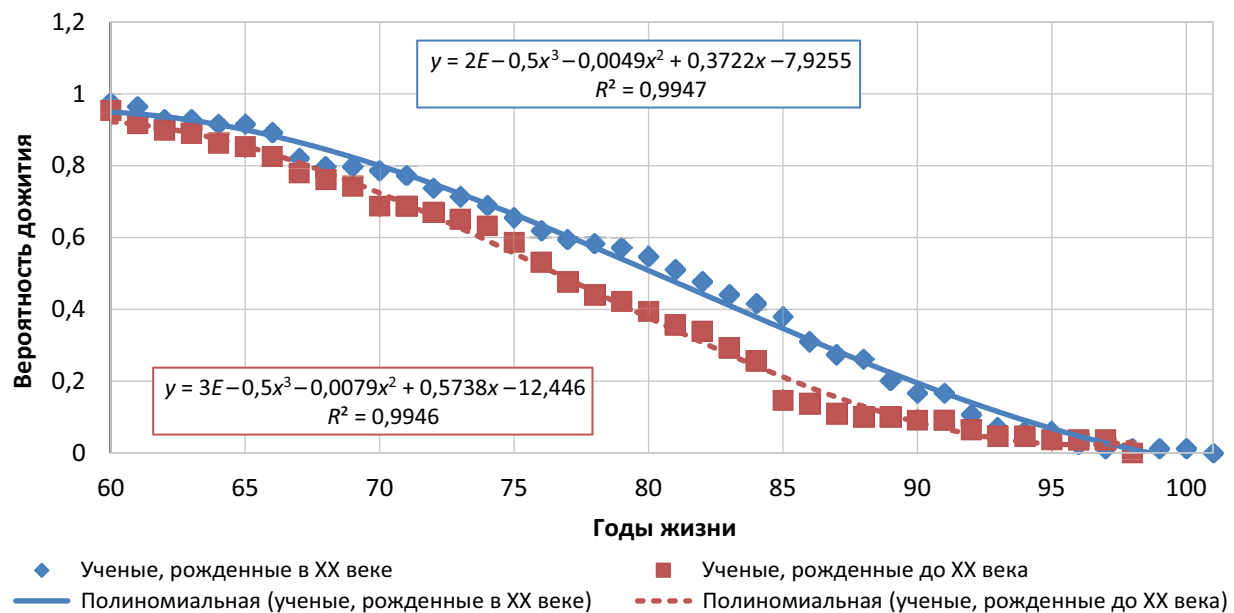


Рис. 1. Графики функций распределения вероятности дожития ученых-математиков, рожденных в разные столетия

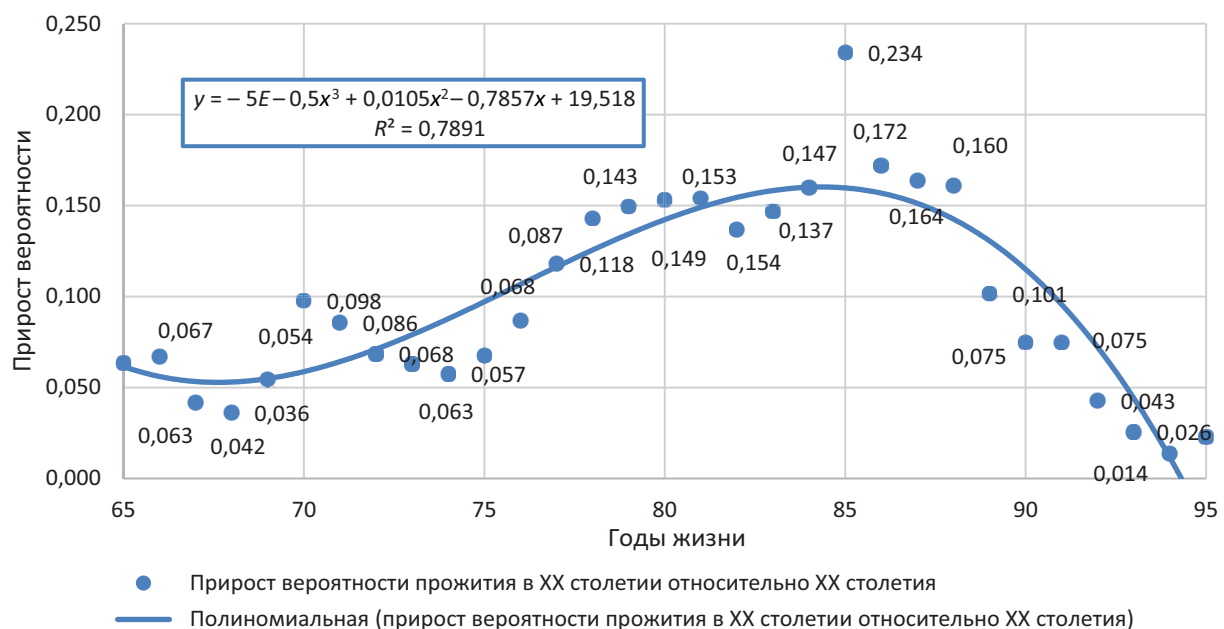


Рис. 2. Функция регрессии от года жизни ученых со значениями приращения вероятности рожденных в XX, по сравнению с рожденными до XX столетия, коэффициент детерминации и график функции

Такое значение коэффициента детерминации свидетельствует, что связь между приростом вероятности и годами жизни ученых составляет около 88 %.

Из рисунка следует, что для одного и того же года жизни выдающихся ученых-математиков, рожденных в XX столетии, вероятности дожития

обеспечены более высоким ее уровнем, по сравнению с вероятностью прожития ученых, рожденных до XX столетия. При этом приращение величины вероятности изменяется от 0,05 в начальный период длины жизни (порядок длины жизни 60 лет) до максимального значения 0,234 (порядок длины жизни 85 лет), а при длине жизни около 100 лет уменьшается до нуля. Очевидно, в годы жизни 60-летних ученых ее условия в обоих столетиях влияют несущественно на изменение ее срока по сравнению с годами жизни в районе от 75 до 90 лет. Если оценить приращение длины жизни в XX столетии по сравнению с периодом до XX столетия при одной и той же вероятности прожития, то в начале и конце рассматриваемого интервала прожития она практически совпадает, а в районе максимального приращения длительности жизни составляет от 4 до 5 лет.

Однако можно предположительно заключить, что на некоторый прирост срока активной жизни выдающихся ученых-математиков в определенном возрасте в XX столетии, по сравнению с рожденными до XX столетия, оказывают влияние много факторов, среди которых прежде всего следует назвать изменения условий жизни и работы, а также прогресс в медицине. Что касается влияния на прирост срока жизни творческой деятельности, то можно полагать ее менее существенной, по сравнению с влиянием названных факторов.

Библиографический список

1. Гаврилов Н. А. Биология продолжительности жизни / Н. А. Гаврилов, Н. С. Гаврилова; отв. ред. В. П. Скулачев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1991. — 280 с.
2. Анисимов В. Н. Молекулярные и физиологические механизмы старения: в 2 т. / В. Н. Анисимов. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб: Наука, 2008. Т. 1. — 481 с.; Т. 2. — 434 с.
3. Анисимов В. Н. Синдром ускоренного старения при воздействии канцерогенных факторов окружающей среды / В. Н. Анисимов // Рос. физиол. журн. — 2010. — Т. 96. — № 8. — С. 817–833.
4. Пучкова Е. И. Показатели биологического возраста и ускоренное старение у ликвидаторов последствий радиационных аварий / Е. И. Пучкова, Н. В. Алишев // Усп. геронтол. — 2011. — Т. 24. — № 1. — С. 99–104.
5. Анисимов В. Н. Стареет ли Нобелевский лауреат? Математический анализ возраста продолжительности жизни лауреатов Нобелевской премии за 1901–2003 гг. / В. Н. Анисимов, А. И. Михальский // Усп. геронтол. — 2004. — Т. 15. — С. 14–22.
6. Березкин В. Г. О некоторых демографических характеристиках членов Российской академии наук в XX в. / В. Г. Березкин, А. Л. Буляница // Усп. геронтол. — 2007. — Т. 20. — № 1. — С. 29–39.
7. Жаринов Г. М. Продолжительность жизни, долгожительство и некоторые причины смерти у литераторов разных жанров / Г. М. Жаринов, В. Н. Анисимов // Усп. геронтол. — 2016. — Т. 29. — № 2. — С. 210–217.
8. Анисимов В. Н. Средний возраст смерти и долгожительство мужчин-ученых различных специальностей / В. Н. Анисимов, Г. М. Жаринов // Вестн. моск. ун-та. — Сер. 16: Биология. — 2016. — № 4. — С. 12–18.
9. Правила долголетия. Результаты крупнейшего исследования долгожителей. — URL: <http://belibra.ru/Pravila-dolgolyetiya-Ryezuljttaty-krupnyeyishyego-isslyedovaniya-dolgozhityelyeyi.html> (дата обращения: 12.10.2021).
10. Collected Works in Mathematics and Statistics. — URL: <https://www.mscs.dal.ca/~dilcher/collwks.html#top> (дата обращения: 13.09.2021).
11. Бородин А. И. Биографический словарь деятелей в области математики / А. И. Бородин, А. С. Бугай; пер. с укр. — К.: Радянська школа, 1979. — 680 с.

Дата поступления: 09.12.2021

Решение о публикации: 21.02.2022

Контактная информация:

ГЕРАСИМЕНКО Пётр Васильевич — д-р техн. наук, профессор; pv39@mail.ru

Comparative Analysis of the Active Life of Outstanding Mathematicians Born In Different Centuries

P. V. Gerasimenko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Gerasimenko P. V. Comparative Analysis of the Active Life of Outstanding Mathematicians Born In Different Centuries // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 102–115. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-105-115

Summary

Purpose: To pursue analysis of longevity of world outstanding mathematicians whose life continued after living sixty years. To establish longevity levels for scientists born before and in the C20th. **Methods:** Models of longevity according to two samplings of scientists-mathematicians: born before and in the C20th, are built. Regression analysis and least square method are put on the basis of the model building. **Results:** Probability distribution functions for survival of outstanding scientists-mathematicians after they reached the age of sixty are determined using Excel package's Regression tool. **Practical significance:** Comparative analysis of the distribution functions is made and the survival probabilities for two samplings have been determined. The analysis of life longevity of outstanding scientists-mathematicians who lived till ages of 60 is recommended complimenting statistics used in then job. An array of statistical data has been formed that's made it possible to build models for estimating the probability of survival of mathematicians after 60 years. We've accepted construction and application of survival models based on two samplings of mathematicians born before and in C20th. Increasing levels of survival of the scientists born in C20th compared with those born before C20th have been established

Keywords: Scientists-mathematicians, model, probability, age, survival indicator, demography.

References

1. Gavrilov N. A. *Biologiya prodolzhitel'nosti zhizni* [Biology of life expectancy]. Moscow: Nauka Publ., 1991. 280 p. (in Russian)
2. Anisimov V. N. *Molekulyarnye i fiziologicheskie mekhanizmy stareniya* [Molecular and physiological mechanisms of aging]. St: Petersburg Nauka Publ., 2008, V. 1. 481 p. (in Russian)
3. Anisimov V. N. Sindrom uskorennoy stareniya pri vozdeystviy kantserogennykh faktorov okruzhayushchey sredy [Syndrome of accelerated aging under the influence of carcinogenic environmental factors]. *Ros. fiziol. zhurn.* [Ros. physiol. magazine]. 2010, V. 96, I. 8, pp. 817–833. (in Russian)
4. Puchkova E. I. Pokazateli biologicheskogo vozrasta i uskorennoe starenie u likvidatorov posledstviy radiatsionnykh avari [Indicators of biological age and accelerated aging in liquidators of the consequences of radiation accidents]. *Usp. Gerontol* [Usp. gerontol]. 2011, V. 24, I. 1, pp. 99–104. (in Russian)
5. Anisimov V. N. Stareet li Nobelevskiy laureat? Matematicheskiy analiz vozrasta prodolzhitel'nosti zhizni laureatov Nobelevskoy premii za 1901–2003 gg. [Does the Nobel laureate age? Mathematical analysis of the life expectancy age of Nobel Prize winners for 1901–2003]. *Usp. Gerontol* [Usp. gerontol]. 2004, V. 15, pp. 14–22. (in Russian)
6. Berezkin V. G. O nekotorykh demograficheskikh kharakteristikakh chlenov Rossiyskoy akademii nauk v KhKh [On some demographic characteristics of members of the Russian Academy of Sciences in the 20th century]. *Usp. Gerontol* [Usp. gerontol]. 2007, V. 20, I. 1, pp. 29–39. (in Russian)
7. Zharinov G. M. Prodolzhitel'nost' zhizni, dolgozhitel'stvo i nekotorye prichiny smerti u literatorov raznykh

zhanrov [Life expectancy, longevity and some causes of death among writers of different genres]. *Usp. Gerontol* [Usp. gerontol]. 2016, V. 29, I. 2, pp. 210–217. (in Russian)

8. Anisimov V. N. Sredniy vozrast smerti i dolgozhitel'stvo muzhchin-uchenykh razlichnykh spetsial'nostey [Average age of death and longevity of male scientists of various specialties]. *Vestn. mosk. un-ta* [Vestn. Moscow university]. 2016, I. 4, pp. 12–18. (in Russian)

9. *Pravila dolgoletiya. Rezul'taty krupneyshego issledovaniya dolgozhiteley* [Rules of longevity. The results of the largest study of centenarians]. Available at: <http://belibra.ru/Pravila-dolgolyetiya-Ryezuljjtaty-krupnyeyishyego-isslyedovaniya-dolgozhityeyeyi.html> (accessed 12 October 2021). (in Russian)

10. Collected Works in Mathematics and Statistics. Available at: <https://www.mscs.dal.ca/~dilcher/collwks.html#top> (accessed 13 September 2021).

11. Borodin A. I. *Biograficheskiy slovar' deyateley v oblasti matematiki* [Biographical dictionary of figures in the field of mathematics]. K.: Radyans'ka shkola Publ., 1979. 680 p. (in Russian)

Received: December 9, 2021

Accepted: February 21, 2022

Author's information:

Petr V. GERASIMENKO — D. Sci. in Engineering,
Professor; pv39@mail.ru

УДК 621.644, 628.14

Учет разрывов сплошности потока при гидравлических ударах на этапе проектирования напорных трубопроводов из полимерных материалов

О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Капинос О. Г., Твардовская Н. В. Учет разрывов сплошности потока при гидравлических ударах на этапе проектирования напорных трубопроводов из полимерных материалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 116–126. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-116-126

Аннотация

Цель: Показать необходимость уточнения в нормативных документах расчетных зависимостей для определения параметров гидравлического удара в напорных трубопроводах при использовании полимерных труб. Обосновать методики расчета гидравлического удара для таких трубопроводов с учетом возможности возникновения разрывов сплошности потока. Привести основные методы, направленные на предотвращение и минимизацию негативных последствий гидравлических ударов. **Методы:** Сравнение различных методик расчета параметров гидравлического удара. Для описания процесса гидравлического удара использован математический метод анализа бесконечно малых величин и метод характеристик. **Результаты:** Показана необходимость проведения на этапе проектирования напорных систем с использованием труб из полимерных материалов поверочных расчетов на гидравлический удар с учетом возможности возникновения в них разрывов сплошности потока и соответствующего отражения в нормативной литературе. **Практическая значимость:** Результаты работы рекомендуется учитывать при проведении поверочных расчетов напорных трубопроводов из полимерных материалов на случай возникновения гидравлических ударов, в том числе с разрывом сплошности потока, и разработке мероприятий по предотвращению таких явлений.

Ключевые слова: Проектирование, напорные трубопроводы, полимерные материалы, гидравлический удар, разрыв сплошности потока, метод характеристик.

Введение

Напорные трубопроводные системы проектируются с учетом не только установившегося гидравлического режима работы, но и проверяются на возможность возникновения в них неустановившихся процессов — гидравлических ударов, вызванных различными причинами [1].

При определенных условиях в процессе гидравлического удара в трубопроводе давление падает ниже атмосферного, что может приводить к появлению разрывов сплошности потока жидкости. Возникновение и последующее схлопыва-

ние таких кавитационных полостей вносит изменения в картину протекания гидравлического удара в целом, влияет на его продолжительность и на величины максимальных ударных давлений в разных частях напорной системы.

Основы теории гидравлического удара были заложены еще в 1899 г. Н. Е. Жуковским [2]. За последующее столетие проводились обширные теоретические и экспериментальные исследования как у нас в стране, так и за рубежом, которые позволили сначала графоаналитическим способом, а позже с использованием «метода характеристик»

и применением компьютерных технологий проводить расчеты трубопроводов на гидравлический удар, более точно учитывая параметры напорной системы и используемого оборудования.

Сегодня для проектировщиков напорных систем водоснабжения в нашей стране одним из основных нормативных документов является СП 31.13330.2012 [1]. В данном своде правил в п. 11.21 сказано о необходимости принимать «величину расчетного внутреннего давления равной наибольшему возможному по условиям эксплуатации давлению в трубопроводе на различных участках по длине (при наиболее невыгодном режиме работы) без учета повышения давления при гидравлическом ударе или с повышением давления при ударе с учетом действия противоударной арматуры». Такая сложная формулировка указывает на то, что производить расчет параметров гидравлического удара рекомендуется, но без уточнения методики расчета.

Следует отметить, что во вступившем в силу с 31 мая 2019 г. СП 399.1325800.2018 [3] в п. 5.6.3 повторяется формулировка п. 11.21 указанного выше свода правил, а затем в п. 5.6.4 отмечается, что давление гидравлического удара рекомендуется определять по формуле, возвращающей нас на столетие назад, — формуле Н. Е. Жуковского, выведенной для некоторых «идеальных» условий процесса.

Актуальность данного исследования заключается в обосновании методики расчета параметров гидравлического удара в напорных трубопроводах из полимерных материалов с учетом возможности возникновения разрывов сплошности потока жидкости, обладающей достаточной для практики точностью, так как существующая нормативная документация не учитывает возможность разрушения стыковых соединений труб и самих напорных труб из полимерных материалов в процессе возможных гидравлических ударов с разрывом сплошности потока.

Методы и материалы

Предметом исследования является процесс возникновения разрывов сплошности потока жидкости при гидравлическом ударе в полимерных трубопроводах. В процессе исследования авторами статьи последовательно применялись такие методы, как теоретический, общетеchnический анализ и синтез, наблюдение и моделирование.

Проведен анализ причин возникновения гидравлического удара с разрывом сплошности потока жидкости в напорных трубах из полимерных материалов. В статье обобщены и проанализированы различные методики расчета параметров гидравлического удара. Для описания процесса гидравлического удара использован математический метод анализа бесконечно малых величин и метод характеристик для решения уравнений, описывающих одномерный волновой поток.

Результаты исследования

Низкие скорости распространения волны гидравлического удара в совокупности со сложным, имеющим точки перелома профилем прокладки напорной системы очень часто приводят к снижению давления ниже атмосферного в разных частях трубопровода. В этом случае возрастает вероятность возникновения разрывов сплошности потока, при схлопывании которых возникает волна результирующего давления, которая из-за интерференции волн может вызывать появление давления у источника возникновения гидравлического удара и в любой другой точке напорной системы значительно выше рабочего давления. Образование таких крупных кавитационных пустот в потоке создает условия для возникновения обратной скорости движения жидкости в трубопроводе, значение которой будет превосходить величину исходной скорости жидкости при установившемся режиме.

На практике пренебрежение расчетами напорных систем на случай возникновения нестационарных режимов приводит к разрушительным последствиям, например, описанным в статье [4]. Гидравлический удар произошел в трубопроводе из полиэтилена высокой плотности при остановке всех рабочих насосов и сопровождался сильными колебаниями части трубопровода, проложенного над землей, повреждением и частичным нарушением его крепления. Проведенный расчет показал, что максимальное давление достигло 150 м вод. ст. при максимально допустимом — 100 м вод. ст.

Приведенный пример показывает, что, несмотря на эластичность и упругость используемого материала труб, в напорных системах может возникать гидравлический удар, несущий негативные последствия как в виде максимального ударного давления, превышающего рабочее, так и одновременно с этим в системе могут возникать области с понижением давления до вакуумметрического. Подобные неустановившиеся процессы движения, возникающие при транспортировке различных жидкостей гидротранспортными системами, могут приводить к авариям и загрязнению окружающей среды [5, 6].

Причины возникновения разрушительных последствий в каждом конкретном случае должны определяться расчетом параметров гидравлического удара с последующим анализом полученных диаграмм давления в различных точках сети и предложением мер по его предотвращению.

С момента выхода работы Н. Е. Жуковского о гидравлическом ударе в 1898 г. до середины прошлого века, т. е. до начала активного использования вычислительной техники для определения параметров гидравлического удара с использованием «метода характеристик», итогом большей части исследований был вывод формул, определяющих максимальное давление при гидравлическом ударе.

Формула Н. Е. Жуковского позволяет вычислить значение максимального давления при прямом гидравлическом ударе в простом трубопроводе [2]:

$$H = H_0 + \frac{c \cdot V_0}{g}, \quad (1)$$

где H — напор в рассматриваемой точке системы, возникающий в процессе гидравлического удара, м вод. ст.;

H_0 — напор в этой же точке при установившемся режиме движения жидкости по трубопроводу, м вод. ст.;

c — скорость распространения волны гидравлического удара, м/с;

V_0 — скорость движения жидкости в трубопроводе при установившемся режиме, м/с;

g — ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Многочисленные исследования, проведенные во второй половине XX в., показали, что формула (1) неприменима для расчета разветвленных напорных систем большой протяженности с пересеченным профилем магистралей, в которых давление при гидравлических ударах может понижаться до вакуумметрического. Так, в работе Л. Ф. Мошнина [7] отмечается, что максимальный напор в таких системах может достигать величины:

$$H = 3 \cdot H_0 + \frac{c \cdot V_0}{g}. \quad (2)$$

В работах Д. Н. Смирнова и Л. Б. Зубова [8] экспериментально доказано, что максимальное значение напора в системе при гидравлическом ударе с разрывом сплошности потока может быть выше, чем:

$$H = 2 \cdot H_0 + \frac{c \cdot V_0}{g}. \quad (3)$$

Таким образом, значение максимального давления при гидравлическом ударе с образованием крупных кавитационных пустот может дости-

гать величин, значительно превышающих значения, получаемые при вычислениях по формуле Н. Е. Жуковского (1).

В работе [9] авторами данной статьи на основе «метода характеристик» приводятся зависимости для определения величины напора H_i' и скорости движения жидкости V_i' в любой расчетной точке трубопроводной системы X_i для каждого момента времени t' .

В случае длительного понижения давления ниже атмосферного в части трубопровода развивается полость, заполненная парами жидкости и носящая название «разрыв сплошности потока» жидкости. С течением времени, при подходе волны повышения давления данная кавитационная полость схлопывается, что приводит к возрастанию давления в этой точке и возникновению новых колебаний давления во всей напорной системе. Для учета процесса возникновения, развития и схлопывания разрывов сплошности потока образование таких полостей предполагается только в характерных точках, таких как места установки регулирующих органов (насосы, задвижки, обратные клапаны) и в точках перелома профиля трассы трубопровода [9, 10]. Возникновение и существование разрыва сплошности потока предполагается в точке во все моменты времени, пока величина расчетного давления в этих узлах меньше, чем давление насыщенных паров жидкости.

Условие разрыва сплошности потока в точке перелома профиля напорной магистрали зависит от разности углов наклона к горизонту примыкающих к вершине участков водовода и определяется по формуле, предложенной Н. И. Колотило [9]. Образование незначительных кавитационных пустот по длине трубопровода учитывается коэффициентом M_p , предложенным В. С. Дикаревским [11].

Величина давления при гидравлическом ударе изменяется прямо пропорционально величине скорости его распространения по трубопроводу c (1). Для определения этой величины в трубах из поли-

мерных материалов необходимо учитывать упругие свойства грунтов, в которых прокладываются напорные трубопроводы. Учет коэффициента Пуассона грунта μ , глубины заложения оси трубы H (м) и модуля упругости грунта E_K (Па) позволяет повысить точность расчетов параметров гидравлического удара в целом, в этом случае [11, 12]:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E}{E_D}}} = \frac{1435}{\sqrt{1 + \frac{E}{E_D} \cdot \alpha}}, \quad (4)$$

где

$$\alpha = \frac{2 \cdot K \cdot D}{2 \cdot K \cdot \delta + \frac{E_K \cdot D}{E_D}}, \quad (5)$$

$$K = \frac{H^2 + (D/2)^2 + \mu \cdot (H^2 - (D/2)^2)}{(H^2 - (D/2)^2)}, \quad (6)$$

здесь E — модуль упругости перекачиваемой жидкости, Па;

ρ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³;

E_D — модуль упругой деформации материала труб, Па;

α и K — коэффициенты, определяемые соответственно по формулам (5) и (6);

D и δ — соответственно внутренний диаметр и толщина стенки трубопровода, м.

Используя зависимости, перечисленные выше и учитывающие профиль прокладки трубопровода, характер работы регулирующего органа, возможность возникновения кавитационных явлений по длине трубопровода, а в отдельных точках — образование разрывов сплошности потока жидкости, упругое обжатие труб грунтом, можно провести расчеты нестационарных режи-

мов в напорных системах. Ниже представлен график (рис. 1) изменения давления в процессе гидравлического удара, вызванного отключением насоса.

Скорость распространения ударной волны по опытным данным составила 680 м/с [13]. Как видно из диаграммы, перед подходом второй волны повышения давления у обратного клапана давление падает ниже атмосферного более значительно, чем в первой фазе понижения давления.

На рис. 2 представлен характерный график изменения давления у регулирующего органа (задвижки) при гидравлическом ударе с образованием разрыва сплошности потока [11]. Величина ударного давления повышается до своего максимального значения не в первой фазе, а в последующих из-за схлопывания разрывов сплошности потока.

Графики изменения давлений в процессе гидравлического удара можно построить для любой точки напорной системы, что позволяет более эффективно подбирать методы противоударной защиты.

Лучшим способом минимизировать последствия гидравлического удара — это исключить возможность его появления. По определению гидроудар возникает вследствие резкого изменения скорости движения воды, которое может быть вызвано открытием или закрытием задвижки, пуском или остановкой насоса. Поэтому бороться даже с такой причиной гидравлического удара, как отключение электроэнергии, а вследствие этого и отключением насосов, возможно путем применения аварийного источника питания и частотного регулирования.

Для предотвращения разрывов сплошности потока необходимо комплексно решать вопрос с прокладкой трассы трубопроводов. Возможно, делить трассу на отдельные участки и применять несколько насосных станций; минимизировать количество точек перелома профиля, в кото-

рых соблюдается условие образования разрывов сплошности потока (9). Однако наилучшим образом защитить напорную систему от гидравлических ударов можно, только проведя расчет его параметров.

Для смягчения негативных последствий в местах возможного снижения давления ниже атмосферного можно впускать воздух или воду. Данные мероприятия и их осуществление подробно рассмотрены в работах [9–11]. Вода или воздух заполняет образующиеся пустоты, что снижает значения как максимальных, так и минимальных давлений во всей системе. Метод имеет свои ограничения по применению, такие как громоздкость, обеспечение качества транспортируемой воды, дополнительные материальные затраты. Но на территории насосной станции при возможности понижения давления ниже атмосферного впуск воды или воздуха эффективен и надежен.

В случае возможности всесторонних расчетов на различные режимы параметров гидравлического удара можно воспользоваться простым методом противоударной защиты — деление трассы на участки с помощью установленных обратных клапанов. В случае возникновения гидравлического удара обратные клапаны при подходе воды, движущейся в обратном направлении, разобьют трубопровод на отдельные участки. Применение данного метода требует расчета с учетом времени срабатывания обратного клапана и места установки устройства на трассе.

В случае надземной прокладки трубопроводов необходимо учитывать продольные осевые силы, которые действуют на надземные участки трубопровода на трубопроводной эстакаде. Применение новых материалов для изготовления самих труб, опор для их прокладки [14] должно быть не только экономически эффективно, но и отвечать критериям надежности и долговечности.

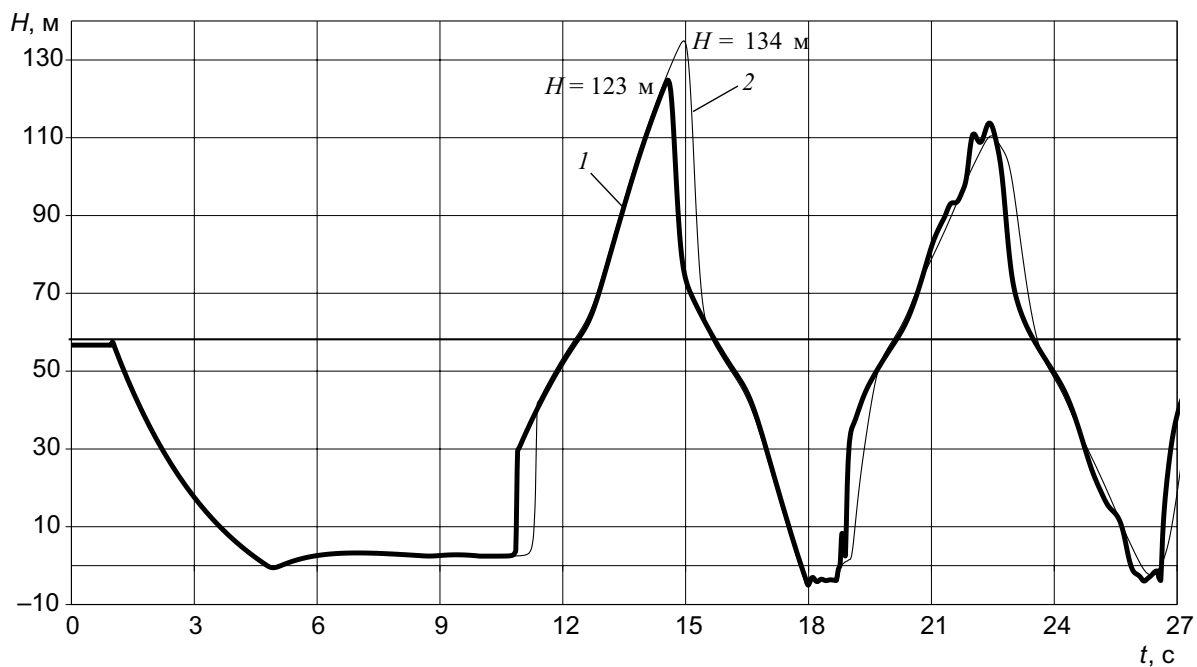


Рис. 1. Графики изменения давления у обратного клапана у насоса:
1 — график, построенный по экспериментальным данным [10];
2 — график, полученный по расчетным значениям

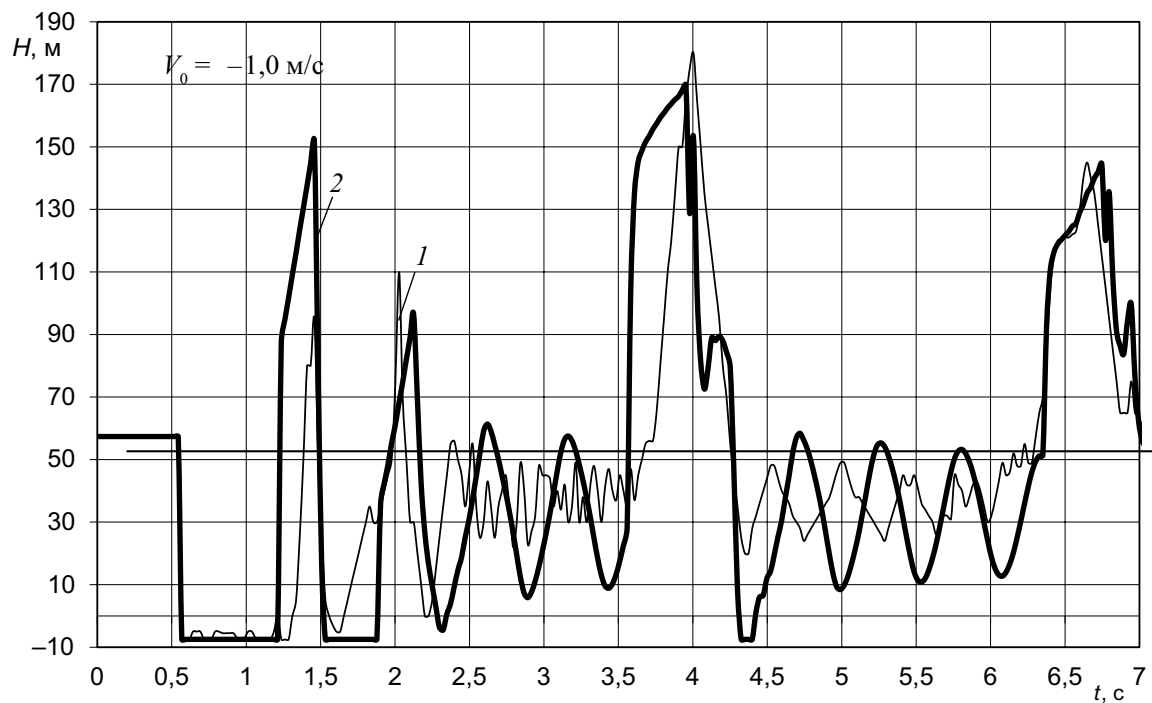


Рис. 2. Графики изменения давления у задвижки:
1 — график, построенный по экспериментальным данным;
2 — график, полученный по расчетным значениям

Критерием применимости того или иного метода противоударной защиты является не только его стоимость, а еще и стоимость мероприятий по устранению аварий, которые могут произойти при гидравлическом ударе. Комплекс достаточных и эффективных мероприятий должен основываться на расчетах, а не предположениях о величине давления в различных характерных точках системы.

Обсуждение

Производители различных пластмассовых труб в сопроводительных документах и внутренних инструкциях подчеркивают, что эластичные и упругие пластмассовые трубы обладают большей транспортирующей способностью и устойчивостью к гидравлическим ударам, чем трубы аналогичного диаметра, но изготовленные из стали или чугуна. При этом подразумевается, что расчет величины максимального ударного давления при возможном гидравлическом ударе в таких трубах даже не требуется.

Основываются эти утверждения на рассуждениях о том, что максимальное давление в случае гидравлического удара находится в прямой зависимости от скорости ударной волны, которая для труб из полимерных материалов составляет от 250 до 450 м/с, что значительно ниже, чем для стальных или чугунных труб. Но подобные рассуждения не учитывают ни волновой характер процесса гидравлического удара, ни профиль прокладки трубопровода, ни влияние упругих свойств грунта [15].

Очень часто при этом апеллируют к данным в соответствии с нормами NPG (Nordiska Plastror Gruppen) [16], в которых в п. 2.3.1 отмечается: «Обычно считается, что трубы из термопластиков (ПЭ, ПП и ПВХ) не требуют расчета на гидравлический удар, если максимальное давление в трубопроводе при гидравлическом ударе не превышает в 1,5 раза номинальное давление». Озна-

чает это только то, что сначала нужно провести расчет параметров гидравлического удара, выяснить максимальную величину ударного давления, сравнить его с давлением при установившемся движении и только потом делать вывод о необходимости применения методов и устройств, предотвращающих сам гидравлический удар или снижающих его негативные последствия.

На следующей странице [16] в п. 2.3.1 отмечается: «Напорные трубопроводы должны быть рассчитаны так, чтобы отрицательное давление в них никогда не достигало уровня, при котором мог бы возникнуть вакуум». В расчетах на гидравлический удар надо обращать внимание не только на значение максимального давления, но также рассматривать и анализировать возникновение в трубопроводе областей с понижением давления ниже атмосферного. Длительные по времени колебания давления то выше, то ниже атмосферного с течением времени негативно влияют на прочностные характеристики труб и их соединений. Авторы [4] отмечают, что опасным для любой системы является не только повышение величины давления, но и его понижение, особенно ниже атмосферного. В статье [4] подчеркивается, что при понижении давления возможны: «смятие пластиковых и тонкостенных стальных труб; отслоение цементно-песчаной внутренней облицовки труб; подсос грязной воды или воздуха в трубопровод через фланцевые соединения или соединительные муфты, сальниковые уплотнения или места утечки; разрыв сплошности потока, за которым следуют высокие скачки давления в результате схлопывания образовавшихся паровых полостей».

Формула (1), к которой отсылает нас [3], не учитывает интерференцию волн, изменения скорости движения потока по времени, профиль прокладки трубопровода при гидравлическом ударе в напорной системе из любого материала труб. Как показывают уже произошедшие аварии

на существующих системах, оговорка про специфичность и уникальность полимерного материала труб несостоятельна. Необходимо расчетом определять опасные участки системы и на них при необходимости использовать трубы из других материалов, делая поверочные расчеты.

На сегодняшний день практическую ценность имеют только методики расчета, комплексно учитывающие все особенности напорной системы. В этом случае, проведя анализ результатов расчета, можно сделать выводы о показателях работы системы, наиболее значимо влияющих на величину давления при гидравлическом ударе и на характер протекания всего процесса в целом.

Основываясь на проведенных всесторонних расчетах, можно подобрать комплекс противоударных мероприятий и проверить его эффективность, смоделировав процесс протекания гидроудара при принятом способе защиты. В случае расчета с использованием только формулы (1), определяющей величину максимального ударного давления, применение эффективной защиты сомнительно.

Пренебрежительное отношение к выработке комплекса мер по предотвращению или смягчению негативных последствий гидравлического удара приводит к снижению надежности всей системы в целом [14], а в последствии к увеличенным затратам на проведение мероприятий по устранению аварии и внедрению мер противоударной защиты. На практике очень часто только после аварии из-за гидравлического удара и катастрофических последствий предусматривается противоударная защита, иногда даже излишняя [4].

Заключение

Представленные результаты доказывают, что нельзя сводить расчеты параметров гидравлического удара только к определению величины максимального ударного давления по формуле

Н. Е. Жуковского. Использование метода характеристик для моделирования процесса гидравлического удара в напорных системах из полимерных материалов позволяет определять места разрывов сплошности потока, величину падения давления ниже атмосферного и максимальные значения давления в системе с учетом всех факторов, тем самым позволяя подбирать более эффективный комплекс мероприятий по противоударной защите.

Библиографический список

1. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84. — М., 2021. — 147 с.
2. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. — М.; Л.: ГИТТЛ, 1949. — 104 с.
3. СП 399.1325800.2018. Системы водоснабжения и канализации наружные из полимерных материалов. Правила проектирования и монтажа. — М., 2021. — 130 с.
4. Людеке Х.-Й. Гидроудар: причины, анализ и способы предотвращения / Х.-Й. Людеке, Б. Котэ, К. Паули // Водоснабжение и санитарная техника. — 2015. — № 8. — С. 62–69.
5. Titova T. Accident at river-crossing underwater oil pipeline / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova, A. Elizaryev // MATEC Web of Conferences. — 2018. — № 239.06003.
6. Ryzhova L. V. Ensuring Environmental Safety during the Construction and Operation of Tunnels in Residential Areas / L. V. Ryzhova, T. S. Titova, S. G. Gendler // Procedia Engineering. — 2017. — № 189. — Pp. 404–410.
7. Мошнин Л. Ф. Расчеты гидравлического удара / Л. Ф. Мошнин, Е. Т. Тимофеева. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952. — 200 с.
8. Смирнов Д. Н. Гидравлический удар в напорных водоводах / Д. Н. Смирнов, Л. Б. Зубов. — М.: Стройиздат, 1975. — 122 с.
9. Капинос О. Г. Последствия гидравлических ударов, сопровождающихся разрывами сплошности потока жидкости / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Известия

Петербургского университета путей сообщения. — 2011. — Вып. 3(28). — С. 167–176.

10. Твардовская Н. В. Гидравлический удар в напорных трубопроводах водоотведения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. В. Твардовская. — СПб.: СПбГАСУ, 2005. — 24 с.

11. Дикаревский В. С. Гидравлический удар в напорных трубопроводах водоотведения / В. С. Дикаревский, О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Вестник РААСН. — 2004. — Вып. 8. — С. 152–156.

12. Капинос О. Г. Влияние выбранного материала труб на величину давления в трубопроводе при возможном гидравлическом ударе / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2008. — № 2(15). — С. 112–119.

13. Христов Хр. Резултати от натуралните изследвания на хидравлическия удар в някои наши помпени станции / Хр. Христов // Изв. на института по водни проблеми БАН. Отд. за техн. Науки. — 1969. — Т. 10. — С. 121–185.

14. Petrova T. M. Geotechnical problems of transport construction and their solutions / T. M. Petrova, E. Y. Chistyakov // Geotechnics Fundamentals and

Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations — Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019. — Pp. 250–253.

15. Капинос О. Г. Степень влияния различных факторов на величину давления при гидравлических ударах / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. — 2014. — № 114. — С. 122–126.

16. Пластмассовые трубы, их характеристики и область применения. — Стокгольм: NPG, 1999. — 114 с.

Дата поступления: 02.02.2022

Решение о публикации: 28.02.2022

Контактная информация:

КАПИНОС Ольга Геннадьевна — канд. техн. наук, доцент; olk1975@mail.ru

ТВАРДОВСКАЯ Надежда Владимировна — канд. техн. наук, доцент; tvardovskaya@pgups.ru

Accounting for Flow Discontinuities While Water Hammers at Engineering Stage of Pressure Pipelines Made of Polymeric Materials

O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaya

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. Accounting for Flow Discontinuities While Water Hammers at Engineering Stage of Pressure Pipelines Made of Polymeric Materials // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 116–126. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-116-126

Summary

Purpose: To show the need to clarify calculation dependencies in regulatory documents for determining the parameters of water hammer in pressure pipelines when using polymeric pipes. To substantiate the methods to calculate hydraulic shock for such pipelines taking into account the appearance possibility of flow discontinuities. To present the main methods aimed at prevention and minimization of the negative consequences of water hammers. **Methods:** Comparison of various methods for the calculation of parameters of water hammer. To describe the process of water hammer the mathematical method of analysis of infinitesimals and characteristic method are used. **Results:** It is shown that it is necessary to carry out at engineering stage of pressure systems using pipes made of polymeric materials the verification calculations for water hammer taking into account the appearance possibility of flow discontinuities there and to reflect it correspondingly in a normative literature. **Practical importance:** The results of the work are recommended to be taken into account when carrying out verification calculations of pressure pipelines made of polymeric materials in case of water hammer occurrence including with a break in flow continuity and developing the measures to prevent such phenomena.

Keywords: Engineering, pressure pipelines, polymeric materials, water hammer, flow continuity, flow discontinuity, method of characteristics.

References

1. SP 31.13330.2012. *Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.04.02-84* [SP 31.13330.2012. Water supply. External networks and structures. Updated edition of SNIp 2.04.02-84]. Moscow, 2021. 147 p. (in Russian)
2. Zhukovskiy N. E. *O gidravlicheskom udare v vodoprovodnykh trubakh* [On hydraulic shock in water pipes]. Moscow: GITTL Publ., 1949. 104 p. (in Russian)
3. SP 399.1325800.2018. *Sistemy vodosnabzheniya i kanalizatsii naruzhnye iz polimernykh materialov. Pravila proektirovaniya i montazha* [SP 399.1325800.2018. External water supply and sewerage systems made of polymeric materials. Rules for design and installation]. Moscow, 2021. 130 p. (in Russian)
4. Lyudeke Kh.-Y. *Gidroudary: prichiny, analiz i sposoby predotvrashcheniya* [Water hammer: causes, analysis and ways to prevent]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering]. 2015, I. 8, pp. 62–69. (in Russian)
5. Titova T. Accident at river-crossing underwater oil pipeline / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova, A. Elizaryev // *MATEC Web of Conferences*. 2018. I. 239.06003.
6. Ryzhova L. V. Ensuring Environmental Safety during the Construction and Operation of Tunnels in Residential Areas / L. V. Ryzhova, T. S. Titova, S. G. Gendler // *Procedia Engineering*. 2017. I. 189. Pp. 404–410.
7. Moshnin L. F. *Raschety gidravlicheskogo udara* [Calculations of hydraulic shock]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1952. 200 p. (in Russian)

8. Smirnov D. N. *Gidravlicheskiy udar v napornykh vodovodakh* [Hydraulic shock in pressure conduits]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1975. 122 p. (in Russian)
9. Kapinos O. G. Posledstviya gidravlicheskiykh udarov, soprovozhdayushchikhsya razryvami sploshnosti potoka zhidkosti [Consequences of hydraulic shocks accompanied by discontinuities in fluid flow]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the Petersburg University of Communications]. 2011, I. 3(28), pp. 167–176. (in Russian)
10. Tvardovskaya N. V. *Gidravlicheskiy udar v napornykh truboprovodakh vodootvedeniya. Kand. Diss* [Hydraulic shock in pressure pipelines of water disposal. Cand. Diss]. St. Petersburg: SPbGASU Publ., 2005. 24 p. (in Russian)
11. Dikarevskiy V. S. *Gidravlicheskiy udar v napornykh truboprovodakh vodootvedeniya* [Hydraulic shock in pressure sewerage pipelines]. *Vestnik RAASN* [Vestnik RAASN]. 2004, I. 8, pp. 152–156. (in Russian)
12. Kapinos O. G. Vliyaniye vybrannogo materiala trub na velichinu davleniya v truboprovode pri vozmozhnom gidravlicheskom udare [Influence of the selected pipe material on the magnitude of pressure in the pipeline with a possible hydraulic shock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2008, I. 2(15), pp. 112–119. (in Russian)
13. Khristov Khr. Rezultati ot naturalnite izledvaniya na khidravlichniya udar v nyakoi nashi pompeni stantsii [Results from natural research on hydraulic shock to some of our pumping stations]. *Izv. na instituta po vodni problemi BAN. Otd. za tekhn. Nauki* [Izv. at the Institute for Water Problems BAN. Dep. for tech. Science]. 1969, V. 10, pp. 121–185. (in Russian)
14. Petrova T. M. Geotechnical problems of transport construction and their solutions / T. M. Petrova, E. Y. Chistyakov // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations — Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019*. Pp. 250–253.
15. Kapinos O. G. Stepen' vliyaniya razlichnykh faktorov na velichinu davleniya pri gidravlicheskiykh udarakh [The degree of influence of various factors on the magnitude of pressure during hydraulic shocks]. *Komunal'ne gospodarstvo mist. Ceriya: Tekhnichni nauki ta arkhitektura* [Communal State of Mist. Series: Technical sciences and architecture]. 2014, I. 114, pp. 122–126. (in Russian)
16. *Plastmassovye truby, ikh kharakteristiki i oblast' primeneniya* [Plastic pipes, their characteristics and scope]. Stokgol'm: NPG Publ., 1999. 114 p. (in Russian)

Received: February 2, 2022

Accepted: February 28, 2022

Author's information:

Olga G. KAPINOS — PhD in Engineering, Associate Professor; olk1975@mail.ru

Nadezhda V. TVARDOVSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor; tvardovskaya@pgups.ru

УДК 539.18

Устойчивость процедуры вычисления радиационных времен жизни

А. В. Логинов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Логинов А. В. Устойчивость процедуры вычисления радиационных времен жизни // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 127–132. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-127-132

Аннотация

Цель: Радиационные времена жизни уровней энергии атомов и ионов относятся к фундаментальным физическим константам, сведения о которых необходимы во многих областях как фундаментальной, так и прикладной науки. Знание этих величин необходимо при поисках активных сред для оптических генераторов, для диагностики плазмы как лабораторной, так и астрофизической и т. д. При расчете времен жизни очень существенно оценить влияние упрощений и предположений, положенных в основу вычислительной процедуры. В частности, оценить влияние наложения конфигураций, учет которого значительно усложняет модель расчета. Настоящая работа исследует этот вопрос на частном примере спектра шестикратного иона вольфрама W VII. **Методы:** Полуэмпирическим методом промежуточной связи с использованием экспериментальных уровней энергии, известных из литературы, исследовано наложение конфигураций $4f^{13}5p^66p + 4f^{14}5p^56p$ в спектре эрбийподобного иона W VII. При этом волновые функции промежуточной связи нечетных конфигураций найдены в одноконfigurационном приближении; радиальные интегралы, необходимые для перехода к абсолютной шкале вероятностей переходов, рассчитаны в форме длины с функциями Хартри — Фока. Времена жизни уровней $4f^{13}5p^66p$ вычислены суммированием вероятностей электродипольных переходов $4f^{13}5p^66p + 4f^{14}5p^56p \rightarrow 4f^{13}5p^65d, 4f^{13}5p^66s$. **Результаты:** Получено, что существенное перемешивание конфигураций имеет место для состояний с полным угловым моментом $J = 3$. Значения времен жизни уровней оказались малочувствительными к влиянию перемешивания конфигураций. По мнению автора это связано с тем, что времена жизни определяются вероятностями наиболее интенсивных переходов, которые, в свою очередь, наименее чувствительны к возможным неточностям расчетной процедуры. **Практическая значимость:** Практически значимыми являются значения времен жизни уровней $4f^{13}5p^66p$ в спектре W VII, отсутствующие на данный момент в современных базах данных.

Ключевые слова: Промежуточная связь, наложение конфигураций, полуэмпирический метод, изоэлектронный ряд эрбия, времена жизни уровней.

Введение

В недавней работе [1] были рассчитаны вероятности электродипольных радиационных переходов в спектре иона W VII. Мотивом для выполнения этого расчета послужили два фактора. Во-первых, согласно базе данных [2] какие-либо опубликованные сведения по радиационным кон-

стантам в спектре иона W VII отсутствуют, хотя вероятности переходов и времена жизни уровней есть фундаментальные физические константы, знание которых необходимо во многих областях фундаментальной и прикладной науки [3]. Во-вторых, ранее [4, 5] автор настоящей работы принимал участие в вычислениях вероятностей

переходов и времен жизни уровней в спектрах ионов Yb III — Ta VI изоэлектронного ряда эрбия, к которому принадлежит ион W VII. Таким образом, упомянутый расчет [1] можно рассматривать как продолжение работ [4, 5].

Цель настоящей работы — подробно рассмотреть существенную деталь расчетной процедуры [1]. Речь пойдет о вычислении волновых функций промежуточной связи с учетом наложения конфигураций $4f^{13}5p^66p + 4f^{14}5p^56p$ в спектре эрбийподобного иона W VII, а также о влиянии наложения конфигураций на вычисляемые значения радиационных времен жизни уровней.

Метод расчета

Времена жизни уровней $4f^{13}5p^66p$ получены суммированием вероятностей электродипольных переходов $4f^{13}5p^66p + 4f^{14}5p^56p \rightarrow 4f^{13}5p^65d, 4f^{13}5p^66s$. Для перехода к абсолютным значениям вероятностей переходов использованы радиальные интегралы переходов, вычисленные в форме длины диполя с функциями Хартри — Фока [6].

Волновые функции промежуточной связи нечетных уровней $4f^{13}5p^66s, 4f^{13}5p^65d$, необходимые для вычисления вероятностей переходов, найдены в одноконфигурационном приближении. При вычислении волновых функций промежуточной связи четных уровней принято во внимание наложение конфигураций $4f^{13}5p^66p + 4f^{14}5p^56p$. Для этого пришлось рассчитать матричный элемент оператора электростатического взаимодействия $H_{эл-ст}$, используя технику тензорных операторов [7–10]:

$$\begin{aligned} \langle f^{14}p^5p'; SL | H_{эл-ст} | f^{13}p^6p'; SL \rangle = \\ = \delta(L, 2) \delta(k, 2) \sqrt{84} (3/2) \begin{pmatrix} 3 & k & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & k & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \end{aligned}$$

$$\left[\begin{aligned} & \times (-1)^{-L-k} \begin{pmatrix} 1 & 1 & L \\ 1 & 3 & k \end{pmatrix} \left((-1)^{1+S} / 2 + 3 \begin{pmatrix} S & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \right) \times \\ & \times R^k(f, p'; p, p'); \\ & \times 1/5 \left(\frac{(-1)^{1+S}}{2} - 3 \begin{pmatrix} S & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \right) R^k(f, p'; p', p) \end{aligned} \right].$$

Здесь выражения в круглых и фигурных скобках есть соответственно $3nj$ - и $6j$ -символы.

Радиальные интегралы, входящие в выражения для матричных элементов оператора энергии, получены методом наименьших квадратов (МНК) по известным экспериментальным значениям [11] уровней энергии. Отметим, что эти значения фигурируют как рекомендованные в базе данных [2]. Приняты во внимание электростатическое, спин-орбитальное и так называемое эффективное взаимодействие. Соответствующие величины обозначены в табл. 1, 2 как F_{fl}^k, G_{fl}^k (электростатические интегралы Слэтера прямого и обменного взаимодействий), ξ_{4p}, ξ_{6p} (спин-орбитальные константы), F_1 (интеграл Слэтера прямого взаимодействия с запрещенным рангом, «эффективно» учитывающий вклад двухчастичных взаимодействий, операторы которых действуют только на пространственные координаты). Правила вычисления угловых коэффициентов перед параметрами $F_{fl}^k, G_{fl}^k, \xi_{4p}, \xi_{6p}$ общеизвестны (например, [6]), правила вычисления угловых коэффициентов перед эффективным параметром F_1 можно найти в [5]. Здесь только напомним, что для описания межэлектронных взаимодействий в конфигурациях типа $f^{13}l, p^5p$ (дырка — электрон) достаточно привлечь одно- и двухчастичные операторы.

Качество реализации предписания наименьших квадратов определяется дисперсиями параметров, а также стандартными (σ) и среднеквадратичными (Δ) отклонениями по энергии:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{\text{calc}}^i - E_{\text{exp}}^i)^2 / (n - m)},$$

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{\text{calc}}^i - E_{\text{exp}}^i)^2 / n},$$

где n — число экспериментальных уровней, включенных в процедуру МНК;

m — число свободно варьируемых параметров;

$E_{\text{calc}}^i, E_{\text{exp}}^i$ — соответственно вычисленное и экспериментальное значения энергии i -го уровня.

Результаты

Из табл. 1, 2 видно, что для конфигураций $4f^{13} 5p^6 6s$, $4f^{13} 5p^6 6p + 4f^{14} 5p^5 6p$ все параметры хорошо определены. Сопоставление с соответствующими величинами из [4, 5] для Yb III — Ta VI

показывает также, что эти параметры (исключая F_1) монотонно меняются с изменением заряда ядра. Отдельно отметим малость дисперсий для радиальных интегралов $R^2(5p, 6p; 4f, 6p)$, $R^2(5p, 6p; 6p, 4f)$, входящих в межконфигурационные матричные элементы. Это означает, что изучаемое наложение конфигураций вносит существенный вклад в спектр уровней энергии W VII. Действительно, учет наложения конфигураций $4f^{13} 5p^6 6p + 4f^{14} 5p^5 6p$ заметно уменьшил стандартное отклонение по энергии — от 197 см^{-1} для $4f^{13} 5p^6 6p$ и 210 см^{-1} для $4f^{14} 5p^5 6p$ (в одноконфигурационном приближении) до 40 см^{-1} . Также заметно уменьшились, по сравнению с одноконфигурационным приближением, дисперсии параметров (значения параметров и их дисперсий, рассчитанные в одноконфигурационном приближении, приведены в табл. 2 в скобках).

ТАБЛИЦА 1. Параметры (в см^{-1}) матрицы энергии конфигураций $4f^{13} 6s$, $4f^{13} 5p^6 5d$

$4f^{13} 5p^6 6s$		$4f^{13} 5p^6 5d$			
Параметр		Параметр		Параметр	
F_{fs}^0	$34\,605 \pm 8$	F_{fd}^0	$26\,636 \pm 292$	G_{fd}^5	$11\,856 \pm 9191$
G_{fs}^2	5229 ± 118	F_{fd}^2	$29\,718 \pm 3684$	ξ_{4f}	5140 ± 211
ξ_{4f}	4960 ± 5	F_{fd}^4	$21\,497 \pm 10032$	ξ_{5d}	4511 ± 312
σ	17	G_{fd}^1	6840 ± 1023	σ	1403
Δ	8	G_{fd}^3	$20\,205 \pm 9058$	Δ	1041

ТАБЛИЦА 2. Параметры (в см^{-1}) матрицы энергии конфигураций $4f^{13} 5p^6 6p + 4f^{14} 5p^5 6p$

Параметр	$4f^{13} 5p^6 6p$	Параметр	$4f^{14} 5p^5 6p$	Параметр	$4f^{13} 5p^6 6p + 4f^{14} 5p^5 6p$
F_{fp}^0	$41\,455 \pm 11$ ($41\,508 \pm 51$)	F_{pp}^0	$113\,796 \pm 18$ ($113\,489 \pm 117$)	$R^2(5p, 6p; 4f, 6p)$	-9265 ± 304
F_{fp}^2	$12\,676 \pm 143$ ($12\,401 \pm 694$)	F_{pp}^2	$21\,974 \pm 370$ ($22\,943 \pm 1591$)	$R^2(5p, 6p; 6p, 4f)$	-2937 ± 970
G_{fp}^2	3783 ± 105 (4302 ± 462)	G_{pp}^0	3855 ± 17 (3861 ± 92)	σ	40
G_{fp}^4	3926 ± 280 (5055 ± 1311)	G_{pp}^2	$10\,233 \pm 298$ (6343 ± 1396)	Δ	23
ξ_{4f}	4967 ± 8 (5010 ± 35)	ξ_{5p}	$57\,597 \pm 20$ ($57\,533 \pm 102$)		
ξ_{6p}	$14\,130 \pm 19$ ($14\,107 \pm 87$)	ξ_{6p}	$14\,224 \pm 21$ ($14\,376 \pm 98$)		
		F_1	-40 ± 17 (106 ± 67)		
σ	197	σ	210		
Δ	139	Δ	94		

ТАБЛИЦА 3. Времена жизни (в ns) уровней конфигурации $4f^{13} 5p^6 6p$

Уровень	τ	Уровень	τ	Уровень	τ
(5/2,3/2)1	0,081	(7/2,3/2)3	0,092	(5/2,3/2)4	0,080
(7/2,3/2)2	0,083	(7/2,1/2)3	0,107	(7/2,3/2)4	0,078
(5/2,1/2)2	0,106	(5/2,3/2)3	0,079	(7/2,1/2)4	0,106
(5/2,3/2)2	0,079	(5/2,1/2)3	0,106	(7/2,3/2)5	0,079

Примечание. Для идентификации уровней конфигурации $4f^{13} 5p^6 6p$ принята система обозначений $J_1 j J$ -связи: уровни идентифицируются тремя числами $(J_1 j) J$, где J_1 — полный угловой момент электронной оболочки $4f^{13}$, j — полный угловой момент $6p$ -электрона, J — полный угловой момент конфигурации $4f^{13} 5p^6 6p$.

Что касается волновых функций промежуточной связи, то существенно перемешиваются компоненты $4f^{13} 6p$ и $4f^{14} 5p^5 6p$ для состояний с полным угловым моментом $J = 3$. Так, например,

$$(4f^{13} 5p^6 6p + 4f^{14} 5p^5 6p)^1 F_3 = \\ = 0,699(4f^{13} 5p^6 6p^1 F_3) + 0,473(4f^{13} 5p^6 6p^3 D_3) - \\ - 0,388(4f^{13} 5p^6 6p^3 F_3) + 0,021(4f^{14} 5p^5 6p^3 G_3) - \\ - 0,369(4f^{14} 5p^5 6p^3 D_3),$$

$$(4f^{13} 5p^6 6p + 4f^{14} 5p^5 6p)^3 D_3 = \\ = 0,247(4f^{13} 5p^6 6p^1 F_3) + 0,271(4f^{13} 5p^6 6p^3 D_3) - \\ - 0,105(4f^{13} 5p^6 6p^3 F_3) - 0,056(4f^{14} 5p^5 6p^3 G_3) + \\ + 0,923(4f^{14} 5p^5 6p^3 D_3).$$

Однако, как выяснилось при выполнении работы [1], на вероятностях переходов $4f^{13} 5p^6 6p + 4f^{14} 5p^5 6p \rightarrow 4f^{13} 5p^6 6s, 4f^{13} 5p^6 7s$ указанное наложение конфигураций сказалось не очень заметно, а значения времен жизни уровней $f^{13} 5p^6 7s$, определяемые наиболее интенсивными переходами $4f^{14} 5p^5 7s \rightarrow 4f^{13} 5p^6 6p$, совпадают при расчете в одно- и многоконфигурационном приближении с точностью до четырех значащих цифр.

Что касается конфигурации $4f^{13} 5p^6 5d$, то судя по табл. 1, одноконфигурационное приближение не очень хорошо описывает экспериментальные

уровни этой конфигурации. Тем не менее есть надежда, что на вычисленных значениях времен жизни уровней $4f^{13} 5p^6 6p$ (табл. 3) это обстоятельство не скажется критическим образом. Эта надежда косвенно основана на том, что времена жизни определяются вероятностями наиболее интенсивных переходов, значения которых наиболее устойчивы по отношению к возможным неточностям функций промежуточной связи. Именно такая ситуация, как это уже было отмечено выше, наблюдается при оценке влияния наложения конфигураций $4f^{13} 5p^6 6p + 4f^{14} 5p^5 6p$ на времена жизни уровней $4f^{13} 5p^6 7s$.

Библиографический список

1. Логинов А. В., Радиационные константы в спектре иона W VII / А. В. Логинов, В. И. Никитченко // Оптика и спектроскопия. — 2020. — Т. 128. — Вып. 8. — С. 1074.
2. Kramida A. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.3) / A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader and NIST ASD Team. — URL: <http://physics.nist.gov/asd>.
3. Lapshin V. F. Radiative heat transfer in plasma of pulsed high pressure cesium discharge / V. F. Lapshin // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 669. — P. 012035.
4. Анисимова Г. П. Вероятности электрических дипольных переходов в спектрах ионов изоэлектронного ряда эрбия / Г. П. Анисимова, А. В. Логинов, В. И. Тучкин // Оптика и спектроскопия. — 2000. — Т. 90. — № 3. — С. 184.
5. Логинов А. В. Радиационные константы в спектре ионов изоэлектронного ряда эрбия / А. В. Логинов, В. И. Тучкин // Оптика и спектроскопия. — 2001. — Т. 90. — № 5. — С. 709.
6. Cowan R. D. The Theory of Atomic Structure and Spectra / R. D. Cowan. — Berkeley: University of California Press, 1981.
7. Wybourne B. G. Spectroscopic Properties of the Rare Earths / B. G. Wybourne. — N. Y.: Wiley, 1965. — 236 p.
8. Юцис А. П. Математический аппарат теории моментов количества движения / А. П. Юцис, И. Б. Левинсон, В. В. Ванагас. — Вильнюс, 1960. — 243 с.

9. Петрашень М. И. Применение теории групп в квантовой механике / М. И. Петрашень, Е. Д. Трифонов. — М.: Наука, 1967. — 308 с.

10. Бейман Б. Ф. Лекции по применению теории групп в ядерной спектроскопии / Б. Ф. Бейман; пер. с англ. Ю. И. Харитонов. — М.: ГИФМЛ, 1961. — 226 с.

11. Sugar J. Seventh spectrum of tungsten (W VII); resonance lines of Hf V / J. Sugar, V. Kaufman // Physical Review A. — 1975. — Vol. 12. — № 3. — P. 994.

Дата поступления: 06.02.2022

Решение о публикации: 21.02.2022

Контактная информация:

ЛОГИНОВ Андрей Васильевич — д-р физ.-мат. наук, профессор; andrlgnv@yandex.ru

Constancy of Calculation Procedure for Radiation Lifetimes

A. V. Loginov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Loginov A.V. Constancy of Calculation Procedure for Radiation Lifetimes // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 127–132. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-127-132

Summary

Purpose: Radiation lifetimes of atom and ion energy levels refer to fundamental physical constants which knowledge of is necessary in many fields of both, fundamental or applied science. The knowledge of these values is necessary at search of active medias for optical generators, for plasma both laboratory or astrophysical and other diagnostics. While lifetime calculation, it's very vital to evaluate the impact of simplifications and supposition, put on the basis of calculation procedure. In particular, to evaluate impact of configuration superposition which consideration significantly complicates calculation model. The present work investigates this issue on a particular example of spectrum of sixfold wolfram ion W VII. **Methods:** Superposition of configurations $4f^{13}5p^66p + 4f^{14}5p^56p$ in the spectrum of erbium-similar W VII is investigated by semiempirical method of intermediate coupling with the use of energy experimental levels known from the literature. Together, wave functions of intermediate binding of odd configurations have been found in a single-configuration approximation; radial integrals, that're necessary for transfer to absolute scale of transition probabilities, are calculated in the form of length with Hartree-Fock functions. Lifetimes of $4f^{13}5p^66p$ levels are calculated by summarizing electric dipole transition probabilities $4f^{13}5p^66p \rightarrow 4f^{13}5p^65d, 4f^{13}5p^66s$. **Results:** It's been obtained that configuration essential mixing takes place for states with total angular momentum $J = 3$. Values of level lifetimes have been appeared to be insensitive to influence of configuration mixing. As to author's opinion, it's connected with that the lifetimes are defined by the probabilities of the most intensive transitions which in its turn, are the least sensitive to possible inaccuracies in calculation procedure. **Practical significance:** Values of lifetimes of levels $4f^{13}5p^66p$ in W VII spectrum, that are absent in contemporary databases at the moment, are practically significant.

Keywords: Intermediate coupling, configuration superposition, semiempirical method, isoelectric row of erbium, level lifetimes.

References

1. Loginov A. V., Radiatsionnye konstanty v spektre iona W VII [Radiation constants in the spectrum of the W VII ion]. *Optika i spektroskopiya* [Optics and Spectroscopy]. 2020, V. 128, I. 8. 1074 p. (in Russian)
2. Kramida A. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.3) / A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader and NIST ASD Team. Available at: <http://physics.nist.gov/asd>.
3. Lapshin V. F. Radiative heat transfer in plasma of pulsed high pressure cesium discharge / V. F. Lapshin // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016, V. 669. 012035 p.
4. Anisimova G. P. Veroyatnosti elektricheskikh dipol'nykh perekhodov v spektrakh ionov izoelektronnogo ryada erbiya [Probabilities of electric dipole transitions in the spectra of ions of the isoelectronic series of erbium]. *Optika i spektroskopiya* [Optics and Spectroscopy]. 2000, V. 90, I. 3. 184 p. (in Russian)
5. Loginov A. V. Radiatsionnye konstanty v spektre ionov izoelektronnogo ryada erbiya [Radiation constants in the spectrum of ions of the isoelectronic series of erbium]. *Optika i spektroskopiya* [Optics and Spectroscopy]. 2001, V. 90, I. 5. 709 p. (in Russian)
6. Cowan R. D. The Theory of Atomic Structure and Spectra / R. D. Cowan. Berkeley: University of California Press, 1981.
7. Wybourne B. G. Spectroscopic Properties of the Rare Earths / B. G. Wybourne. N. Y.: Wiley, 1965, 236 p.
8. Yutsis A. P. *Matematicheskii apparat teorii momenta kolichestva dvizheniya* [Mathematical apparatus of the theory of angular momentum]. Vil'nyus, 1960. 243 p. (in Russian)
9. Petrashen' M. I. *Primenenie teorii grupp v kvantovoy mekhanike* [Application of group theory in quantum mechanics]. Moscow: Nauka Publ., 1967. 308 p. (in Russian)
10. Beyman B. F. *Lektsii po primeneniyu teorii grupp v yadernoy spektroskopii* [Lectures on the application of group theory in nuclear spectroscopy]. Moscow: GIFML Publ., 1961. 226 p. (in Russian)
11. Sugar J. Seventh spectrum of tungsten (W VII); resonance lines of Hf V / J. Sugar, V. Kaufman // *Physical Review A*. 1975, V. 12, I. 3. 994 p.

Received: February 6, 2022

Accepted: February 21, 2022

Author's information:

Andrey V. LOGINOV — D. Sci. in Physics and Mathematics, Professor; andrlgnv@yandex.ru

УДК 624.139

Морозное пучение и его влияние на распорную систему ограждающих конструкций глубоких котлованов

С. В. Метелкин, В. Н. Парамонов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Метелкин С. В., Парамонов В. Н. Морозное пучение и его влияние на распорную систему ограждающих конструкций глубоких котлованов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 133–142. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-133-142

Аннотация

Цель: Исследование взаимодействия конструкций ограждения котлована и массива грунта в период отрицательных температур. **Методы:** Проведение натурных измерений на действующей площадке строительства и численного моделирования. Получены данные о напряженно-деформированном состоянии системы «ограждение котлована — массив грунта»; выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов; по результатам анализа сформулировано предложение об учете дополнительных усилий от морозного пучения в системе «ограждение котлована — массив грунта».

Результаты: Установлено, что величина сил морозного пучения может быть значительной, что говорит о необходимости учета при проектировании раскрепленных ограждений котлованов. По полученной расчетной оценке действующих на ограждения сил морозного пучения следует, что необходимо учитывать не только глубину промерзания грунта, но и значения отрицательных температур, при которых усилия в конструкциях ограждения котлована могут достигать максимумов. **Практическая значимость:** При сравнении экспериментальных данных и результатов расчета подпорных стенок определены факторы, без учета которых возможна потеря несущей способности отдельных элементов распорной системы. Также получены подробные данные о совместной работе ограждения и грунтового массива на действующей строительной площадке в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга.

Ключевые слова: Морозное пучение, ограждение котлована, распорная система, натурный эксперимент, численное моделирование.

Введение

В настоящее время освоение подземного пространства в крупных городах идет полным ходом, а значит, устройство ограждающих конструкций для разработки глубоких котлованов неизбежно. Хотя современные разработки позволяют облегчить устройство ограждающих конструкций глубоких котлованов, все же есть условия, при которых это сделать крайне затруднительно.

Одним из таких условий являются геологические условия конкретного участка. Например, по

Санкт-Петербургу грунты в верхней части геологического разреза в основном представлены мощной толщей слабых глинистых грунтов текучей и текучепластичной консистенции. Данный тип грунтов обладает низкой прочностью и является пучинистым, что вызывает развитие значительного давления на ограждающие конструкции подземных сооружений в период отрицательных температур.

Современное строительство часто ведется в условиях существующей окружающей застройки.

Поэтому проектные решения по устройству подземных сооружений в зоне примыкания к существующим сооружениям должны учитывать следующие факторы риска, которые могут привести к сверхнормативным деформациям окружающей застройки:

1. Технология устройства ограждения котлована.
2. Изменение уровня подземных вод.
3. Деформации ограждения от статических нагрузок (от давления грунта, примыкающих зданий).

Одним из наиболее существенных факторов риска являются работа ограждения при вскрытии котлована и работы тяжелой техники на краю котлованов для обеспечения нужд строительного процесса.

Строительный цикл возведения крупных жилых комплексов, общественно-деловых центров с развитой инфраструктурой, как правило, занимает не один год. А это означает, что производство работ «нулевого цикла» (устройство подземной части) на вскрытых котлованах может производиться в условиях отрицательных температур в течение длительного периода (более 3 месяцев).

Таким образом, возникает третий фактор риска — изменение статических условий работы ограждения котлована в период отрицательных температур.

В регионах с отрицательными зимними температурами котлованы и стены подземных сооружений подвергаются дополнительным усилиям, вызванным силами морозного пучения. Известны случаи воздействия морозных сил на распорки, на анкеры ограждений, на фундаментные плиты и вертикальные конструкции подвальной части здания [1], а также угловые подпорные стенки шлюзов, приводившие к потере устойчивости и выходу их из строя. Информация о явлениях, сопровождающих промерзание и оттаивание грунтов, и путях существующих оценок раз-

вивающихся при этом деформаций детально изложена в монографиях Н. А. Цытовича (1973), В. О. Орлова (1962) и других. Также исследованиям воздействия сил морозного пучения как в лабораторных, так и в полевых условиях посвящен ряд работ [2–5]. Такие примеры приведены на рис. 1.

По результатам изучения научно-технической литературы можно сделать вывод о том, что при подборе ограждающих конструкций котлованов в зимнее время очень важно учитывать действие дополнительных усилий, которые появляются от морозного пучения, а также принимать во внимание тот факт, что эти усилия могут расти со временем.

При проведении полевых экспериментов на разработанном глубоком котловане становится очевидным, что при определенных условиях усилия в распорных системах могут существенно превышать их значения, определенные при учете только активного давления грунта. При этом в некоторых случаях, в зависимости от значений коэффициента анизотропии морозного пучения грунта, усилия в распорках могут изменять знаки на противоположные, то есть вместо усилий сжатия в распорках могут возникать и растягивающие усилия [6].

Существующие экспериментальные определения усилий в элементах ограждения котлованов исчисляются единицами — А. В. Мельников [7], Ю. М. Гуткин [8].

Для выявления и фиксации сил морозного пучения, а также для анализа усилий в распорных элементах ограждающих конструкций глубоких котлованов в зимнее время были выполнены экспериментальные исследования.

Кроме этого, была выполнена расчетная оценка температурных полей и напряженно-деформированного состояния с помощью программы Termoground с описанием формульной основы и алгоритма расчета.

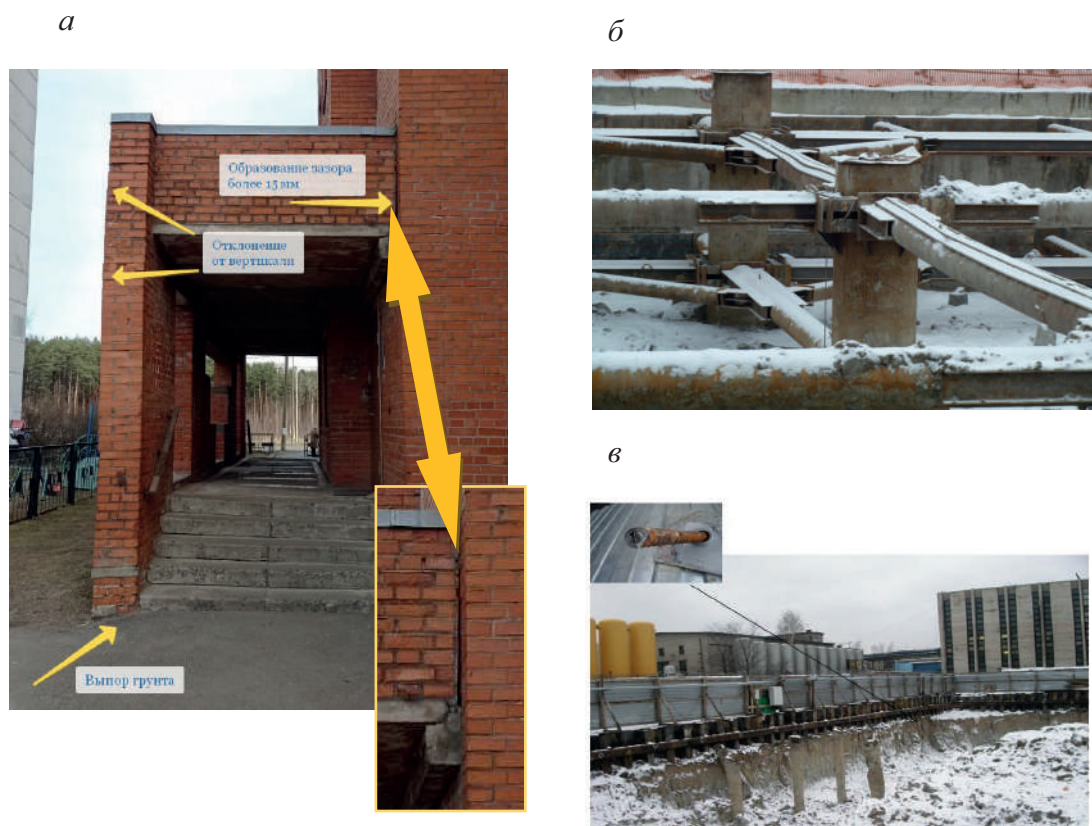


Рис. 1. Влияние сил морозного пучения:
а — деформация входной группы; *б* — деформация распорных конструкций;
в — срыв анкера шпунтового ограждения

Забегая вперед, стоит отметить, что полученные результаты экспериментальных и расчетных данных позволяют утверждать, что учет дополнительных усилий в элементах ограждений котлованов, вызванных морозным пучением грунтов, крайне необходим. Это позволит избежать негативных последствий влияния сил морозного пучения и запроектировать надежное ограждение.

Описание экспериментальной площадки

Площадка находится в г. Санкт-Петербурге, на Петроградской стороне, на углу Аптекарского пр. и Инструментальной улицы.

Участок граничит с участком и зданиями СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Здания университета построены в разные годы, имели различное историческое значение.

В зоне влияния строящегося объекта находится ряд объектов культурного наследия и несколько жилых и административных зданий.

Строится жилой дом с подземным гаражом: 9-этажное здание + 2 подземных этажа. Глубина котлована наблюдаемой части равна ~8,0 м. Длина шпунта — 12 м. Распорная система представляет собой одноярусную систему распорок. Распорки установлены на отметке «–0,750» («+2,200» абс.). Ниже дна котлована превентивно выполнено закрепление 2-метрового слоя грунта по технологии Jet-grouting.

Измерение усилий в распорной системе было организовано посредством струнных тензодатчиков, устанавливаемых на поверхности распорок дуговой сваркой, в комплекте с термистором, измерительный диапазон — 3000 микрострейн.

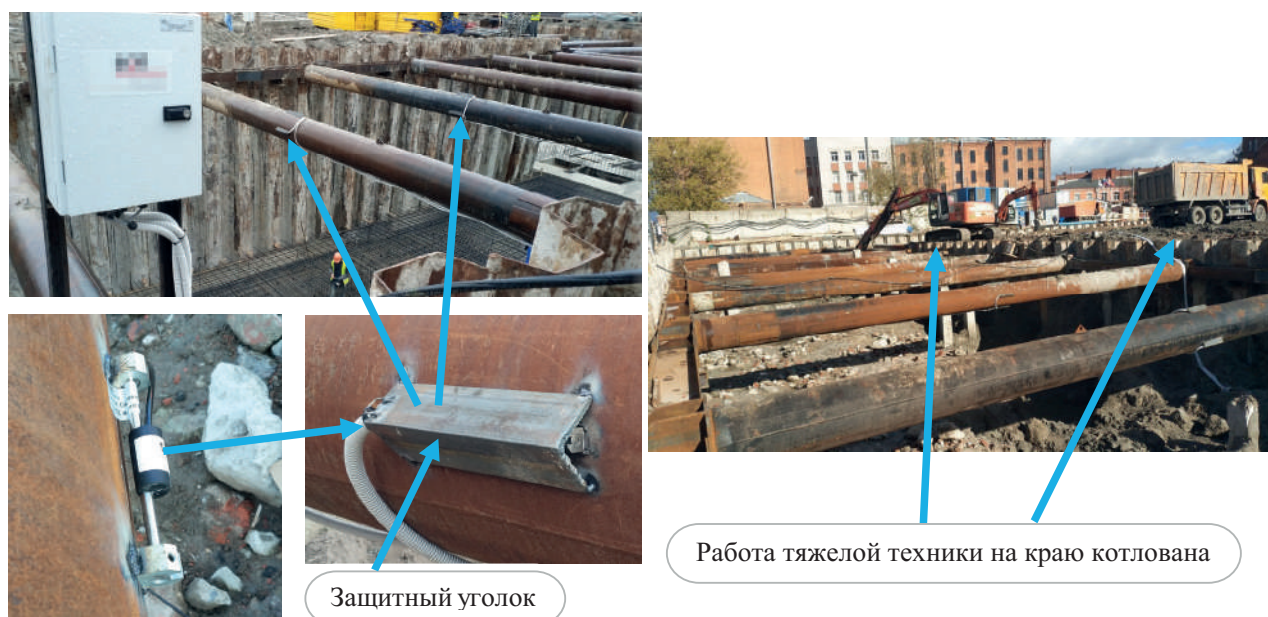


Рис. 2. Вид котлована с распорками и смонтированного датчика

Внешние усилия сжатия или растяжения, которые прикладываются к распорной системе, изменяют натяжение и, соответственно, резонансную частоту колебаний струны внутри датчика. Данные изменения регистрируются с помощью электромагнитной катушки, прикрепленной к корпусу тензометра. Наличие встроенного термистора позволяет выделять температурные напряжения конструкции от напряжений, вызванных силовыми нагрузками.

Распорная система на рассматриваемом участке представляет собой распределительную балку (двутавр 50 Ш 1) и распорки из металлических труб (530×7).

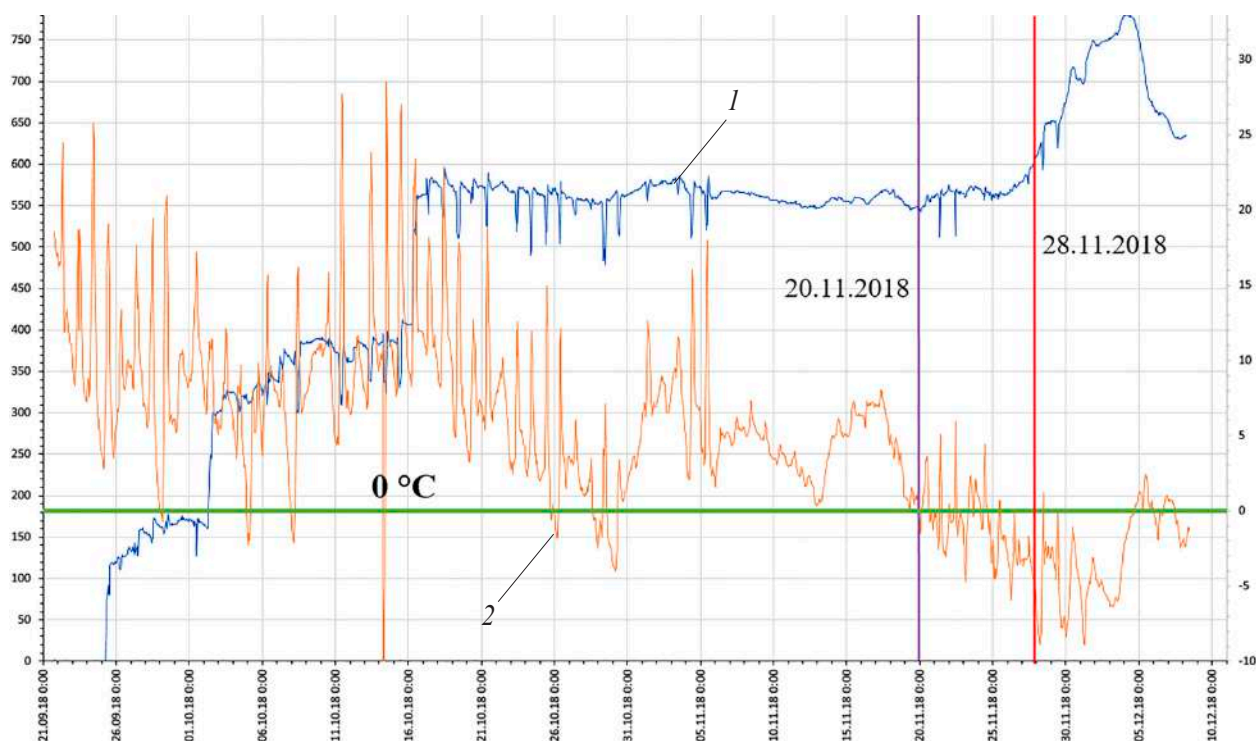
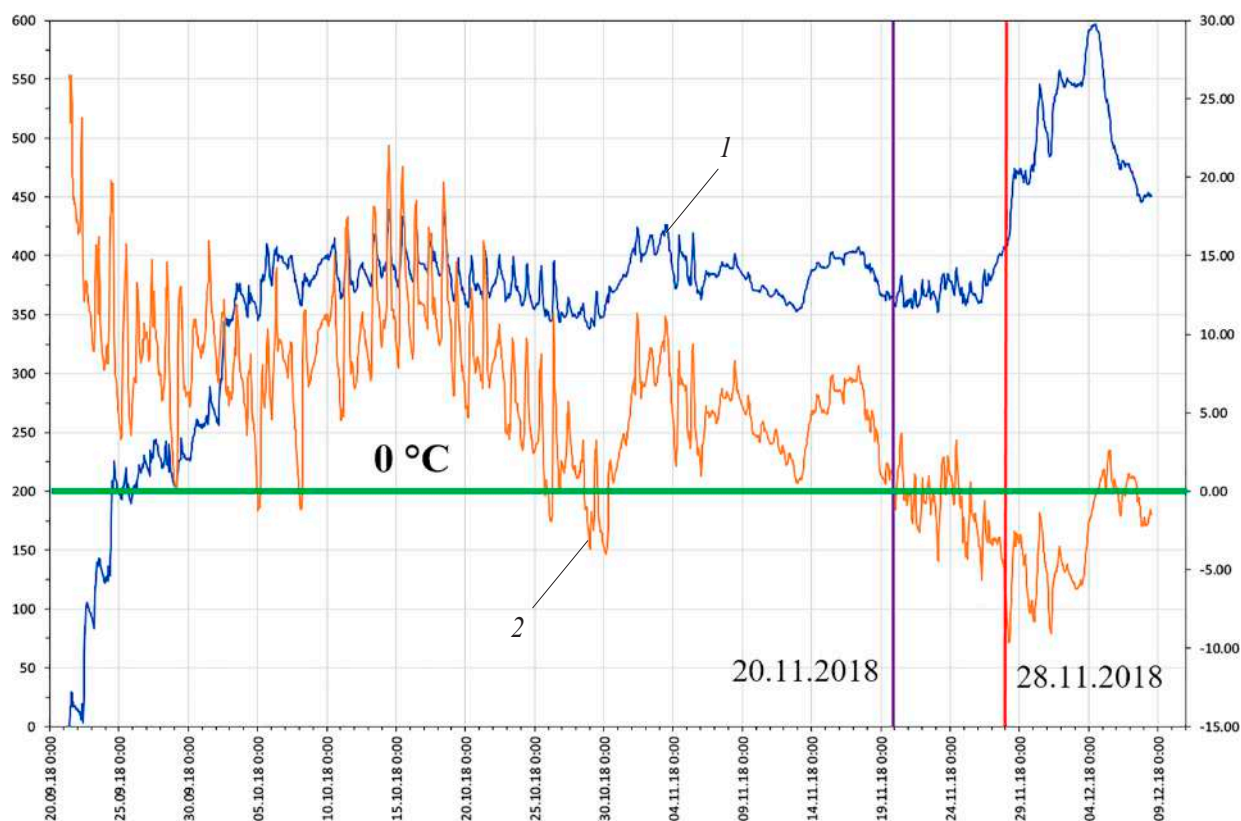
Распорная система устанавливалась после погружения в полном объеме шпунтового ограждения (из шпунтовых свай корытного типа, EVRAZ VITCOVICE STEEL, S 355 GP, VL 606A).

На распорки котлована в шпунтовом ограждении были установлены тензометрические датчики (32 шт.), измеряющие и фиксирующие изменяющиеся усилия в распорке, а также температурные датчики (32 шт.) для измерения и фиксации температуры наружного воздуха. Дат-

чики были установлены по периметру поперечного сечения распорки, что позволяло определять как растянутые, так и сжатые зоны. Периодичность снятия и фиксации данных в течение зимы 2018–2019 гг. составляла 1 час. Таким образом, за каждый час выполнялось более 80 измерений. Вид котлована с распорками и смонтированного датчика показан на рис. 2.

Инженерно-геологические условия площадки с поверхности представлены насыпными грунтами мощностью около 2 м, подстилаемыми песками пылеватыми толщиной 1,7 м. Ниже на всю глубину изысканий устройства шпунтового ограждения залегают текучие суглинки. Грунтовые воды к началу промерзания залежали на глубине 2 м от дневной поверхности. Таким образом, за исключением практически непучинистых насыпных грунтов, шпунтовые стены котлована с глубины от 2 до 8 метров контактируют с пучинистыми (пылеватые пески) и сильнопучинистыми (текучие суглинки) грунтами.

Результаты измерений температуры и усилий в одной из распорок котлована в начале зимнего периода показаны на рис. 3 и 4.

Рис. 3. Динамика роста усилий (I) от температуры (2) в распорке № 5 с течением времениРис. 4. Динамика роста усилий (I) от температуры (2) в распорке № 9 с течением времени

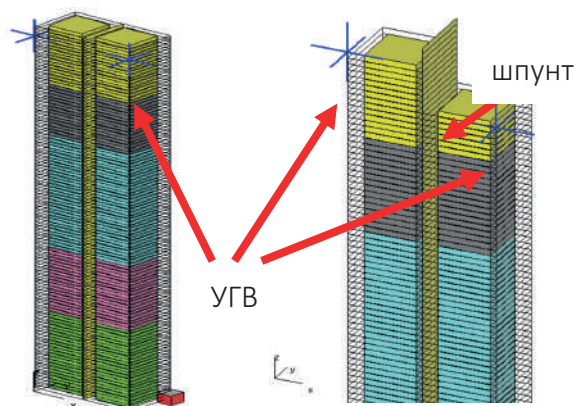


Рис. 5. Расчетная схема задачи

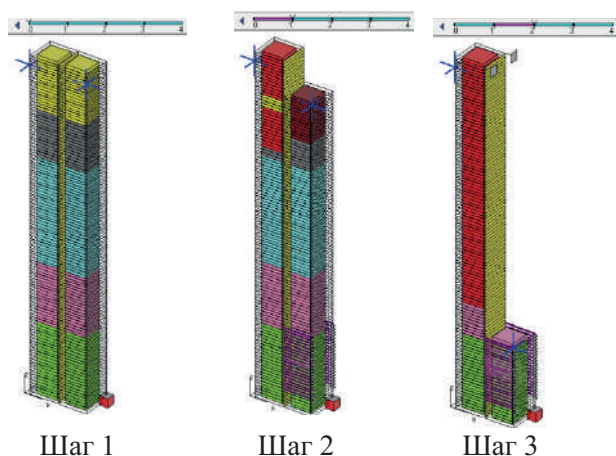


Рис. 6. Пошаговое решение задачи

По результатам наблюдений и обработки получаемых данных на протяжении всего эксперимента можно отметить, что откопка котлована резко не повлияла на изменение нагрузки в распорках — изменения были равномерные на протяжении всего периода наблюдения при положительных температурах воздуха, 204–383 кН (30 тонн), средний шаг прироста составляет 10–15 кН (1,5 тонны). Однако при наступлении периода отрицательных температур, когда открытые стенки глубокого котлована промерзли, датчики зафиксировали дополнительный, ускоренный прирост усилий в распорках. Как видно из графиков (рис. 3, 4), при наступле-

нии с 20 ноября 2018 г. устойчивого «минуса» грунт получил достаточное промерзание и с 28 ноября 2018 г. наблюдаются значительные изменения нагрузки.

Усилия в отдельных распорках составили от 418 кН до 780 кН (от 42 до 78 тонн), средний шаг прироста составляет 30–40 кН (3,5 тонны). Максимальное значение усилий в распорке в период отрицательных температур составило 78 тонн.

Для сравнения: от давления массива грунта при положительных температурах при полностью разработанном котловане и производимых строительно-монтажных работах (в том числе от работы тяжелой техники на краю котлована) — прирост составил с 360 кН до 385 кН, средний шаг прироста 20 кН (2 тонны). Максимальное усилие составило 39 тонн.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что от сил морозного пучения, при многостороннем промерзании котлована, прирост нагрузки (усилия) на распорку удвоился. Такое увеличение следует считать значительным и требующим учета в практике проектирования.

Полуаналитическое решение задачи

Следующим этапом был расчет ограждения котлована полуаналитическим методом. В расчете выполнялась оценка усилий в ограждении и распорной системе, а также горизонтальных смещений щпунта до наступления отрицательных температур. Расчетная схема задачи представлена на рис. 5.

Расчетная схема представляет два «столба» — массива грунтов с коэффициентом постели по Шмитту. Синими «крестиками» отмечен уровень грунтовых вод на первом «шаге» расчетов. Между «столбами» показана пластина, которая моделирует металлическое шпунтовое ограждение (VL606A).

Методика расчета учитывает этапность производства работ (рис. 6):

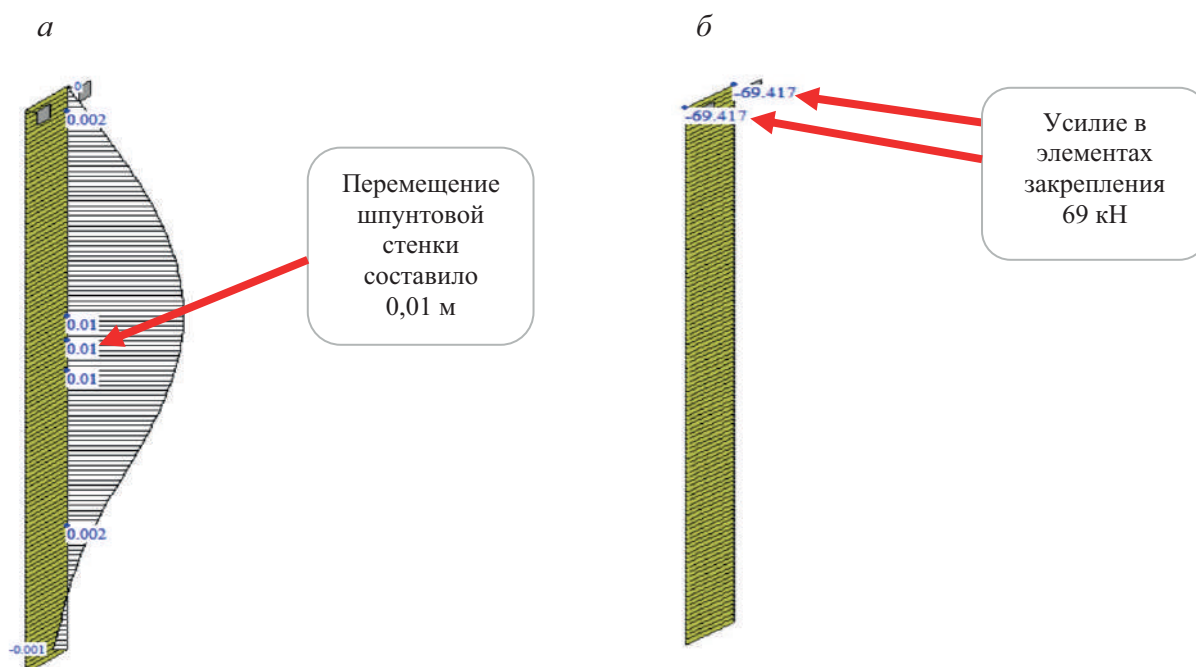


Рис. 7. Результаты расчетов модели:
 а — эпюра горизонтального перемещения; б — усилия в распорных элементах

На «шаге 1» показана расчетная ситуация, при которой на строительной площадке выполнены работы по погружению шпунтового ограждения.

На «шаге 2» выполнена откопка грунта на глубину 1 м для установки распорной системы и включение в работу плиты из грунтоцемента на глубине 9–11 м, выполненной по технологии jet-grouting.

Далее на «шаге 3» осуществлена откопка котлована до проектной глубины (котлован глубиной 8 м) при уже установленных распорных элементах. Синим крестиком справа внизу показан пониженный уровень грунтовых вод.

Результаты расчетов приведены в виде эпюры горизонтальных смещений шпунтового ограждения на рис. 7. Подписаны значения усилий в распорках.

Как видно из представленных материалов, горизонтальное перемещение металлического шпунтового ограждения при полном вскрытии (до проектной отметки) составило 1 см, а максимальные усилия в распорных элементах:

$$69,417 \text{ кН} \cdot 2 \cdot 4,8 \text{ м} = 66,6 \text{ т.}$$

Согласно данным, полученным экспериментальным путем, среднее максимальное значение в распорной системе составило 60 т.

Решение температурной задачи в программе Termoground

Как видно из приведенной выше информации, в течение всего времени действия отрицательных температур происходило значительное увеличение усилий, а значит, их необходимо учитывать при разработке грунта и устройстве подземной части в период отрицательных температур.

Для оценки усилий в распорной системе на момент окончания действия отрицательных температур в программе Termoground были выполнены температурные и деформационные расчеты.

На рис. 8 показан фрагмент расчетной схемы с зоной промерзания, выделенной голубым цветом. В верхнем углу котлована мощность мерзлого грунта, ввиду двумерности промерзания, почти в два раза превосходит мощность промерзшего

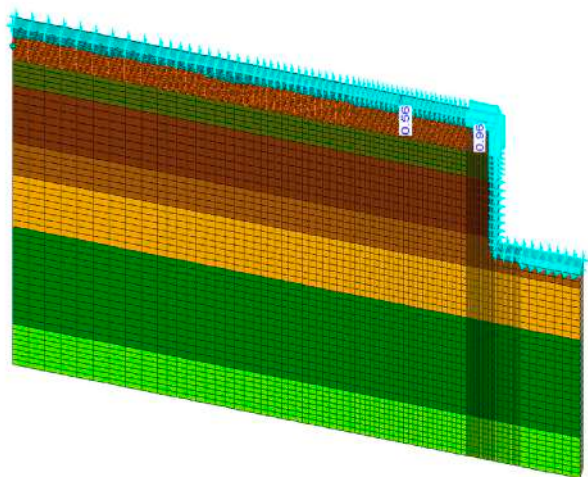


Рис. 8. Фрагмент расчетной схемы с зоной промерзания (толщина мерзлого грунта, м)

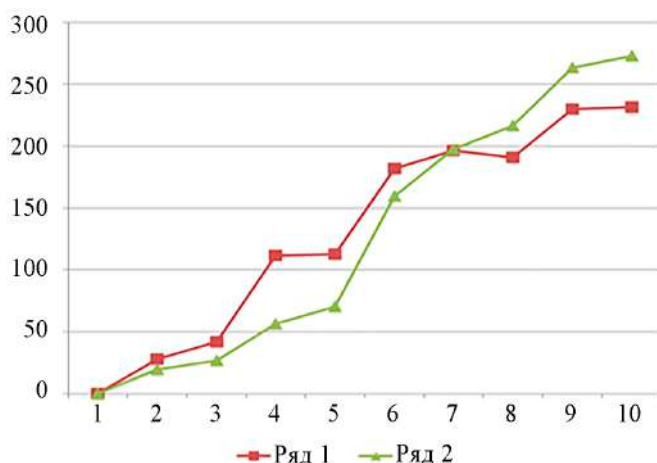


Рис. 9. График эволюции экспериментально замеренных (ряд 1) и рассчитанных (ряд 2) приращений усилий в распорке, вызванных действием морозного пучения

слоя вблизи шпунтовой стенки, составляющей 0,56 м, что следует считать закономерным.

На рис. 9 приведены расчетный и экспериментальный графики зависимости приращения усилия в распорке от времени в период отрицательных температур. Учитывая, что сравнение осуществляется с натурными условиями, для которых характерен естественный разброс характеристик грунта, можно считать, что результаты рас-

чета очень близки к реальным наблюдениям. Это позволяет использовать программу Termoground для оценки усилий в элементах ограждений котлованов, подверженных морозному пучению.

Выводы

1. Силы морозного пучения начинают действовать на элементы ограждения котлована практически сразу после начала промерзания грунта.

2. Величина сил морозного пучения может быть значительной, что говорит о безусловной необходимости ее учета при проектировании, а также о необходимости дальнейшего глубочайшего исследования (в том числе на новых экспериментальных площадках Санкт-Петербурга).

3. С переходом температур наружного воздуха в область положительных значений силы морозного пучения синхронно уменьшаются, не падая, однако, до нулевых значений.

4. При расчетной оценке действующих на ограждения сил морозного пучения следует учитывать не только глубину промерзания грунта, но и значения отрицательных температур, при которых значения сил могут достигать максимумов.

Библиографический список

1. Алексеев А. Г. Промерзание грунта в основании фундаментной плиты многоэтажного здания и его последствия / А. Г. Алексеев // Промышленное и гражданское строительство. — 2018. — № 4. — С. 37–43.
2. Каменских Е. М. Пример силового воздействия морозного пучения на ограждение котлована под свайные фундаменты копра скипового ствола / Е. М. Каменских, Б. С. Юшков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. — 2014. — Т. 1. — С. 417–420.
3. Самарин В. Ф. Влияние морозного пучения на вертикальные подпорные стенки / В. Ф. Самарин, О. Г. Козловский // Речной транспорт (XXI век). — 2009. — № 7. — С. 84–86.
4. Орлов В. О. Метод оценки давления морозного пучения на ледогрунтовое ограждение подземного соору-

жения / В. О. Орлов, В. Х. Ким // ОФМГ. — 1988. — № 3. — С. 25–28.

5. Парамонов В. Н. Процессы промерзания и оттаивания при устройстве подземных и заглубленных сооружений / В. Н. Парамонов, И. И. Сахаров, М. В. Парамонов // Жилищное строительство. — 2012. — № 9. — С. 21–25.

6. Гречищев С. Е. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз / С. Е. Гречищев, Л. В. Чистотин, Ю. Л. Шур. — М.: Недра, 1980. — 382 с.

7. Мельников А. В. Лабораторные исследования вертикальных и горизонтальных сил и деформации морозного пучения глинистого грунта / А. В. Мельников // Вестник гражданских инженеров. — 2012. — № 2. — С. 126–131.

8. Гуткин Ю. М. О горизонтальном давлении морозного пучения глинистых грунтов на ограждающие конструкции конечной жесткости / Ю. М. Гуткин // ОФМГ. — 2014. — № 1. — С. 27–31.

Дата поступления: 14.02.2022

Решение о публикации: 02.03.2022

Контактная информация:

МЕТЕЛКИН Сергей Вячеславович — аспирант;
s.metelkin@bk.ru

ПАРАМОНОВ Владимир Николаевич — д-р техн. наук,
доцент; parvn@georec.spb.ru

Frost Heave and Its Influence on Spacer System of Enclosing Constructions of Deep Ditches

S. V. Metelkin, V. N. Paramonov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Metelkin S. V., Paramonov V. N. Frost Heave and Its Influence on Spacer System of Enclosing Constructions of Deep Ditches // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 133–142. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-133-142

Summary

Purpose: Research of interaction between ditch fencing constructions and ground massive in negative temperature period. **Methods:** Pursuing nature measurements on active construction site and numerical modeling. Data on stress-strain state of “ditch fencing-ground massive” system were obtained; the comparison of experimental data with calculation results were made; the proposal on accounting for additional efforts against frost heave in the system “ditch fencing-ground massive” was formulated. **Results:** It was established that magnitude of forces of frost heave can be significant that says on the necessity to consider them while engineering of unfastened ditch fencings. It follows according to obtained calculation estimation of frost heave forces effecting fencings that it's necessary not just to take into account a ground freezing depth but also negative temperature values which at efforts in ditch fencing constructions can reach the maximum. **Practical importance:** At comparison of experimental data with retaining wall calculation results, the factors are determined which out of, the loss of bearing capability of spacer system particular elements is possible. There're also obtained the detailed data on joint work of fencing and ground massive at active construction site in geotechnical conditions of Saint-Petersburg.

Keywords: Frost heave, ditch fencing, spacer system, nature experiment, numerical modelling.

References

1. Alekseev A. G. Promerzanie grunta v osnovanii fundamentnoy plity mnogoetazhnogo zdaniya i ego posledstviya [Soil freezing at the base of the foundation slab of a multi-storey building and its consequences]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2018, I. 4, pp. 37–43. (in Russian)
2. Kamenskikh E. M. Primer silovogo vozdeystviya moroznogo pucheniya na ograzhdenie kotlovana pod svaynye fundamenty kopra skipovogo stvola [An example of the force impact of frost heaving on the fencing of a pit for pile foundations of a skip shaft pile driver]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and scientific research in the transport complex]. 2014, V. 1, pp. 417–420. (in Russian)
3. Samarin V. F. Vliyanie moroznogo pucheniya na vertikal'nye podpornye stenki [Influence of frost heaving on vertical retaining walls]. *Rechnoy transport (KhKhI vek)* [River transport (XXI century)]. 2009, I. 7, pp. 84–86. (in Russian)
4. Orlov V. O. Metod otsenki davleniya moroznogo pucheniya na ledogruntovoe ograzhdenie podzemnogo sooruzheniya [Method for assessing the pressure of frost heaving on the ice-ground enclosure of an underground structure]. *OFMG* [OFMG]. 1988, I. 3, pp. 25–28. (in Russian)
5. Paramonov V. N. Protsessy promerzaniya i ottaivaniya pri ustroystve podzemnykh i zaglublennykh sooruzheniy [Processes of freezing and thawing in the construction of underground and buried structures]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [housing construction]. 2012, I. 9, pp. 21–25. (in Russian)
6. Grechishchev S. E. *Kriogennye fiziko-geologicheskie protsessy i ikh prognoz* [Cryogenic physical-geological processes and their forecast]. Moscow: Nedra Publ., 1980. 382 p. (in Russian)
7. Mel'nikov A. V. Laboratornye issledovaniya vertikal'nykh i gorizonta'nykh sil i deformatsii moroznogo pucheniya glinistogo grunta [Laboratory studies of vertical and horizontal forces and deformation of frost heaving of clay soil]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Vestnik grazhdanskikh inzhenerov]. 2012, I. 2, pp. 126–131. (in Russian)
8. Gutkin Yu. M. O gorizonta'nom davlenii moroznogo pucheniya glinistyykh gruntov na ograzhdayushchie konstruktii konechnoy zhestkosti [On the horizontal pressure of frost heaving of clay soils on enclosing structures of finite rigidity]. *OFMG* [OFMG]. 2014, I. 1, pp. 27–31. (in Russian)

Received: February 14, 2022

Accepted: March 2, 2022

Author's information:

Sergey V. METELKIN — PhD Postgraduate Student;
s.metelkin@bk.ru

Vladimir N. PARAMONOV — D. Sci. in Engineering,
Associate Professor; parvn@georec.spb.ru

УДК 656.2

Специфика безопасности движения на железнодорожных переездах

В. В. Шматченко, Ю. Я. Меремсон, В. Г. Иванов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шматченко В. В., Меремсон Ю. Я., Иванов В. Г. Специфика безопасности движения на железнодорожных переездах // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 143–154. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-143-154

Аннотация

Цель: Рассмотреть состояние безопасности на железных дорогах мира и стран Европейского союза (ЕС) за период 1990–2020 гг., при этом уделить особое внимание безопасности на железнодорожных переездах. В качестве одного из источников для оценки этого состояния использовалась информация из Википедии, и поскольку неизвестно, является ли эта информация репрезентативной выборкой, то в качестве другого источника рассматривались более точные данные из официальной базы данных ERADIS, в которой собирается полная информация по безопасности на железных дорогах стран ЕС. **Методы:** Мерой состояния безопасности были годовые оценки абсолютных значений аварийности, связанные с этими авариями материальный ущерб и ущерб жизни и здоровью людей. В этой связи рассматривались только аварии с пассажирскими поездами. Определялись также причины аварии — ошибка человека или технический отказ, причем случаи саботажа, вандализма и терроризма не учитывались, поскольку относятся к транспортной безопасности, а не к безопасности движения. Собранный таким образом материал может быть дифференцирован и проанализирован по странам ЕС, по видам аварий — сходы, столкновения на пути, столкновения на железнодорожных переездах, наезды на людей, возгорания в поездах; по причинам аварий — ошибки человека или технические отказы; по последствиям аварий — материальный ущерб или ущерб жизни и здоровью людей. **Результаты:** Интегральные оценки по годам показывают рост аварийности на железных дорогах. Для стран ЕС этот рост замедляется, но если рассматривать временные периоды от 4 лет и более, то аварийность сохраняет четкую тенденцию к росту. Основной причиной аварий являются ошибки человека, особенно на железнодорожных переездах. **Практическая значимость:** Проведенный анализ показывает необходимость дальнейшего применения автоматизации и систем менеджмента безопасности для повышения гарантоспособности железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: Авария, сход, столкновение поездов, столкновение на железнодорожных переездах, транспортная безопасность, отказ, ущерб.

Введение

В настоящей статье рассмотрена статистика аварийности для обычных пассажирских поездов на железных дорогах разных стран по данным, представленным в Википедии (без учета аварийности на железных дорогах Российской Федерации). Данными из Википедии можно пользоваться, понимая, что их представление в качестве репре-

зентативной выборки, скорее всего, не обосновано. Но тем не менее можно ожидать, что пропуски и искажения каких-либо данных, а также временные улучшения и ухудшения безопасности будут сглаживаться для многолетних периодов и общая тенденция изменения аварийности сохранится. Кроме того, далее в настоящей статье результаты, полученные в настоящем разделе, предполагается

сравнить с оценками на основе более точной статистики, содержащейся в отчетах национальных железнодорожных администраций стран ЕС. Эти отчеты размещены в ERADIS — базе данных аварий и происшествий на железных дорогах ЕС, которая ведется Европейским железнодорожным агентством (European Railway Agency — ERA) [1].

Анализ аварийности в условиях неполноты исходных данных

Статистика аварийности показывает увеличение числа аварий, которое выросло более чем в два раза, если сравнивать данные 1990-х и 2000-х гг. и соответственно, данные 2000-х и 2010-х гг. Были рассмотрены следующие три наиболее многочисленные группы таких аварий:

- сходы;
- столкновения поездов с объектами на пути (с другим подвижным составом, ограничительными буферами, путевыми машинами, потерянным грузом и т. п.);

– столкновения на железнодорожных переездах.

При этом аварии, относящиеся к транспортной безопасности (акты незаконного вмешательства, т. е. акты терроризма, вандализма, саботажа), не рассматривались.

За каждый год каждого из десятилетий по каждой аварии учитывалась следующая информация:

- причина аварии;
- количество погибших в каждой аварии;
- значения эквивалентной смертности (ЭС) для каждой аварии (1 ЭС = 10 тяжелораненых = 100 легкораненых).

Определялось полное количество аварий и по отдельности число сходов, столкновений на путях и столкновений на переездах.

Результаты этого анализа представлены в табл. 1–3.

В сводной табл. 4 представлены итоговые данные по количеству случаев гибели людей и эквивалентной смертности (т. е. с учетом тяже-

ТАБЛИЦА 1. Данные по авариям пассажирских поездов за 1990–1999 гг.

Характеристики		Годы										За 10 лет
		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	
Всего аварий		7	9	6	3	7	8	10	7	4	8	69
Технические отказы		1	3	2	0	2	3	2	2	0	2	17
Ошибки людей	Всего	6	6	4	3	5	5	8	5	4	6	52
	Сходы	2	2	1	2	2	0	3	0	4	1	17
	Столкновения на переездах	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	6
	Столкновения на путях	3	4	2	0	4	4	5	4	0	4	30
Погибли	Сходы	307	9	5	125	94	0	39	0	281	5	865
	Столкновения на переездах	0	10	0	6	12	124	26	7	72	17	63
	Столкновения на путях	36	150	56	0	21	455	75	19	0	330	1142
ЭС	Сходы	50,76	4,34	0,42	8,8	11,87	0	4,76	0	19,84	0,92	101,71
	Столкновения на переездах	1,13	0	0,99	0,6	0	0	0	1,51	0	3,37	7,6
	Столкновения на путях	4,16	7,11	4,19	0	3,55	47,25	11,62	7,10	0	59,5	144,48

ТАБЛИЦА 2. Данные по авариям пассажирских поездов за 2000–2009 гг.

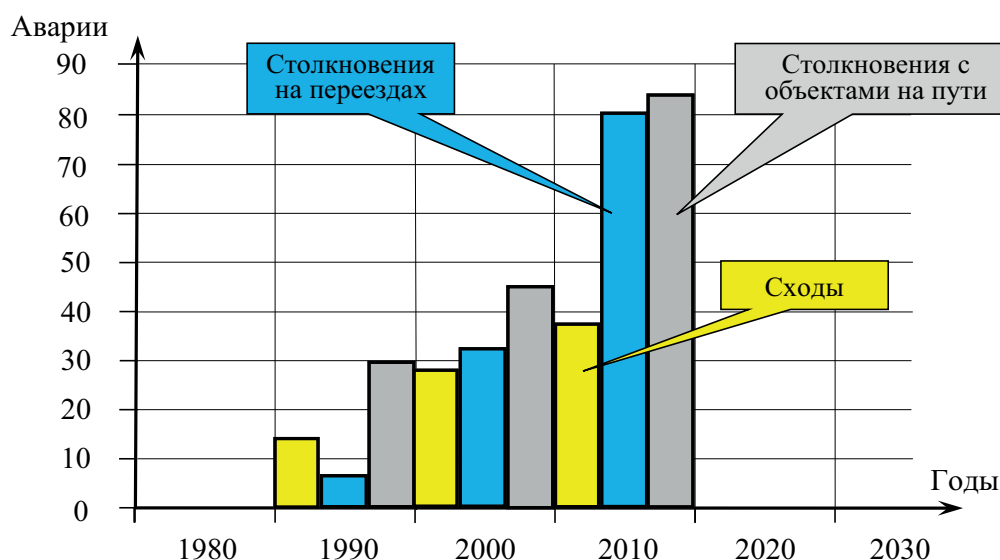
Характеристики		Годы										За 10 лет
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
Всего аварий		7	10	12	17	8	23	22	15	20	22	156
Технические отказы		1	2	1	3	2	6	5	5	6	10	41
Ошибки людей	Всего	6	8	11	14	6	17	17	10	14	12	115
	Сходы	2	4	6	3	2	3	3	3	2	1	29
	Столкновения на переездах	0	1	0	3	2	8	3	4	6	4	31
	Столкновения на путях	3	3	4	7	2	5	11	2	4	4	45
Погибло	Сходы	13	72	164	31	41	125	82	42	8	6	584
	Столкновения на переездах	0	10	0	6	12	124	26	7	72	17	274
	Столкновения на путях	66	48	290	72	27	46	83	8	30	44	714
ЭС	Сходы	4,66	8,49	15,55	5,69	1,36	29,35	4,06	4,68	1,73	1,72	77,29
	Столкновения на переездах	0	5,5	0	0,23	1,45	9,0	3,31	0,01	3,14	1,4	24,04
	Столкновения на путях	8,64	4,46	21,34	11,45	1,32	13,11	13,78	3,0	4,11	1,7	82,91

ТАБЛИЦА 3. Данные по авариям пассажирских поездов за 2010–2019 гг. (до 15 февраля 2019 г.)

Характеристики		Годы										За 10 лет
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
Всего аварий		42	21	32	30	22	29	42	36	22	6	282
Технические отказы		13	5	3	6	9	6	6	6	6	1	61
Ошибки людей	всего	29	16	29	25	13	23	36	30	16	5	222
	сходы	6	1	3	4	3	4	8	7	2	0	38
	столкновения на переездах	9	9	12	8	4	9	14	7	7	2	81
	столкновения на путях	8	6	14	13	6	11	15	15	7	3	98
Погибло	сходы	79	1	6	6	85	84	95	105	18	0	479
	столкновения на переездах	65	76	87	41	33	36	29	17	39	0	423
	столкновения на путях	141	5	106	41	12	2	116	54	79	13	569
ЭС	сходы	12,85	1,29	7,36	7,0	7,64	11,79	22,06	4,74	2,32	0	77,05
	столкновения на переездах	4,1	10,66	4,45	3,75	2,33	3,39	5,92	3,63	5,3	0,61	44,14
	столкновения на путях	15,42	14,18	22,22	10,97	4,76	4,28	23,16	14,69	16,11	9,84	135,6

ТАБЛИЦА 4. Динамика аварий с пассажирскими поездами по десятилетним периодам за 1990–2019 гг. (до 15 февраля 2019 г.)

Причина	1990–1999				2000–2009				2010–2019			
	Все-го	Погибло	Э. С.	Погибло + Э. С.	Все-го	Погибло	Э. С.	Погибло + Э. С.	Все-го	Погибло	Э. С.	Погибло + Э. С.
Сходы	17	865	101,71	966,71	29	584	77,29	661,29	38	479	77,05	556,05
Столкновения на переездах	6	63	7,6	70,6	31	274	24,04	298,04	80	423	44,14	467,14
Столкновения на путях	30	1142	144,48	1286,48	45	714	82,91	796,91	83	569	135,63	704,63
Итого	53	2070	253,79	2323,79	105	1572	184,24	1856,24	201	1471	256,82	1727,82



Аварии с пассажирскими поездами из-за ошибок человека — сходы, столкновения на переездах, столкновения с объектами на путях, распределенные по десятилетиям (1990–2019 гг.)

лых и легких травм) для аварий, рассмотренных в табл. 1–3.

На рисунке полученные результаты представлены в графическом виде.

Из графиков на рисунке видно, что и в каждом из наиболее многочисленных классов аварий имеет место та же тенденция увеличения их интенсивности на железных дорогах мира в течение последних 30 лет. При этом рост аварийности на переездах имеет наиболее крутой характер.

Анализ аварийности при обеспечении полноты исходных данных

В настоящем разделе рассматривается аварийность пассажирских поездов на железнодорожных переездах. Массив статистических данных для анализа взят из европейской базы данных ERADIS [1], в которую вводится информация по всем авариям и происшествиям на железных дорогах европейских стран и официальные отчеты по расследованию этих аварий и проис-

шествий. В этом массиве приведены данные с 2008 по 2019 г. включительно. Такой временной период выбран по следующим причинам:

- начиная с 2008 г. в ERADIS по унифицированной схеме стали предоставлять информацию об аварийности все страны — члены ЕС (кроме Турции);

- начиная с 2007 г. в странах ЕС на всех предприятиях, имеющих отношение к эксплуатации железнодорожного транспорта, стала вводиться система менеджмента безопасности движения (СМБД), и с 2010 г. каждое такое предприятие должно было иметь сертификат соответствия этой системе;

- начиная с 2000-х гг. на железных дорогах стран — членов ЕС начал применяться стандарт цифровой железнодорожной радиосвязи GSM-R, который, в частности, имел в своем составе функцию **RADIOSTOP** — функцию, в соответствии с которой поездной диспетчер экстренным вызовом мог остановить все поезда, движущиеся в зоне радиопокрытия определенной базовой станции, если в этой зоне возникла предаварийная обстановка.

Совокупное действие последних двух причин должно было бы повлечь снижение аварийности на железных дорогах ЕС вообще и в частности на железнодорожных переездах, и статистика 2010-х гг. должна была бы это показать.

Показатели анализа

Для каждой аварии и происшествия на основе официальных отчетов уполномоченного национального органа по расследованию аварий и происшествий на железнодорожной инфраструктуре рассматривались:

- время и место аварии или происшествия;
- первичная причина аварии или происшествия — технический отказ или ошибка человека, решение об этом принималось на основе официальных отчетов;

- оценка материального ущерба;

- количество людей, погибших и получивших тяжелые и легкие травмы во время аварии, для людей, получивших травмы, определялся показатель эквивалентной смертности (ЭС), для чего использовалось следующее выражение:

$$1 \text{ ЭС} = 10 \text{ ТТ} = 100 \text{ ЛТ},$$

где ТТ и ЛТ — тяжелые и легкие травмы соответственно.

Процесс анализа

Процесс анализа представляет собой совокупность следующих действий:

1. Для каждой страны и для каждого года в интервале 2008–2019 гг. по данным базы данных ERADIS [1] определяются указанные выше показатели аварий и происшествий и сводятся в таблицу, пример которой представлен ниже для Германии 2015 г. (табл. 5). Из нее видно, что на железных дорогах Германии в 2015 г. произошло 15 аварий, из которых 4, т. е. четверть всех аварий, — столкновения с легковыми автомобилями на железнодорожных переездах. При этом погибли 2 человека (из трех, погибших на железных дорогах Германии в этом году), ранены 6 человек (из 56, раненых в этом году). Все погибшие и раненые на переездах находились в автомобилях, в поездах никто не пострадал. При этом материальный ущерб подвижному составу и путевой инфраструктуре относительно невелик и в каждом из трех случаев не превышает границы 150 000 евро, ниже которой материальный ущерб в системе ERADIS считается незначительным (соответственно, средний ущерб — это ущерб между 150 000 и 2 000 000 евро, а значительный — более 2 000 000 евро). В целом это — типовая картина аварийности на переездах при столкновении с легковыми автомобилями: ущерб железной дороге незна-

чительный, а смертность пассажиров в автомобилях высокая.

Для каждого года в интервале 2008–2019 гг. заполнена 21 такая таблица по основным странам — членам ЕС, в качестве которых выбраны: Австрия, Бельгия, Болгария, Хорватия, Словения, Словакия, Чехия, Дания, Эстония, Финляндия, Франция, Германия, Венгрия, Италия, Ирландия, Норвегия, Польша. Португалия, Румыния, Испания, Великобритания.

2. Информация, содержащаяся в таблицах, полученных при выполнении п. 1, вводится в сводную таблицу, отражающую состояние аварийности на железных дорогах рассматриваемых стран ЕС в течение данного года. Пример такой сводной таблицы для 2015 г. представлен ниже в табл. 6.

Эта таблица состоит из 4 основных частей:

Колонки 1–4 содержат общее количество аварий и происшествий и отдельно — аварии и происшествия из-за ошибок людей и из-за техни-

ческих отказов в той или иной стране за 2015 г. (данные по Болгарии, Хорватии, Словении и Словакии были объединены в одной строке для удобства обработки).

В колонках 5–10 представлены последствия аварий и происшествий с пассажирскими поездами, обусловленных ошибками людей, выраженные, соответственно, числом погибших, раненых, эквивалентной смертностью и материальным ущербом, материальный ущерб выражен числом аварий и происшествий в диапазонах менее 150 000 евро, между 150 000 и 2 000 000 евро и более 2 000 000 евро (в соответствии с практикой, принятой в ERADIS).

В колонках 11–16 то же самое представлено для аварий и происшествий с пассажирскими поездами, вызванных техническими отказами.

В нижней строке просуммированы результаты, полученные в соответствующей колонке по каждой стране.

ТАБЛИЦА 5. Аварии и происшествия с пассажирскими поездами в Германии в 2015 г.

№	Описание	Дата	Погибли	Ранены	ЭС	Причина	Ущерб
1	Столкновение пассажирского поезда с легковым автомобилем на железнодорожном переезде. Водитель автомобиля выехал на переезд, несмотря на запрещающие сигналы автоматики переезда	28.02	1	1	0,01	Ошибка человека 1	Меньше 150 000 €
2	Сход с рельсов пассажирского поезда на стрелке из-за ошибки диспетчера при установке маршрута	11.04	0	2	0,02	Ошибка человека 2	150 000 — 2 000 000 €
3	Столкновение пустого пассажирского поезда с экскаватором на платформе с дрезиной. Поезд сошел с рельсов тремя тележками, лобовая часть с правой верхней стороны получила большие пробоины, обшивка с правой стороны вагонов вспорота, машинист поезда получил серьезные травмы. Платформа с экскаватором и дрезина тоже сошли с рельсов и снесли шумозащитное ограждение. Причиной столкновения является нарушение габарита подвижного состава при перевозке экскаватора	07.05	1	6	0,15	Ошибка человека 3	Больше 2 000 000 € (фактически больше 4 000 000 €)
4	Столкновение пассажирского поезда с легковым автомобилем на железнодорожном переезде. Водитель автомобиля нарушил правила проезда по железнодорожному переезду	15.05	0	2	0,11	Ошибка человека 4	Меньше 150 000 € (около 27 000 €)
5	Излом колесной пары моторного вагона и сход ее с рельсов из-за ошибки при сборке буксового узла. Никто не пострадал	25.05	0	0	0	Ошибка человека 5	Меньше 150 000 € (около 90 000 €)

Окончание табл. 5

№	Описание	Дата	Погибли	Ранены	ЭС	Причина	Ущерб
6	Пожар в локомотиве пассажирского поезда, вызванный возгоранием кабеля электропитания двигателя. Машинист поезд остановил, но успел надыхаться дымом и был отправлен в госпиталь. Возгорание произошло из-за нарушения правил технического обслуживания этой части локомотива	04.06	0	1	0,01	Ошибка человека 6	Меньше 150 000 € (около 10 000 €)
7	Две тележки пассажирского поезда сошли на стрелке из-за неправильного показания светофора перед стрелкой, которое не отражало реальное состояние стрелки. Тяга стрелочного привода была порвана, и остряк оставался в промежуточном положении. В целом состояние привода не соответствовало требованиям Правил технического обслуживания	05.06	0	0	0	Ошибка человека 7	150 000–2 000 000 €
8	Боковое столкновение на стрелке пассажирского и грузового поездов. Перед этим машинист грузового поезда проследовал на запрещающий сигнал и был остановлен сигналом автоматического экстренного торможения системы поездной защиты. После остановки машинист отпустил тормоза, поднял давление в тормозной магистрали и продолжил движение, не уведомив об этом поездного диспетчера. В результате произошло столкновение на стрелке с подходившим пассажирским поездом	01.08	0	38	0,74	Ошибка человека 8	Больше 2 000 000 €
9	Пожар в пассажирском поезде, начал гореть буксовый подшипник. Причина — ослабление узлов его крепления в результате плохо закрученных гаек. Возгорание удалось своевременно потушить, пассажиров — эвакуировать	28.09	0	0	0	Ошибка человека 9	Меньше 150 000 €
10	Пассажирский поезд по ошибке был выпущен на линию, где проводились путевые работы и отсутствовал кусок рельса на шпалах. Поезд сошел с рельсов, люди не пострадали	20.10	0	0	0	Ошибка человека 10	150 000–2 000 000 € (около 565 000 €)
11	Столкновение на стрелке пассажирского поезда и путеремонтного поезда. Диспетчер направил пассажирский поезд на стрелку, когда последние вагоны с гравием еще продолжали движение в габарите подвижного состава пассажирского поезда	13.11	0	1	0,01	Ошибка человека 11	150 000–2 000 000 €
12	Боковое столкновение на скрещении путей пассажирского поезда и путевой дрезина из-за нечеткого взаимодействия между диспетчером и машинистом дрезины	13.11	0	1	0,01	Ошибка человека 12	Меньше 150 000 €
13	Столкновение на переезде пассажирского поезда и легкового автомобиля. Водитель погиб	25.11	1	2	0,02	Технический отказ 1	Меньше 150 000 € (около 47 000€)
14	Сход пассажирского поезда из-за перевода стрелки под поездом из-за ошибки диспетчера	02.12	0	1	0,01	Ошибка человека 13	Ущерб 150 000–2 000 000 € (около 410 000 €)
15	Столкновение пассажирского поезда с легковым автомобилем на переезде, Причина — неисправность автоматики переезда	02.12	0	1	0,1	Технический отказ 2	Ущерб меньше 150 000 €

Результаты анализа

Таким образом, итоговыми результатами оценки аварийности с пассажирскими поездами на железных дорогах рассматриваемых стран ЕС в 2015 г. являются:

- общее число аварий и происшествий — 121;
- число аварий и происшествий, вызванных ошибками людей — 104;
- число аварий и происшествий, вызванных техническими отказами — 17;
- погибли и ранены из-за ошибок людей — 51 и 306 человек соответственно;
- погибли и ранены из-за технических отказов — 2 и 26 человек соответственно;
- материальный ущерб из-за ошибок людей — $64 \cdot X + 18 \cdot Y + 7 \cdot Z$ (здесь $X < 150\,000$ евро, Y — между 150 000 и 2 000 000 евро, $Z > 2\,000\,000$ евро), если для определенности принять минимальные оценки материального ущерба:

$$X = 20\,000 \text{ евро},$$

$$Y = 200\,000 \text{ евро},$$

$$Z = 2\,000\,000 \text{ евро},$$

то нижняя оценка материального ущерба из-за ошибок людей $H_{\min}$ составит:

$$H_{\min} \geq 64 \cdot 20\,000 + 18 \cdot 200\,000 + 7 \cdot 2\,000\,000 = 18\,280\,000 \text{ евро};$$

– материальный ущерб $M_{\min}$ из-за технических отказов — $64 \cdot X + 18 \cdot Y + 7 \cdot Z$, т. е.:

$$M_{\min} \geq 13 \cdot 20\,000 + 3 \cdot 200\,000 + 1 \cdot 2\,000\,000 = 2\,860\,000 \text{ евро}.$$

На примере 2015 г. видно, что ущерб $H_{\min}$ для жизни и здоровья людей и материальный ущерб $M_{\min}$ из-за аварий по техническим отказам примерно на порядок меньше, чем аналогичные показатели из-за аварий, обусловленных ошибками людей, вовлеченных в перевозочный процесс.

В табл. 7 представлены аналогичные данные, но только для аварий и происшествий на железнодорожных переездах рассматриваемых стран ЕС.

Оценка аварийности с пассажирскими поездами на железнодорожных переездах рассматриваемых стран ЕС в 2015 г. показывает, что:

- общее количество аварий и происшествий на переездах — 28;
- из них аварий и происшествий, вызванных ошибками людей, — 25;
- аварий и происшествий, вызванных техническими отказами, — 3;
- погибли и ранены из-за ошибок людей — 27 и 89 человек соответственно;
- погибли и ранены из-за технических отказов — 3 и 8 человек соответственно;
- материальный ущерб из-за ошибок людей — $23 \cdot X + 6 \cdot Y + 2 \cdot Z$ (здесь $X < 150\,000$ евро, Y — между 150 000 и 2 000 000 евро, $Z > 2\,000\,000$ евро), если для определенности принять минимальные оценки материального ущерба:

$$X = 20\,000 \text{ евро},$$

$$Y = 200\,000 \text{ евро},$$

$$Z = 2\,000\,000 \text{ евро},$$

то нижняя оценка материального ущерба из-за ошибок людей $H_{\min}$ составит:

$$H_{\min} \geq 23 \cdot 20\,000 + 6 \cdot 200\,000 + 2 \cdot 2\,000\,000 = 5\,660\,000 \text{ евро};$$

– материальный ущерб $M_{\min}$ из-за технических отказов — $3 \cdot X + 0 \cdot Y + 0 \cdot Z$, т. е.:

$$M_{\min} \geq 3 \cdot 20\,000 + 0 \cdot 200\,000 + 0 \cdot 2\,000\,000 = 60\,000 \text{ евро}.$$

Заключение

Сравнение показателей аварийности по всем авариям и происшествиям с этими же показателями для аварий и происшествий на переездах для пассажирских перевозок показывает следующее:

- статистика аварийности на железных дорогах мира и стран ЕС показывает одну и ту же тенденцию к увеличению; более интенсивный рост аварийности на железных дорогах мира по сравнению с железными дорогами стран ЕС обусловлен несовершенством управления безопасностью

ТАБЛИЦА 6. Последствия аварий и происшествий на железных дорогах стран ЕС в 2015 г.

1	Страна	Всего	Ошибки	Отказы	Последствия ошибок				Последствия отказов							
					Погибли	Ранены	ЭС	Ущерб (млн €)		Погибли	Ранены	ЭС	Ущерб (млн €)			
								<0,15	0,15–2,0				>2,0	<0,15	0,15–2,0	>2,0
1.	Австрия	3	3	0	7	10	0,73	1	0	2	0	0	0	0	0	0
2.	Бельгия	3	3	0	1	39	1,29	2	1	0	0	0	0	0	0	0
3.	Болгария Хорватия Словакия Словения	9	8	1	2	4	0,22	6	2	0	2	5	0,23	1	0	0
4.	Чехия	13	11	2	7	96	2,40	7	3	1	0	13	0,22	2	0	0
5.	Дания	4	4	0	4	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
6.	Эстония	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.	Фин-ляндия	4	4	0	0	2	0,2	3	1	0	0	0	0	0	0	0
8.	Франция	6	4	2	11	50	2,66	1	1	2	0	0	0	2	0	0
9.	Германия	22	17	5	8	38	0,74	8	7	2	1	3	0,01	1	3	1
10.	Венгрия	18	16	2	6	24	0,69	0	1	0	0	1	0,01	2	0	0
11.	Италия	3	3	0	0	14	0,14	2	1	0	0	0	0	0	0	0
12.	Ирландия	2	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
13.	Норвегия	3	1	2	0	0	0	1	0	0	0	4	0,04	2	0	0
14.	Польша	2	2	0	4	3	0,3	2	0	0	0	0	0	0	0	0
15.	Португалия	3	3	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
16.	Румыния	4	4	0	0	7	0,07	3	1	0	0	0	0	0	0	0
17.	Испания	7	6	1	0	0	0	6	0	0	0	0	0	1	0	0
18.	Великобритания	15	13	2	0	19	0,53	13	0	0	0	2	0,11	2	0	0
Итого:		121	104	17	51	306	9,97	64	18	7	2	26	0,62	13	3	1

ТАБЛИЦА 7. Последствия аварий и происшествий на железнодорожных переездах стран ЕС в 2015 г.

2	Страна	Всего	Ошибки	Отказы	Последствия ошибок				Последствия отказов								
					Погибли	Ранены	ЭС	Ущерб (млн €)		Погибли	Ранены	ЭС	Ущерб (млн €)				
								<0,15	0,15–2,0				> 2,0	<0,15	0,15–2,0	> 2,0	
1.	Австрия	1	1	0	5	3	0,3	1	0		0	0	0	0	0	0	
2.	Бельгия	1	1	0	1	0	0	0	1	0		0	0	0	0	0	
3.	Болгария Хорватия Словакия Словения	4	3	1	2	3	0,12	1	2	0		2	5	0,23	1	0	0
4.	Чехия	7	7	0	7	65	1,46	4	2	1		0	0	0	0	0	0
5.	Дания	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
6.	Эстония	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
7.	Финляндия	1	1	0	0	2	0,2	0	1	0		0	0	0	0	0	0
8.	Франция	1	1	0	0	8	0,35	0	0	1		0	0	0	0	0	0
9.	Германия	4	2	2	1	3	0,12	2	0	0		1	3	0,12	2	0	0
10.	Венгрия	3	3	0	6	1	0,01	3	0	0		0	0	0	0	0	0
11.	Италия	1	1	0	0	0	0	1	0	0		0	0	0	0	0	0
12.	Ирландия	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
13.	Норвегия	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
14.	Польша	2	2	0	4	3	0,3	2	0	0		0	0	0	0	0	0
15.	Португалия	2	2	0	1	0	0	2	0	0		0	0	0	0	0	0
16.	Румыния	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
17.	Испания	0	0	0	0	0	0	6	0	0		0	0	0	0	0	0
18.	Великобритания	1	1	0	0	1	0,1	1	0	0		0	0	0	0	0	0
Итого:		28	25	3	27	89	2,96	23	6	2		3	8	0,35	3	0	0

на железных дорогах стран Юго-Восточной Азии и Африки;

– аварии и происшествия на переездах составляют примерно четвертую часть всех аварий и происшествий на железных дорогах ЕС;

– более 80 % всех аварий и происшествий на переездах обусловлены ошибками людей;

– в авариях и происшествиях на переездах погибло не менее 50 % людей, погибших на железных дорогах ЕС;

– материальный ущерб, причиняемый на железнодорожных переездах инфраструктуре и пассажирскому подвижному составу железных дорог, составляет примерно четвертую часть всего ущерба от аварий и происшествий с пассажирскими поездами.

Аналогичная картина складывается и по всем остальным годам рассмотренного периода 2008–2019 гг.

Все это — достаточное основание для того, чтобы считать повышение безопасности железнодорожных переездов актуальной задачей,

которую необходимо решать с использованием систематизированного подхода, основанного на современных технологиях связи и информатики, а также на более совершенных системах менеджмента безопасности.

Библиографический список

1. ERADIS — база данных аварий и происшествий на железных дорогах Европейского союза, которая ведется Европейским железнодорожным агентством (ERA — European Railway Agency).

Дата поступления: 11.01.2022

Решение о публикации: 11.02.2022

Контактная информация:

ШМАТЧЕНКО Владимир Владимирович —
канд. техн. наук, доцент; cenelec2012@mail.ru

МЕРЕМСОН Юрий Яковлевич — канд. техн.
наук, доцент; meremson@list.ru

ИВАНОВ Виктор Геннадьевич —
ст. преподаватель; ivanov.v.g.spb@gmail.com

Traffic Safety Specifics on Rail Crossings

V. V. Shmatchenko, Yu. Ya. Meremson, V. G. Ivanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Shmatchenko V. V., Meremson Yu. Ya., Ivanov V. G. Traffic Safety Specifics on Rail Crossings // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 143–154. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-143-154

Summary

Purposes: To consider the state of safety on the railways of the world and the European Union (EU) countries for the period of 1990–2020, and make the particular focus on safety at railway crossings. Information from Wikipedia was considered as one of the sources to evaluate this situation and, as it is not known whether Wikipedia information is representative, more accurate data from the official ERADIS database, which collects comprehensive information on safety of EU railways, was as another source. **Methods:** The measure of safety status was annual estimates of absolute values of accident rate, material damage, associated with the accidents, and human life and health damage. In this regard, only accidents with passenger trains were considered.

The causes of accidents — human error or technical failure — were also being determined, while cases of sabotage, vandalism and terrorism were not considered as they are related to transport safety and not to traffic one. The material, collected this way, can be differentiated and analyzed by EU countries, accident types — derailments, collisions on a way, collisions at railway crossings, collisions with people, fires on trains; by accident causes — human error or technical failure, by accident reasons — human errors or technical failures, by accident consequences — material damage or human life and health damage. **Results:** Integral estimates by year show increase in accident rate on railways. For EU countries this growth is slowing down but if we consider time periods from 4 years to more the accident rate keeps clear upward tendency. The main cause of accidents is human errors, especially, at railway crossings. **Practical significance:** The pursued analysis shows the necessity of further usage of automation and safety control systems to improve the guarantor-ability of railway transport.

Keywords: Accident, derailment, train collision, collision on rail crossings, traffic safety, failure, damage.

References

1. *ERADIS — baze dannykh aviariy i proissheshtviy na zheleznnykh dorogakh Evropeyskogo Soyuza, kotoraya vedetsya Evropeyskim Zheleznodorozhnym Agentstvom (ERA — European Railway Agency)* [ERADIS — a database of accidents and incidents on the railways of the European Union, which is maintained by the European Railway Agency (ERA — European Railway Agency)]. (in Russian)

Received: January 11, 2022

Accepted: February 11, 2022

Author's information:

Vladimir V. SHMATCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; cenelec2012@mail.ru

Yury Ya. MEREMSON — PhD in Engineering, Associate Professor; meremson@list.ru

Viktor G. IVANOV — Senior Lecturer; ivanov.v.g.spb@gmail.com