

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 19, выпуск 2, 2022

ISSN (Print) 1815-588X
ISSN (Online) 2658-6851

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей
связи 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 области
технических наук (транспорт, телекоммуникации,
строительство)

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

Индекс подписки Агентство «Книга-Сервис» 33315

Фото на обложке предоставлено пресс-службой
ФГБОУ ВО ПГУПС

Подписано в печать с оригинал-макета 21.06.2022.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 31,25. Тираж 300 экз.

Заказ . Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Панычев Александр Юрьевич, главный редактор,
канд. экон. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

Евстафьев Андрей Михайлович, научный редактор,
д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Абу-Хасан Махмуд Самиевич, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Агеев Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Анисимов Владимир Александрович, д-р техн. наук,
доцент, ПГУПС, 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

Воробьев Александр Алфеевич, д-р техн. наук, доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Голоскоков Дмитрий Петрович, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Кручек Виктор Александрович, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

Макарова Елена Игоревна, д-р техн. наук, доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Никитин Александр Борисович, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

Привалов Андрей Андреевич, д-р воен. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Рахимов Рустам Вячеславович, д-р техн. наук, доцент,
Ташкентский государственный транспортный университет,
Ташкент, Республика Узбекистан

Смирнов Владимир Игоревич, д-р техн. наук, доцент,
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

Уздин Александр Моисеевич, д-р техн. наук, доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Шевлюгин Максим Валерьевич, д-р техн. наук, доцент,
РУТ (МИИТ), Москва, Россия

Шершнева Мария Владимировна, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Ширунов Гурий Николаевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG
TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 19, issue 2, 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 (transport, telecommunications, construction)

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed

Index Direct Mail Agency "Kniga-Service" 33315

Open price

© Emperor Alexander I Petersburg
State Transport University, 2022

JOURNAL STAFF

Alexander Panychev, Editor-in-chief, PhD in Economics,
Associate Professor, Emperor Alexander I Petersburg State
Transport University, St. Petersburg, Russia

Andrey Kanayev, Deputy Editor-in-chief, D. Eng. Sci., Professor,
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

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

EDITORIAL TEAM

Makhmud Abu-Khasan, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Sergey Ageev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

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

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

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

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

Dmitriy Goloskokov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Viktor Kruchek, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

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

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

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

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

Andrey Privalov, D. Mil. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Rustam Rakhimov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Tashkent
State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

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

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

Valentina Soloveva, 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

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

Maksim Shevlyugin, D. Eng. Sci., Associate Professor, Russian
University of Transport, Moscow, Russia

Maria Shershneva, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Guriy Shirunov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

- А. Ю. Паньчев, О. Д. Покровская, Л. С. Блажко, Т. П. Сацук, М. А. Дроздова**
Школа инженерного предпринимательства как основа облика
транспортного университета четвертого поколения..... 161
- А. Г. Андриевский, Е. А. Чабан, В. В. Москвичев**
Оценка долговечности и рациональное крепление кожуха зубчатой передачи
к тяговому двигателю электровоза 182
- А. В. Атаманюк, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев, И. Ю. Новосельский**
Компьютерное моделирование грузозахватного устройства автоматизированной
системы выгрузки-подачи рельсовых плетей в РСП-1 193
- В. П. Бельтюков, А. В. Андреев**
Особенности работы верхнего строения пути в условиях продолжительного зимнего периода203
- О. И. Зайнитдинов, С. О. Комиченко**
Выбор материалов и конструктивных решений раздвижной стены сменного кузова..... 210
- С. В. Кротов, Д. П. Кононов**
Анализ зоны контакта железнодорожного колеса и рельса 221
- Д. П. Самофалов, С. В. Шкурников, В. А. Голубцов**
Совершенствование подготовки результатов инженерно-гидрометеорологических
изысканий для проектирования объектов транспортной инфраструктуры 232
- М. А. Шрайбер**
Влияние термомеханической нагрузки на старение изоляции тяговых
электродвигателей тепловозов 242

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

- Г. И. Гаджиметов**
Оценка максимальных сил, действующих на боковые скользуны тележек грузовых вагонов... 249
- А. А. Гринемайер, И. Б. Аникин, Р. Е. Парфененко, М. Ю. Изварин**
Перспективы развития сети высокоскоростных железных дорог в мире
на ближайшее десятилетие 259
- А. К. Канаев, Э. В. Логин, И. С. Гришанов**
Комплексный алгоритм процессов контроля и управления телекоммуникационной
сетью Carrier Ethernet с применением механизмов OAM..... 266

Е. К. Коровяковский, М. Б. Сабуров

Пути повышения эффективности логистического обеспечения деятельности международной транспортной системы «Агроэкспресс» на основе инструментария однокритериальной оптимизации 276

Д. Н. Курилкин

Определение затрат энергии в синхронных тяговых генераторах тепловозов при различных режимах нагружения 286

Г. И. Никифорова, Т. Г. Сергеева

Оценка возможностей транспортно-экспедиторской компании при проектировании цепи доставки груза 298

О. Д. Покровская, З. Н. Ёлдашов, М. А. Марченко, М. В. Шевердова

Транспортно-логистическая система Туркменистана 305

М. В. Третьяков, А. А. Пискун, Р. А. Терехова

Подготовка изданий Водного кадастра по Арктической зоне Российской Федерации как составляющая обеспечения техносферной безопасности 319

Т. М. Шманёв, В. И. Ульяницкая, М. С. Горбунова, А. Ю. Ситников, Н. Б. Федорова

Формирование конкурентной среды на примере транспортного потенциала методом организации поточного следования пассажиров на основе принципа «сухие ноги» 333

→ **ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

М. С. Горбунова, А. В. Новичихин

Совершенствование системы управления транспортно-пересадочными узлами 345

К. В. Сливец, С. С. Колмогорова, И. А. Коваленко

Параметры мерзлых грунтов при численном моделировании теплофизических задач 359

А. А. Сокольников, А. Н. Коньков, А. Л. Новиков, А. В. Бенин

Факторы, влияющие на распределение добавочного давления на тоннели метрополитена от наземного строительства 367

И. В. Степанова, М. Абу-Хасан, В. Я. Соловьева

Инновационный конструкционно-теплоизоляционный бетон для изоляции и повышения устойчивости мерзлых грунтов основания 378

А. М. Уздин, А. В. Бенин, Ш. Ш. Назарова, О. Б. Сабирова, М. С. Белашов

Особенности расчета сооружений на действия слабых частых землетрясений 390

CONTENTS

→ PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

| | |
|--|-----|
| A. Yu. Panychev, O. D. Pokrovskaya, L. S. Blazhko, T. P. Satsuk, M. A. Drozdova The School of Engineering Entrepreneurship as a Basis of the Fourth Generation Transport University Image..... | 179 |
| A. G. Andrievsky, E. A. Chaban, V. V. Moskvichev Durability Assessment and Rational Fastening to Traction Engine of Gear Housing of an Electric Locomotive..... | 191 |
| A. V. Atamanyuk, Ya. S. Vatulin, A. A. Vorobyov, I. Yu. Novoselsky Computer Simulation of Load-Handling Device of Automatic System for Unloading-Supply of Rail Straps at Rail Welding Enterprise RWE-1 | 201 |
| V. P. Beltiukov, A. V. Andreev Specificities of Work of Railway Permanent Way in Conditions of Continuous Winter Period | 208 |
| O. I. Zaynitdinov, S. O. Komichenko Choice of Materials and Constructive Settlements of Sliding Wall Interchangeable Body | 219 |
| S. V. Krotov, D. P. Kononov Analysis of Contact Zone of Railway Wheel and Rail | 230 |
| D. P. Samofalov, S. V. Shkurnikov, V. A. Golubtsov Preparation Improvement of the Results of Engineering-Hydrometeorological Research for Transport Infrastructure Facility Projection | 240 |
| M. A. Shreiber Influence of Thermomechanical Workload on the Aging of Insulation of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives | 247 |

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

| | |
|---|-----|
| G. I. Gadzhimetov Evaluation of Maximal Forces Impacting on Side Slippers of Freight Wagon Cart..... | 257 |
| A. A. Greenmayer, I. B. Anikin, R. E. Parfenenko, M. Yu. Izvarin Development Perspectives of High-Speed Railway Network in the World in the Next Decade..... | 264 |
| A. K. Kanaev, E. V. Login, I. S. Grishanov Complex Algorithm for Control and Management Processes of Carrier Ethernet Telecommunication Network Using OAM Mechanisms | 274 |

| | |
|--|-----|
| E. K. Korovyakovskiy, M. B. Saburov Ways to a Rise Efficiency of Logistic Provision for International Transport System "Agroexpress" Activity on the Basis of One-Criterion Optimization | 284 |
| D. N. Kurilkin Determination of Energy Consumption in Synchronous Traction Generators of Diesel Locomotives Under Various Workload Conditions..... | 296 |
| G. I. Nikiforova, T. G. Sergeeva Assessment of the Capabilities of a Freight Forwarding Company When Designing a Cargo Delivery Chain..... | 303 |
| O. D. Pokrovskaya, Z. N. Eldashov, M. A. Marchenko, M. V. Sheverdova Transport and Logistics System of Turkmenistan | 316 |
| M. V. Tretiakov, A. A. Piskun, R. A. Terekhova Preparation of Water Cadastre Publications on the Arctic Zone of the Russian Federation as a Constituent of Technosphere Safety Support | 330 |
| T. M. Shmanev, V. I. Ulyanitskaya, M. S. Gorbunova, A. Yu. Sitnikov, N. B. Fedorova Formation of a Competitive Environment on the Example of Transport Potential by the Method of Organizing Passenger Flow Based on "Dry Feet" Principle | 342 |



GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

| | |
|--|-----|
| M. S. Gorbunova, A. V. Novichikhin Improving the Management System of Transport Hubs | 356 |
| K. V. Slivec, S. S. Kolmogorova, I. A. Kovalenko Frozen Soil Parameters at Numerical Simulation of Thermophysical Tasks..... | 365 |
| A. A. Sokornov, A. N. Konkov, A. L. Novikov, A. V. Benin Factors Affecting Additional Pressure Distribution from Ground Construction on Subway Tunnels | 376 |
| I. V. Stepanova, M. Abu-Khasan, V. Ya. Soloviova Innovative Structural-Heat-Insulating Concrete for Insulation and Stability Rise of Frozen Foundation Soils..... | 387 |
| A. M. Uzdin, A. V. Benin, Sh. Sh. Nazarova, O. B. Sabirova, M. S. Belashov Features of Construction Calculation on Frequent Weak Earthquake Impact | 403 |



УДК 378: 346.26

Школа инженерного предпринимательства как основа облика транспортного университета четвертого поколения

А. Ю. Панычев, О. Д. Покровская, Л. С. Блажко, Т. П. Сацук, М. А. Дроздова

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

Для цитирования: Панычев А. Ю., Покровская О. Д., Блажко Л. С., Сацук Т. П., Дроздова М. А. Школа инженерного предпринимательства как основа облика транспортного университета четвертого поколения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 161–181. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-161-181

Аннотация

Цель: Описать первые результаты уникального опыта Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС) как отраслевого транспортного вуза по созданию в научно-образовательной экосистеме университета Школы инженерного предпринимательства. **Методы:** Системный анализ открытых источников сети Интернет и программы развития ПГУПС до 2030 года; а также экосистемный, модульный и проектный подходы к организации работы Школы инженерного предпринимательства. **Результаты:** В исследовании показано, что поиск эффективных форматов развития человеческого капитала приобретает особую актуальность в обеспечении национального технологического суверенитета и создание на базе университета Школы инженерного предпринимательства как нового формата генерации и интеграции инноваций — веление времени. Ключевым назначением Школы инженерного предпринимательства является подготовка интеллектуальной элиты по образовательным модулям предпринимательства, инженерного и изобретательского творчества обучающихся с формированием уникального пула компетенций по организации и управлению полным жизненным циклом проектов, инноваций и высокотехнологичным производством. Отмечено, что облик отраслевого университета трансформируется в экосистему, способную создать уникальное предпринимательское пространство для вовлечения студентов, сотрудников и промышленных партнеров в собственный хаб ноу-хау. **Практическая значимость:** Применение и последующее масштабирование уникального опыта ПГУПС как отраслевого вуза позволит осуществлять опережающую подготовку человеческого капитала с расширенными дефицитными компетенциями и сформирует точки роста конкурентоспособности транспортного образования в современной Индустрии 4.0.

Ключевые слова: Школа инженерного предпринимательства, экосистема, транспортный университет, инновационный образовательный проект, Индустрия 4.0, Университет 4.0.

Введение. Инженерное предпринимательство в университете четвертого поколения

В ответ на вызовы современности, требующие концентрации усилий по внедрению интегрированных цифровых образовательных проектов, ПГУПС как провайдер актуальных образовательных программ и технологий, интегрирующих инженерные, предпринимательские знания и практические навыки, создал в 2021 г. инновационную образовательную площадку — Школу инженерного предпринимательства (ШИП). Необходимость создания инновационного образовательного проекта «Школа инженерного предпринимательства» обусловлена важностью формирования открытой среды поиска и развития способностей и талантов у школьников и студентов, направленной на профессиональную ориентацию, коммерциализацию и трансфер результатов научных исследований, прежде всего в транспортную отрасль.

Цель данного исследования заключается в определении роли ШИП в облике университета четвертого поколения в призмах и на примере опыта Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Формат инженерного предпринимательства предполагает формирование экосистемы нового поколения, основанной на междисциплинарности знаний на стыке инженерных и экономических наук для подготовки лидеров, способных разрабатывать инновационные инженерные решения и управлять бизнес-процессами в высокотехнологичных организациях. Известно, что высокотехнологичный бизнес — это ключевой сектор мировой экономики, развитие которого идет быстрыми темпами.

По экспертным оценкам, роль инженерного предпринимательства в социально-экономическом развитии России будет возрастать. В насто-

ящее время инженерное предпринимательство становится потенциальным источником и гарантом обеспечения занятости и экономического роста национальной экономики. С учетом трендов развития Индустрии 4.0, которые заключаются в цифровизации и кардинальной смене технологий, развитие школ инженерного предпринимательства как формата обучения специалистов нового поколения расширяет возможности современного бизнеса [1].

В 2020 г. в России создано порядка 10 тысяч новых высокотехнологичных компаний с ненулевой выручкой, при этом большинство стартапов представлены наукоемкими бизнес-сервисами в формате B2B, а также цифровыми решениями. Создание нового бизнеса в высокотехнологичных отраслях экономики — это драйвер устойчивого и сбалансированного развития экономики. В свою очередь, гарантом и стимулом инновационных решений для современного бизнеса выступает человеческий капитал, имеющий предпринимательскую культуру и компетенции, необходимые для высокотехнологического рывка, которые позволяют создавать новые или модифицировать существующие продукты, услуги, технологии с помощью инженерных решений с последующим продвижением этих решений на рынке.

Исторически университеты занимались трансляцией знаний, подготовкой кадров и играли роль «социального лифта». Трансформации функциональных задач вуза в дальнейшем способствовали заказы от государства и технологического бизнеса. Университеты как центры создания нового знания начали проводить прикладные исследования, создавать инновации. Взаимосвязь университета и бизнеса настолько окрепла, что на базе университета стала формироваться инфраструктура для получения предпринимательских компетенций.

Так, например, если в 1970 г. предпринимательские курсы существовали всего в 16 уни-

верситетах и колледжах США, то в 1985 г. их число увеличилось до 85, в 1995 г. их стало 400, в 2000 г. — 1200, а в 2005 г. — порядка 1800. Преподаватель такого вуза перестал быть просто тьютором, ментором, спикером, носителем знаний и стал реальным предпринимателем, стал проводником, помогающим коммерциализировать разработки вуза через экосистему поддержки стартапов.

По инициативе Минобрнауки России формируется Платформа университетского технологического предпринимательства для поддержки «не менее 30 тысяч новых университетских стартапов и 150 тысяч высокотехнологичных рабочих мест как программа привлечения венчурных компаний и фондов из более поздних технологических стадий в ранние» [2].

В России реализуется Национальная технологическая инициатива (НТИ), призванная ускорить научно-технологическое развитие страны. Большинство компаний разного масштаба бизнеса активно применяют инновационные, передовые разработки и создают новые функциональные возможности для своих клиентов. Для этого требуется рост капитализации технологий и новых продуктов на рынках всех уровней. Именно поэтому уже сегодня для успешного ведения инновационного предпринимательства формируется такая инфраструктура, как наукограды, особые экономические зоны, технопарки и многое другое.

Эффективно использовать эту инфраструктуру могут только специалисты нового поколения, обладающие уникальными навыками создания ценности и профессиональными компетенциями инженерного предпринимательства для поиска нестандартных решений с использованием прорывных технологий и владеть такими ключевыми основополагающими навыками, как:

– управление качеством и рисками в условиях неопределенности;

– стратегическое управление интеллектуальной собственностью;

– бизнес-моделирование с учетом трансформации цифровой экономики;

– привлечение венчурных инвестиций;

– практическое использование инновационных маркетинговых подходов к разработке и продвижению продукта [3].

Кроме того, следует отметить, что для необходимого оживления отечественной экономики требуются десятки тысяч технологических стартапов, реализовать которые смогут предприниматели новой формации, которых на сегодняшний день в РФ катастрофически мало. И стимулирование инженерного предпринимательства уже на уровне студенчества позволит РФ изменить университетскую среду и превратить ее в экосистему поставки и запуска новых наукоемких стартапов на рынок Индустрии 4.0.

Современный Университет 4.0 — это предпринимательский университет, интегрирующий бизнес, государство и общество, вовлекающий в предпринимательскую активность всех участников образовательного процесса. Поэтому логичным является то, что Университет 4.0 является точкой роста и развития как территорий, так и отраслей.

Однако Университет 4.0 — это не только предпринимательский университет. Прежде всего это креативная платформа новых метапредметных практик и когнитивных технологий для исследований и коллективного управления будущим. Университет 4.0 — это университет, открытый к цифровой революции и экономике знаний, как среда существования коллективных интеллектов («multisapiens»). Такой университет воспроизводит: креативность, коммуникабельность; компетенции, необходимые для навигации, самостоятельной сборки и выстраивания индивидуального мировоззрения. Новым трендом в развитии современного университета становится подготовка выпускника, умеющего формулировать задачу на

профессиональном языке и решать ее с помощью цифровых, инновационных технологий.

В экосистеме университета четвертого поколения решаются важнейшие задачи, которые считаются для экономики и индустрии сегодняшнего дня неразрешимыми. Выпускник такого университета, эксперт, реализующий «знание в действии», способен преодолеть глобальные технологические проблемы и вывести технологии на принципиально иной мировой уровень.

Университет 4.0 трансформирует функцию «воспроизводство заданного» — заданных форм мышления и деятельности и преобразуется в принципиально иную, открытую среду — хаб проектных коммуникаций. Иными словами, становится инфраструктурой поисковых активностей (исследовательских, проектных и новых практик) с предоставлением всех условий для коммуникации и навигации.

Стоит отметить, что предпринимательский подход преобладает практически во всех отраслях экономики и на рынке человеческого капитала наблюдается устойчивый спрос на специалистов, способных не только использовать стандартные инструменты и методы, но и способных их комбинировать, развивать и совершенствовать. Это становится ключевым драйвером, катализатором научно-технологического развития, конкурентоспособности и экономической эффективности как отрасли, так и региона своего нахождения.

Использование в экосистеме Университета 4.0 новейших цифровых технологий и прорывного инструментария позволяет решать задачи любой сложности, выполняемые ранее в течение не одного месяца, практически всего за один день, как результат работы команды изменений, применяющей передовые методы и технологии мышления.

Эффективность Университета 4.0 заключается в том, что развитие такого формата образования способствует увеличению влияния малого инновационного бизнеса в реальной экономике, от

современных 1,5–2 % сегмент инновационного бизнеса можеткратно увеличиться, в том числе и прежде всего — благодаря реализации модели «инновационного университета». В свою очередь, надо полагать, это будет способствовать формированию в нашей стране экономики, основанной на инновациях [4].

Кроме того, аккумуляция синергетического эффекта от выполняемых на благо отрасли исследований, доходность лицензионных договоров формирует условия для выхода транспортной науки на фронт высокотехнологичных исследований по перспективным направлениям развития транспорта и логистики.

Таким образом, облик Университета 4.0 — это инновационная среда и высокотехнологичная инфраструктура подготовки «инженерного спецназа» для высокотехнологичных компаний-лидеров — «национальных чемпионов». И в основе формирования этого облика лежит создание Школы инженерного предпринимательства как первый шаг эволюции Университета 4.0.

Первый транспортный вуз России на пути к университету четвертого поколения

В условиях волатильной экономики облик отраслевого университета трансформируется в экосистему, способную создать уникальное предпринимательское пространство для вовлечения студентов, сотрудников и промышленных партнеров в собственный хаб ноу-хау.

Поиск эффективных форматов развития человеческого капитала приобретает особую актуальность в обеспечении национального технологического суверенитета, и создание на базе университета Школы инженерного предпринимательства как нового формата генерации и интеграции инноваций — веление времени.

Как утверждает И. Виссема [5], конкурентное преимущество университета «зависит от того,

насколько он сможет позиционировать себя как ядро хаба ноу-хау, как открытую сеть взаимодействия».

В указанном аспекте миссия ШИП — формирование предпринимательской экосистемы в транспортном университете как среды взаимодействия обучающихся, преподавателей и представителей бизнеса для поиска нестандартных инженерных решений в перспективных сферах развития транспорта и технологий Индустрии 4.0.

Об атрибутах бизнес-экосистем в целом и экосистемы университета в частности подробно говорится в работах [6–11].

Такая новая предпринимательская экосистема современного вуза позволяет стимулировать появление не только новых отраслей, но и новых технологических рынков («технологический сток»), а также интенсивную эволюцию региона нахождения университета.

При этом инженерное предпринимательство предполагает как создание нового продукта, так и ноу-хау — уникальной коммерчески пригодной технологии с перепродажей права интеллектуальной собственности на нее. В этом аспекте университет приобретает прежде нехарактерные для него черты «специализированного поставщика технологии», так называемого *specialist technology suppliers* [12], или «серийного инноватора», *serial innovators* [13], получающего доход от лицензионных платежей по объектам интеллектуальной собственности.

По мнению Г. Ицковица, основной функционал модели развития современного вуза заключается в следующем: «преподавание, научные исследования и экономическое развитие предпринимательской деятельности» [14].

Университет 4.0 — это университет, способный решать проблемы-вызовы современной промышленности за счет применения широкого спектра цифровых решений, инструментов «умных технологий» и образовательных ресур-

сов формата SPOOC (SelfPaced Online Courses), MOOC (Massive Open Online Courses) и др.

Согласно концепции «Университет 4.0», вуз становится лидером развития высокотехнологичных отраслей и максимально капитализирует собственные знания. Для этого в университете четвертого поколения формируются проектные группы *Multisapiens* с широким междисциплинарным функционалом (включая обучение, исследование, проектную деятельность, инновационное предпринимательство), которые способны креативно, эффективно и довольно быстро генерировать идеи и проекты на базе инфраструктуры вуза. И университет в таком случае видоизменяется до роли полноценного интеллектуального парка, который в разных источниках называют «хабом ноу-хау», наукоемким агрегатором, *think-tank* и др. Реализация такой роли в полной мере достигается в развитии инженерного предпринимательства на базе вуза как точки роста его инновационной активности [15]. Типовая модель Университета 4.0 показана на рис. 1 [16].

ПГУПС видит свою роль в качестве отраслевого вуза в создании условий для «выращивания» и «запуска» высокотехнологичных стартапов за счет уникального пула компетенций человеческого капитала, способного сбалансировать технологическую и рыночную готовность продукта и гарантировать его инженерную проработку и востребованность на рынке Индустрии 4.0.

При этом актуальность собственных наукоемких разработок в сфере развития техники и технологии приобретает особое значение в условиях санкционной политики западных стран против России и возрастающих требований импортозамещения. В формате ШИП ПГУПС видит конкурентоспособный способ построения «технологического стока» для транспортной отрасли и выхода на новый уровень предпринимательской активности современного университета.

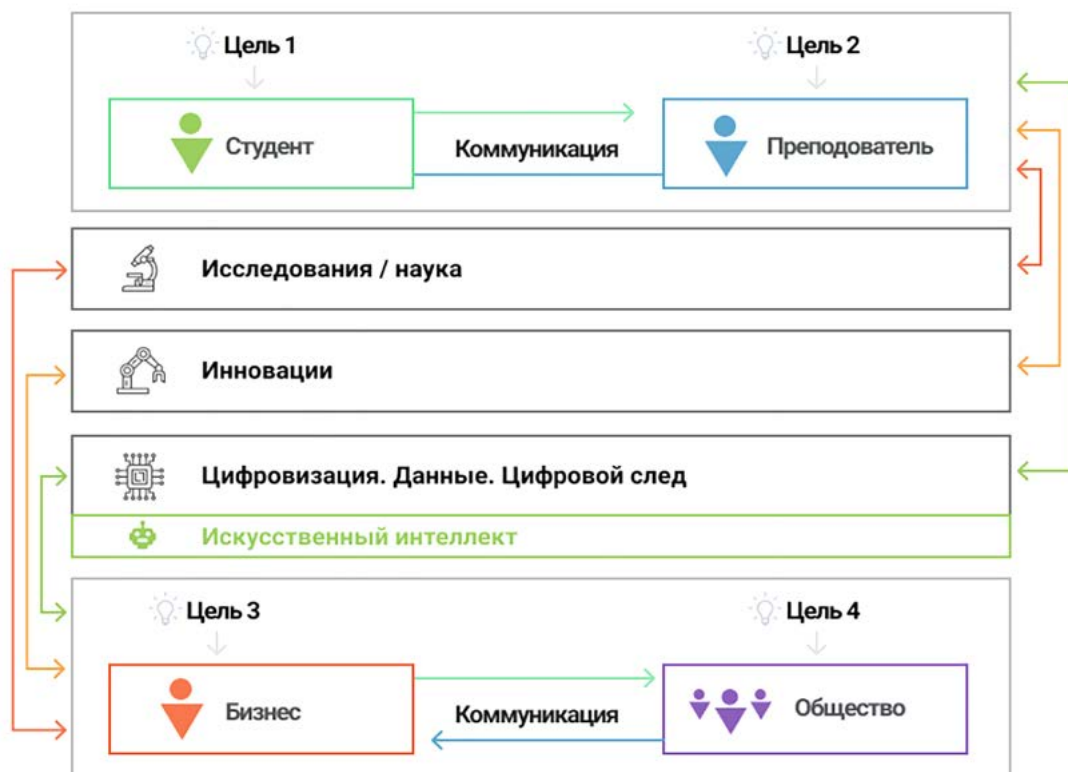


Рис. 1. Типовая модель функционирования Университета 4.0 [16]

Однако показанная на рис. 1 модель функционирования Университета 4.0, предложенная авторами работы [16], не лишена недостатков. Ключевым является отсутствие сквозного блока «Коммерциализация», наличие которого определяет эффективность всей модели функционирования современного университета.

На наш взгляд, блок «Коммерциализация» может и должен следовать сразу же за блоком «Инновации», определяя их степень экономической эффективности и прикладной пригодности для современного бизнес-окружения вуза. Функционал университета 4.0 состоит в организации экосистемы, создании и коммерциализации знаний.

В связи с этим Школа инженерного предпринимательства ПГУПС является центром подготовки обучающихся всех уровней образования к оптимальному решению инженерно-технических задач для технологического прорыва за счет создания новой наукоемкой продукции. И неуди-

вительно, что облик Университета 4.0 сегодня обозначен как «обучающийся университет», поскольку роль университета четвертого поколения преобразуется в создание флагманского центра по планированию и организации учебной деятельности в быстро меняющейся экономике знаний и информации.

Такой формат ШИП продиктован осознанием необходимости трансформации и интеграции фундаментальных знаний, Hard Skills и Soft Skills в пул уникальных компетенций — MetaSkills. Такой пул уникальных MetaSkills является «проникающим» и опережающим набором компетенций, которые базируются, по мнению О. Г. Тихомировой [17], на «комбинаторности, модульности и метазнании», а именно:

1. «Самопрезентация» — умение сделать себя известным.
2. «Владение цифровыми технологиями и навыками человеко-машинного взаимодействия».

3. «Тимбилдинг» — лидерство и коммуникационные компетенции — для генерации новых ценностей.

4. «Креативное мышление и высокий эмоциональный интеллект» — для саморазвития и успешного ведения профессиональной деятельности в новых сферах [17].

Global Future Skills определяет пять основных направлений, которые необходимо реализовывать современным образовательным учреждениям для обучения специалистов будущего: 1) построение единых моделей обучения, работы, профессиональной деятельности и жизни в обществе; 2) использование цифровых платформ в обучении, доступность обучающего контента; 3) персонализированное обучение, индивидуальная образовательная траектория; 4) переосмысление образовательного процесса в контексте глобального гражданского общества; 5) создание моделей «работа + обучение» для студентов и обеспечение возможности организации мини-сообществ молодежи (например, стартапы).

В связи с этим ключевой задачей университета при создании ШИП является концентрация человеческого капитала, а также организационное и материально-техническое обеспечение благоприятного делового климата для решения прикладных инновационных задач Индустрии 4.0. ПГУПС реализуется перезагрузка инженерного образования CDIO (Conceive + Design + Implement + Operate: «Придумывай + Разрабатывай + Внедряй + Управляй») как инструмент создания инновационной образовательной среды для подготовки нового поколения инженеров по альтернативным траекториям, способных выйти на производство с гибким, интегрированным мышлением, а не только выполнять свои трудовые функции.

Миссия отраслевого университета предполагает, таким образом, подготовку инженеров новой формации для условий ведения бизнеса

и прогрессивного научно-технологического развития отрасли, в прямом взаимодействии со сложившимися трендами развития Индустрии 4.0.

Задача инженера будущего — изменять, трансформировать отрасль. Можно заключить, что ШИП — это не только драйвер развития транспортной отрасли (в том числе — не в ней), но и энергия будущего, дающая стимул к релевантным изменениям.

Инженер будущего, инженер Индустрии 4.0 должен не только быть успешен в профессиональной деятельности на благо отрасли, но и развивать отрасль, трансформировать технику и технологию. В этом аспекте обучение по углубленной траектории позволяет вырастить ту интеллектуальную инженерную элиту, которая преобразует облик транспорта России. А предпринимательское мышление позволяет не только находить и оценивать проблемы в развитии транспортной отрасли, но и совершенствовать ее, поэтому внедрение модулей предпринимательства в подготовку инженеров приобретает особую роль в условиях активного развития Индустрии 4.0.

В полной мере перечисленные направления реализуются в ШИП, которую можно считать неотъемлемым фактором конкурентоспособности отраслевого вуза и вектором коммерчески пригодных, актуальных и ценных для Индустрии 4.0 научных результатов.

От Августина Бетанкура до программы «Приоритет-2030»

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I в течение более чем 200 лет является передовым учебно-научно-производственным комплексом, с современной экспериментальной базой и выступает в качестве точки роста отечественного транспортного образования, науки и ноу-хау. Именно ученые ПГУПС решают широкий спектр прикладных научно-практических задач во благо

города, федерального округа, транспортной отрасли и Российской Федерации в целом.

213 лет назад организатор и первый ректор Института Корпуса инженеров путей сообщения Августин Бетанкур определил целью создания учебного заведения «снабжение России инженерами, которые прямо на выходе из заведения могли быть назначены к производству всех работ в Империи». Первый ректор заложил принципиальные, базисные основы всего инженерного образования России. Роль Августина Бетанкура является определяющей практически во всех направлениях развития ПГУПС.

Со сменой внешней среды университет трансформировался и перешел на новый уровень построения научно-образовательного пространства, бережно сохраняя все лучшие традиции и успешно проводя в жизнь новые практики инженерного образования.

Как носитель уникальных знаний А. Бетанкур стал основоположником той концепции, которая сегодня, подчиняясь спиральной закономерности развития, положена ПГУПС в основу развития Школы инженерного предпринимательства. Первый ректор задал направление эволюции инженерного образования за счет сочетания фундаментальности и одновременно практикоориентированности до того экосистемного формата, который сегодня взят на вооружение как лучшая бизнес-практика построения современного университета.

Современный отраслевой университет, которым позиционирует себя ПГУПС, является драйвером развития не только транспортной отрасли, но прежде всего — триггером мультипликативного эффекта в смежных отраслях. Синергетическая эффективность успешной деятельности отраслевого вуза выходит за пределы отрасли, проявляясь в трансформации облика региона нахождения, смежных рыночных ниш и в новых векторах развития Индустрии 4.0.

Вышеперечисленное предопределяет флагманские позиции формата инженерного предпринимательства в подготовке специалистов будущего, специалистов новой формации, которые будут способны управлять не только транспортными, но и любыми «умными» предприятиями Индустрии 4.0.

В 2021 г. в соответствии с Протоколом Координационного органа Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по вопросам формирования инновационной структуры в сфере высшего образования и дополнительного профессионального образования Университет получил статус Федеральной инновационной площадки «Школа инженерного предпринимательства» на 2022–2026 гг.

Кроме того, в том же 2021 г. ПГУПС одержал победу в федеральной программе стратегического академического лидерства «ПРИОРИТЕТ-2030», инициированной Минобрнауки России, и вошел в число 106 лучших вузов России.

Победы и достижения университета в 2021 г. повлияли на самопозиционирование экосистемы ПГУПС. Так, в программе развития ПГУПС до 2030 г. указано следующее: «Развитие на лабораторной, кадровой, кампусной и учебной инфраструктуре Университета инновационного формата взаимодействия научных и образовательных организаций, государственных и бизнес-структур — think tank (агрегатора идей) — как «колыбели новой предпринимательской активности», хаба ноу-хау и в качестве прикладного инструмента управления пространственным, кадровым, социальным и технологическим развитием территорий и транспортной отрасли России, в ответ на вызовы экономике России в целом и ее регионов в частности, для сбалансированного «подключения» образования, науки и бизнеса к глобальным инновациям в технополисе Университета, посредством интеграции и кооперации в собственной «карусели ноу-хау» научных, образовательных и индустри-

альных организаций». В целом эволюция экосистемы Университета ориентирована на кадровое, образовательное, научно-исследовательское, цифровое, кампусное, интеграционное, партнерское, междисциплинарное обеспечение социально-экономического развития территории присутствия Университета — Северо-Западного федерального округа, а также научно-технологического развития транспортной отрасли и региональной социально-экономической сферы в городе федерального значения Санкт-Петербурге и Ленинградской области как в субъектах Российской Федерации.

В связи с этим ПГУПС видит себя лидером в адаптации современного инженерного образования к реалиям рынка транспортно-логистических услуг, человеческого капитала и высокотехнологичного бизнеса, а именно:

- рост роли междисциплинарных исследований при возросшей стоимости передовых научных исследований;
- конкуренция со стороны вновь созданных вне университетов специализированных высококлассных научно-исследовательских организаций;
- требование к обеспечению высокой технологичности экономики знаний;
- повышение открытости корпоративных исследований и расширение сотрудничества с компаниями;
- рост инженерного и технологического предпринимательства в университетской среде.

ШИП тесно интегрирована в образовательную экосистему Университета. Будущие инженеры-инноваторы среди прочего проходят курсы «Инженерный маркетинг», «Коммерциализация бизнес идеи», «Организационная модель создания и управления бизнесом», направленные на получение навыков ведения переговоров и презентации продукта, управления стартапом и построения бизнеса. В рамках проекта в марте 2022 г. для школьников были проведены «Инженерные каникулы».

25 января 2022 г. в Центре инновационного развития ОАО «РЖД» в рамках деятельности первого студенческого бизнес-инкубатора на сети железных дорог были рассмотрены проекты, имеющие высокий потенциал для своего внедрения: автоматизация коммерческого осмотра вагонов с помощью нейронной сети, производство электропроводящего бетона, защита стеклянных панелей от грязи за счет создания на их поверхности электростатического поля.

В ходе реализации дорожной карты мероприятий ШИП заявлены встречи руководителей крупных предприятий со студентами, на которых будущие инженеры узнают «из первых уст» о том, как создать бизнес и получить прибыль, какие тенденции сейчас актуальны в сфере инженерных инноваций и какие направления исследований будут востребованы в краткосрочной и среднесрочной перспективе.

Только за первые четыре месяца года два заместителя гендиректора ОАО «РЖД», два руководителя дирекций, начальник Октябрьской железной дороги провели занятия со студентами, где будущим инженерам путей сообщения рассказали «из первых уст» о том, какие навыки необходимы для эффективного управления бизнесом и какие инновационные проекты реализуются в компании.

Кроме того, в текущем учебном году в рамках «Школы инженерного предпринимательства» будущие ученые-инноваторы смогут участвовать в практикуме «Бизнес-планирование и запуск start-up», деловой игре «Я — предприниматель», хакатоне «Сетевая безопасность бизнес-проектов» и других мероприятиях, направленных на формирование навыков коммерциализации и концепции значимости прогрессивных научных исследований, которые обеспечат реализацию стратегии развития инновационного потенциала России как в сфере железнодорожных перевозок, так и в сопредельных с ней отраслях.

Модель Школы инженерного предпринимательства ПГУПС

Цель проекта ШИП можно сформулировать так: «формирование инновационной научно-образовательной среды для подготовки специалистов, способных оценить рыночную перспективу нового продукта, организовать научные и опытно-конструкторские работы, производство и продажу нового продукта, имеющих профессиональные компетенции в сфере инженерного предпринимательства на основе современных цифровых технологий и обеспечения технологического прорыва в отрасли».

Пул основных функциональных задач развертывания ШИП на базе ПГУПС:

- генерация предпринимательских идей и создание инновационных бизнес-проектов;
- формирование предпринимательской культуры;
- организация работы проектных команд для реализации бизнес-проектов;
- площадка для взаимодействия молодых и опытных предпринимателей;
- создание устойчивых учебно-методических сетей внутри системы «Школа — техникум — университет — бизнес — послевузовское образование»;
- эволюция научно-педагогических школ для реализации новых форматов образовательного процесса, соответствующих темпам развития современного инженерного предпринимательства;
- формирование инновационной учебно-методической, лабораторной, тренажерной инфраструктуры вуза, релевантной современным темпам развития экономики;
- создание цифровой среды в сфере подготовки кадров для инженерного предпринимательства с развитием следующих компетенций: видение возможности технологического инновационного прорыва в цифровой экономике; инициация нового проекта в условиях технического

и технологического прорыва; установление и поддержание социальных связей и контактов; принятие решений в ситуации неопределенности и высокого риска; инновационное развитие для повышения капитализации бизнеса.

Концепция ПГУПС по созданию Школы инженерного предпринимательства «Бетанкур» (School of Engineering Entrepreneurship “Betancourt”) может быть достаточно описана следующими базовыми принципами:

1. Школа инженерного предпринимательства «Бетанкур» — часть инновационной инфраструктуры (среды, экосистемы), созданной в целях реализации дополнительных образовательных программ в сфере инженерного предпринимательства.
2. Программы реализуются в рамках дополнительного профессионального образования, преимущественно переподготовки, в формате «авторских классов».
3. Программы формируются набором нескольких блоков и модулей, в том числе на выбор обучающихся, что обеспечивает их гибкость и альтернативность по траектории освоения.
4. Основные методы: кейсы, ролевые и деловые игры, проблемные ситуации, тесты, опросники, дискуссионные площадки, проектные команды, специальные упражнения, проблемно-ориентированный поиск, консультационное и экспертное сопровождение разработки, активные методы, моделирующие ситуации коллективной деятельности и др.
5. Защита выпускной квалификационной работы представляет собой подведение итогов реализации (запуска) стартапа.
6. Проект реализуется при участии инновационных и высокотехнологичных компаний, в том числе заказчика.
7. Более 50 % аудиторных занятий проводят бизнесмены, руководители компаний, приглашенные специалисты-практики.
8. Девиз школы: “Bet on courage!” («Ставка на смелость!»)

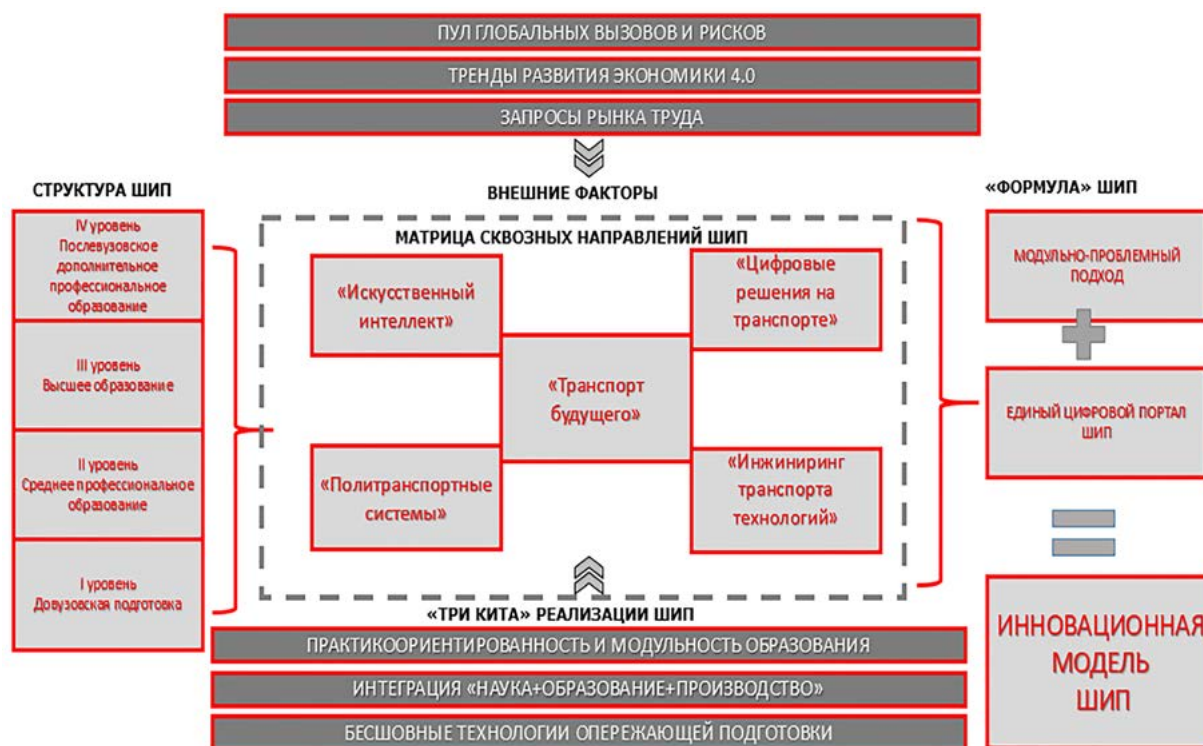


Рис. 2. Формирование инновационной модели «Школа инженерного предпринимательства» ПГУПС (составлен авторами)

Школа инженерного предпринимательства ПГУПС включает в себя довузовский, средний профессиональный, высший и дополнительный профессиональный уровни подготовки инженеров с предпринимательскими компетенциями. Инициатива ПГУПС по университетской ШИП включает в себя игровые assessment-технологии, модульное проектное обучение, интенсивы, деловые игры, бизнес-тренинги, хакатоны, бизнес-инкубатор, бизнес-акселератор и многое другое.

Следует особо отметить, что от темпов развития инженерного предпринимательства в отраслевом учебном заведении зависит и та скорость, с которой отечественная транспортная отрасль будет трансформироваться к следующим технологическим укладам.

Выпускник первого транспортного высшего учебного заведения России по итогам обучения в ШИП получает компетенции техностартера, спо-

собного организовать предпринимательскую деятельность не только в транспортной отрасли, но и в любой сфере экономики Индустрии 4.0. При этом место ШИП является интегрированным в инновационной инфраструктуре коммерциализации и трансфера знаний, рис. 2.

Как видно по рис. 2, формирование инновационного образовательного проекта «Школа инженерного предпринимательства» предполагает четырехуровневую структуру образовательных модулей, которая основана на «трех китах»: практикоориентированность и модульность образования, интегрированная цепочка «наука + образование + производство», бесшовные технологии опережающей подготовки. По всем из пяти сквозных направлений (треков) работы ШИП обучающиеся приобретают пул уникальных компетенций, позволяющих в ответ на глобальные вызовы, тренды развития цифровой экономики и

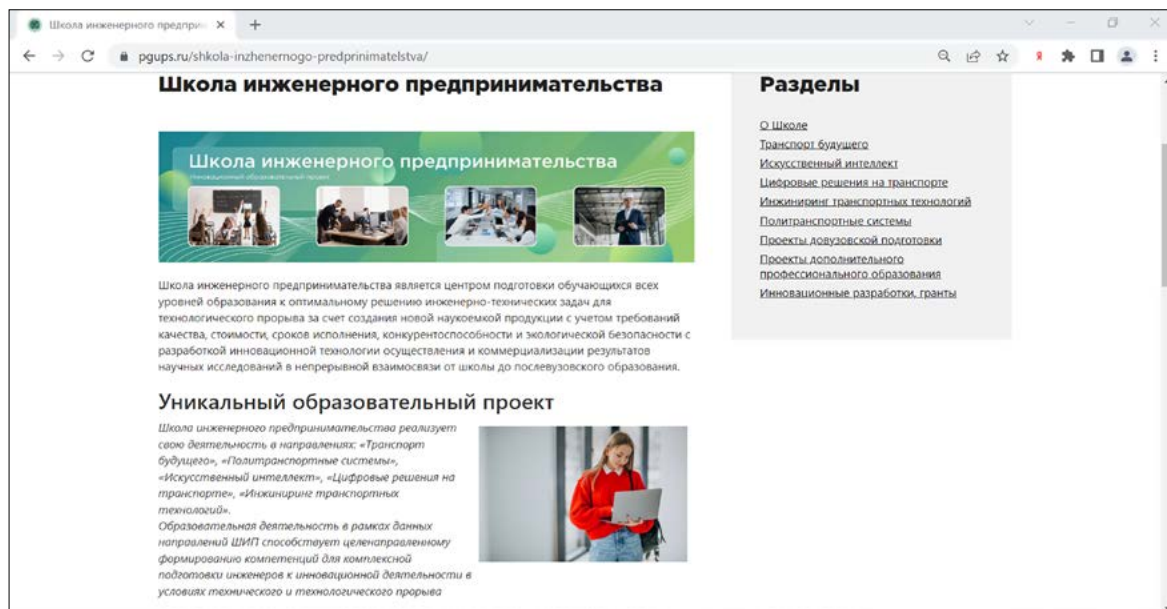
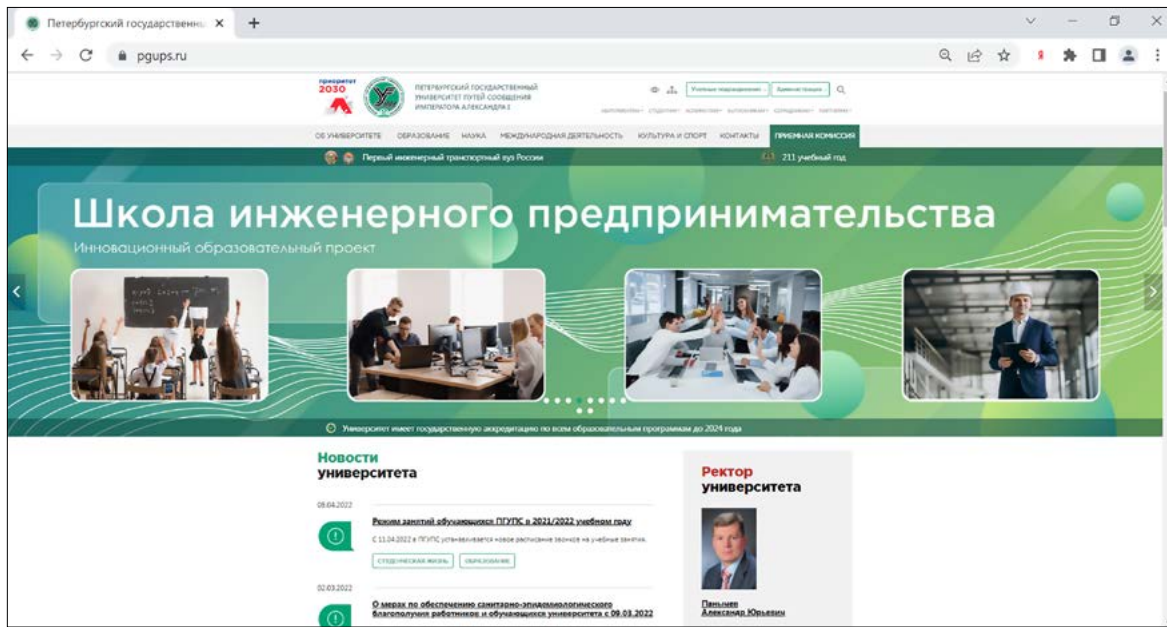


Рис. 3. Цифровой портал образовательного проекта «Школа инженерного предпринимательства» ПГУПС
 Источник: Официальный сайт ПГУПС: <https://www.pgups.ru/shkola-inzhenernogo-predprinimatelstva/>

рынка труда генерировать и запускать на рынок наукоемкие инновации для транспортного бизнеса и логистики.

Следует особо отметить, что в блоке «Довузовская подготовка» интегрирована также работа со школьниками, включая прежде всего приклад-

ную проектную работу с учащимися школ в формате «стартовый стол инноваций».

В текущем 2022 г. ПГУПС формирует с партнерами шестое сквозное направление функционирования ШИП — «Цифровая инженерия». Этот новый трек в ближайшем будущем станет

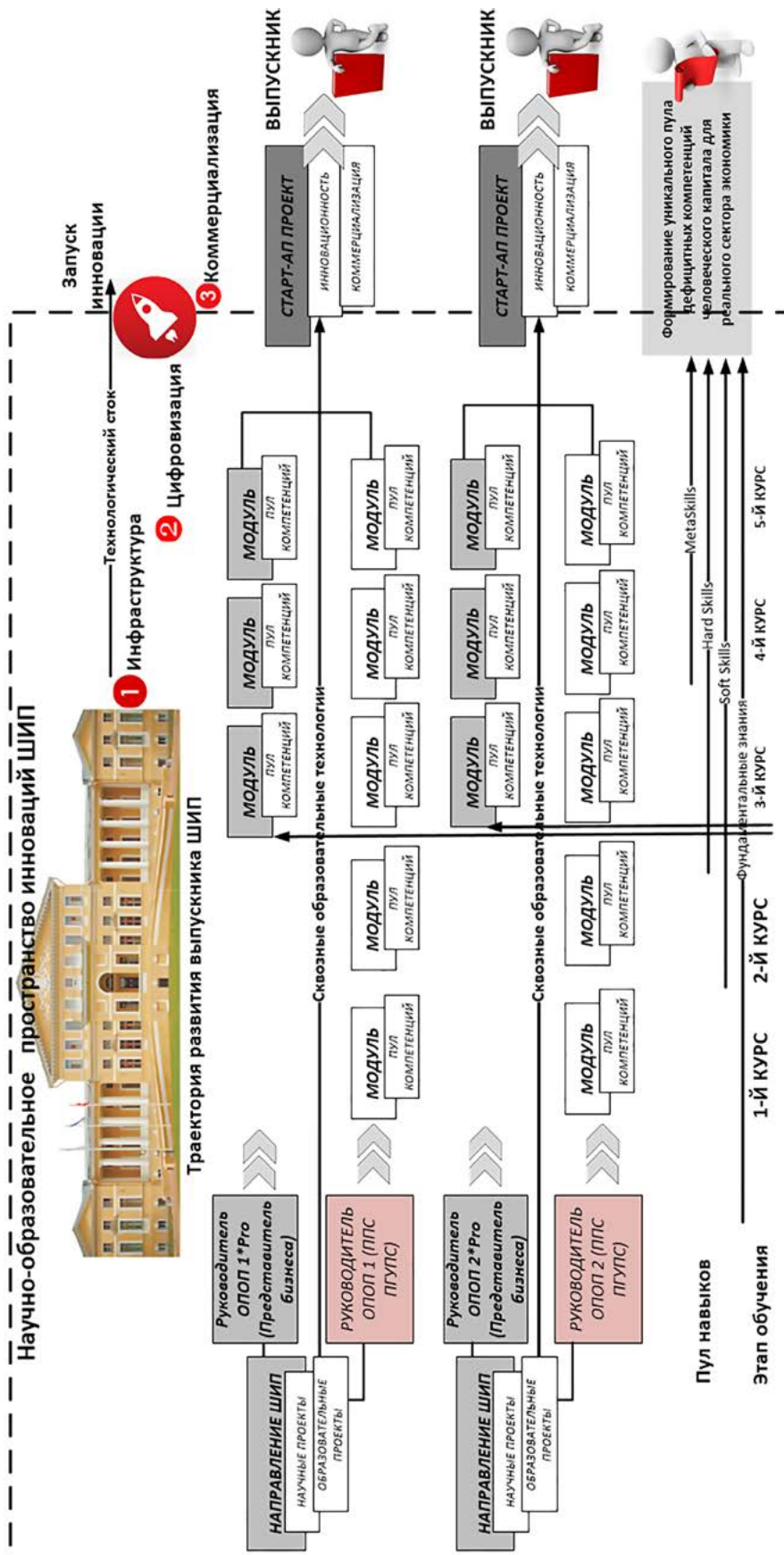


Рис. 4. Концепт инновационной модели ШИП ПГУПС (составлен авторами)

флагманским, поскольку для технологического суверенитета страны принципиально важны собственные кроссплатформенные цифровые решения во всех инженерных областях.

Позитивный опыт ПГУПС в открытии федеральной инновационной площадки «Школа инженерного предпринимательства» позволил сформулировать двухкомпонентную структуру инновационной модели ШИП: модульно-проблемный подход и единый цифровой портал (см. рис. 3).

На рис. 4 представлен концепт инновационной модели ШИП, реализованный ПГУПС.

Инновационная модель ШИП отличается включением к руководству образовательными программами руководителей из реального сектора экономики — успешных бизнесменов, топ-менеджеров из ведущих технологических компаний — партнеров вуза. При интеграции таких образовательных программ (ОПОП* Pro) с модульным пакетом основных образовательных программ (ОПОП) вуза под руководством профессорско-преподавательского состава у выпускников ШИП будет сформирован уникальный пул компетенций. Кроме того, в изображенной на рис. 4 инновационной модели показан технологический сток — запуск инноваций, готовых под ключ, в реальный бизнес. Это достигается за счет эволюции траекторий развития обучающегося в ШИП посредством комбинирования модулей обучения, имеющих как практикоориентированный, так и глубокий фундаментальный базис.

К ключевым отличительным элементам инновационной модели ШИП можно отнести интеграцию образования, науки и производства в рамках эволюции образовательных программ. При этом пул дополнительных компетенций, которые получает обучающийся, выглядит следующим образом:

– владение базовыми компетенциями исследовательской и инновационной деятельности за счет активного подключения к практикам реального бизнеса;

– способность активно сотрудничать с реальным сектором цифровой экономики по «технологическому стоку» и генерации коммерчески пригодных инноваций;

– интегрированный образовательный подход, включающий в себя модульность и проблемность при формировании образовательных программ в системе непрерывного образования для управления уникальными качествами человеческого капитала, востребованного на современном рынке труда [18].

Надо полагать, что работа ШИП обеспечит глубину теоретической подготовки обучающихся и развитие актуальных для отрасли и уникальных для рынка человеческого капитала практических навыков: умение работать в команде, творчески и критически мыслить, развивать и применять личностные лидерские качества; а также способностей: решать сложные профессиональные задачи инноватики в условиях ограничений, выбирать соответствующие методы и разрабатывать программу исследования, создания и «запуска» нового продукта/услуги, использовать информационные ресурсы и цифровые навыки для решения изобретательских и профессиональных задач, принимать обоснованные решения в нестандартных ситуациях, найти рациональные решения и предложить новые наукоемкие продукты под ключ.

Характеристика Школы инженерного предпринимательства ПГУПС

В рамках отраслевого вуза ПГУПС рассматривает ШИП как инструмент и формат трансформации инвестиционно привлекательных интеллектуальных и человеческих ресурсов в специфические активы высокотехнологичных партнеров на основе так называемых knowledge-intensive идей для повышения максимальной стоимости и эффективности работы высокотехнологичной компании-партнера в Индустрии 4.0.

Характеристика ключевых треков ШИП

| № п/п | Наименование трека | Характеристика трека | Функциональные задачи реализации трека |
|-------|--------------------------------------|--|---|
| 1 | «Транспорт будущего» | Проектирование транспортно-логистических объектов, инфраструктурные решения, планирование устойчивого развития транспортных компаний, опережающие транспортные технологии и продукты. В рамках направления обучающиеся участвуют в проектировании транспортно-логистических объектов, принимают инфраструктурные решения, планируют устойчивое развитие транспортных компаний, предлагают опережающие транспортные технологии и продукты | – разработка и сопровождение реализации новых транспортных продуктов, обеспечивающих конкурентное преимущество в процессе непрерывного инновационного развития экономики; – проектирование транспортно-логистических объектов, инфраструктурные решения, планирование устойчивого развития транспортных компаний, опережающие транспортные технологии и продукты |
| 2 | «Искусственный интеллект» | Создание эффективной платформы для решения современных прикладных задач на транспорте, преодоления различных неопределенностей и рисков функционирования логистических систем | – реализация перевозочного процесса на современном инновационном уровне на основе внедрения беспилотных технологий, совершенствования методов управления и организации движения; – создание платформы для решения прикладных задач на транспорте, преодоления различных неопределенностей и рисков функционирования логистических систем |
| 3 | «Цифровые решения на транспорте» | | Для реализации трека используется пул уникальных основных профессиональных программ подготовки инженеров и переподготовки специалистов для ОАО «РЖД»: – в рамках цифровой компетенции «Анализ больших данных (Big Data) и машинное обучение»: технология работы с большими данными, применение технологий обработки, хранения и анализа big data в сфере транспорта; – в рамках цифровой компетенции «Технологии виртуальной и дополненной реальности (VR/AR технологии)»: основные этапы технологии проектирования VR/AR продукта. Цифровизация транспортно-логистических услуг на основе применения технологии дополненной реальности; – в рамках цифровой компетенции «Системы распределенного реестра (Blockchain)»: архитектура блокчейн-проектов; сферы применения и тренды; – в рамках цифровой компетенции «Новые производственные технологии»: Smart Design (Digital Twin, BIM — проектирование); – в рамках цифровой компетенции «Нейротехнологии и искусственный интеллект»: технологии сенсорномоторной координации и пространственного позиционирования |
| 4 | «Инжиниринг транспортных технологий» | Формирование у обучающихся компетенций, обеспечивающих реализацию всех фаз жизненного цикла разработки транспортных продуктов и инноваций, включая коммерциализацию идей, а также получение навыков разработки проектов строительного, эксплуатационного, международного и компьютерного инжиниринга | – интеграция новых разработок в производство; – повышение объема внебюджетного финансирования исследовательских работ; – инновационное развитие проектно-технологической, инженерной и научной инфраструктуры |

| № п/п | Наименование трека | Характеристика трека | Функциональные задачи реализации трека |
|-------|----------------------------|--|---|
| 5 | «Политранспортные системы» | Передовые решения в области политранспортных систем позволяют достичь высокой экономичности технического обслуживания, ремонта и мониторинга железных дорог, а также формирование инструментария единой транспортно-логистической системы, интегрированной в инфраструктуру транспортных коридоров | – формирование инструментария единой транспортно-логистической среды, интегрированной в инфраструктуру транспортных коридоров и систем; – создание и реализация проектов, направленных на повышение эффективности взаимодействия различных видов транспорт |
| 6 | «Цифровая инженерия» * | Формирование у обучающихся навыков свободного оперирования техническими устройствами как в реальном физическом мире, так их цифровыми «образами»: данными, цифровыми проектами, техническими видеоизображениями, объектами виртуальной реальности | – разработка четкой цифровой стратегии и всех бизнес-процессов: распределения ресурсов, моделей доставки, управления проектами и поддержки команды, создания новых возможностей для бизнеса и конкурентоспособных ценностей для клиентов |

*Запуск трека в 2022 г.

Тренинг предпринимательских компетенций активизирует вовлечение молодежи в инженерное предпринимательство, попробовать себя в роли предпринимателя и прокачать свои hard- и soft-навыки.

По сути, ШИП является «фабрикой» инновационных технологических идей и гипотез о новых бизнесах, инструментарий «вывода» инноваций и разработок в реальный сегмент экономики.

Школа инженерного предпринимательства ПГУПС — это уникальный образовательный проект, реализующий свою деятельность по следующим трекам: «Транспорт будущего», «Политранспортные системы», «Искусственный интеллект», «Цифровые решения на транспорте», «Инжиниринг транспортных технологий» и «Цифровая инженерия».

Образовательная деятельность в рамках данных направлений ШИП способствует целенаправленному формированию компетенций для комплексной подготовки инженеров к инновационной деятельности в условиях технического и технологического прорыва.

1. «Транспорт будущего» — разработка и сопровождение реализации новых транспортных продуктов, обеспечивающих конкурентное пре-

имущество в процессе непрерывного инновационного развития экономики.

2. «Искусственный интеллект» — реализация перевозочного процесса на современном инновационном уровне на основе внедрения беспилотных технологий.

3. «Цифровые решения на транспорте» — для повышения конкурентоспособности отрасли транспорта и логистики, играющей ключевую роль в развитии экономики страны как в ближайшей, так и в отдаленной перспективе.

4. «Инжиниринг транспортных технологий» — реализация всех фаз жизненного цикла разработки транспортных инноваций и коммерциализации идей. Они приобретают навыки проектов строительного, эксплуатационного, международного и компьютерного инжиниринга.

5. «Политранспортные системы» — формирование инструментария единой транспортно-логистической среды, интегрированной в инфраструктуру транспортных коридоров и систем. Проекты повышения эффективности взаимодействия различных видов транспорта, отвечающих современным требованиям и обеспечивающих сбалансированное наращивание транспортно-логистического потенциала страны.

6. «Цифровая инженерия» (с 2022 г.) — создание уникального инструментария для цифрового организационно-технологического дизайна и оптимизации производственно-логистических процессов и режимов работы отраслей экономики путем интеграции физической и виртуальной реальности. Создание непрерывной цепочки инноваций и конкурентного позиционирования развивается вместе с потребностями клиентов и новыми техническими и технологическими возможностями.

В таблице приведена краткая характеристика обозначенных треков работы ШИП.

Заключение. Опыт ПГУПС в создании ШИП

Обеспечение интеллектуального превосходства и технологического суверенитета отечественной транспортной отрасли может и должно быть достигнуто за счет подготовки инженерной элиты, обладающей предпринимательскими компетенциями для быстрого притока инноваций в российскую транспортно-логистическую экосистему.

Реализация инновационных идей и создание технологий будущего невозможны без базовой инженерной подготовки с одной стороны и компетенций инженерного предпринимательства с другой. В современном мире недостаточно просто предложить инженерную идею. Для ее полноценного трансфера в реальный сектор экономики необходимы инженеры-исследователи, способные разработать и коммерциализировать результаты актуальных для бизнеса научных исследований.

Развитие ШИП позволит ПГУПС обеспечить практико-ориентированную подготовку высококвалифицированных специалистов в области инновационных, коммерчески готовых инженерных решений для высокотехнологичных компаний, а также создать условия для непрерывного профессионального самосовершенствования, развития социально-личностных компетенций

специалистов, расширения социальной мобильности и конкурентоспособности на глобальном рынке человеческого капитала.

В свою очередь, современный отраслевой университет, каким и является Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, может и должен выступать в качестве think-tank — «интеллектуального хаба» для выполнения приоритетных научно-технических и инновационно-технологических задач отрасли и компаний — промышленных партнеров непосредственно в инновационном поясе вуза.

Создание федеральной инновационной площадки на базе ПГУПС — это импульс к появлению в образовательном пространстве транспортной отрасли центра, консолидирующего интеллектуальный потенциал выпускников различных специальностей и направлений, способных эффективно управлять технико-технологическими процессами в отрасли и элементами цифровой экосистемы транспорта и логистики.

Как показывает опыт ПГУПС, залогом успешного развития инженерного предпринимательства в современном вузе является соблюдение трех необходимых и достаточных условий:

1) исследовательская инфраструктура и комфортные условия для генерации трансфера научных достижений в бизнес;

2) наличие механизма взаимодействия (финансового, коммуникационного, научно-исследовательского) по созданию прорывных сквозных технологий с высокотехнологичными компаниями — промышленными партнерами финансирования;

3) развитый хаб ноу-хау, основанный на использовании инновационного пояса и научно-образовательного потенциала вуза.

Ключевым назначением Школы инженерного предпринимательства является подготовка интеллектуальной элиты по образовательным модулям

предпринимательства, инженерного и изобретательского творчества обучающихся с формированием уникального пула компетенций по организации и управлению полным жизненным циклом проектов, инноваций и высокотехнологичным производством.

В облике современного Университета появляются новые компоненты, определяющие формат подготовки специалистов будущего: открытые образовательные платформы («университет для миллиарда»); персонализация и технологизация траекторий развития личности; цифровизация; пространство самоорганизации и саморазвития.

Современный университет 4.0 — это пространство для генерации инноваций в цифровом интернациональном поле коммуникаций, включающий в свой состав обеспечивающую эту коммуникацию инфраструктуру, и взаимосвязанных элементов, способных в бизнес-модели науки, образования и Индустрии 4.0 к саморазвитию.

В данном исследовании подведены некоторые итоги уникального опыта ПГУПС как отраслевого транспортного вуза по созданию в научно-образовательной экосистеме университета Школы инженерного предпринимательства.

Таким образом, можно полагать, что научно-образовательная экосистема, созданная в ПГУПС, позволяет сфокусировать вектор развития первого в России транспортного вуза на создании и продвижении новых инновационных технологий в сферах внедрения технологий искусственного интеллекта, инжиниринга транспортных технологий, цифровых решений на транспорте и разработки экосистемы транспорта будущего.

Библиографический список

1. Национальный доклад «Высокотехнологичный бизнес в регионах России» 2020. — URL: <https://roscongress.org/materials/natsionalnyy-doklad-vysokotekhnologichnyy-biznes-v-regionakh-rossii-2020/> (дата обращения: 01.05.2022).
2. Инженерные школы и технологическое предпринимательство вошли в список стратегических инициатив, утвержденных Правительством. — URL: https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/?ELEMENT_ID=40974 (дата обращения: 01.05.2022).
3. Я — профессионал. Технологическое предпринимательство. — URL: https://yandex.ru/profi/courses2021/technology_business (дата обращения: 01.05.2022).
4. Университеты 4.0. — URL: https://business-magazine.online/fn_17960.html (дата обращения: 01.05.2022).
5. Виссема Й. Г. Университет третьего поколения / Й. Г. Виссема. — М.: Олимп-Бизнес, 2016. — 480 с.
6. Moore J. F. Predators and Prey: A New Ecology of Competition / J. F. Moore // Harvard Business Review. — 1993. — Vol. 71. — № 3. — Pp. 75–86.
7. Olsson H. H. Strategic Ecosystem Management: A Multi-case Study on Challenges and Strategies for Different Ecosystem Types / H. H. Olsson, J. Bosch. — 2015 41st Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications, Madeira, Portugal. — 2015. — Pp. 398–401. — DOI: 10.1109/SEAA.2015.44.
8. Киселев И. П. Общепольное для России учреждение: 100 фактов из истории Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I / И. П. Киселев, А. Ю. Паньчев, В. В. Фортунатов. — СПб., 2017. — 128 с.
9. Паньчев А. Ю. Экосистема университета третьего поколения в условиях глобальной цифровизации / А. Ю. Паньчев, О. Д. Покровская // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. — СПб.: ПГУПС, 2021. — С. 74–77.
10. Паньчев А. Ю. Бизнес-экосистемы в транспортном образовании: специфика и потенциал / А. Ю. Паньчев, О. Д. Покровская // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. — СПб.: ПГУПС, 2021. — С. 77–80.
11. Паньчев А. Ю. Современные тренды в концепте эволюции экосистемы транспортного университета / А. Ю. Паньчев, О. Д. Покровская // Техник транспорта: образование и практика. — 2021. — Т. 2. — № 2. — С. 128–146. — DOI: 10.46684/2687-1033.2021.2.128-146

12. Arora A. Markets for Technology and Their Implications for Corporate Strategy / A. Arora, A. Fosfuri, A. Gambardella // SSRN. — 2000. — URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.204848>.

13. Hicks D. Highly Innovative Small Firms in the Market for Technology: Working Paper № 4 / D. Hicks, D. Hegde // CiteSeerX. — 2005. — URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.93.9394&rep=rep1&type=pdf>

14. Etzkowitz H. Rethinking development: circulation in the triple helix / H. Etzkowitz, J. Dzisah // *Technology Analysis & Strategic Management*. — 2008. — Vol. 20. — № 6.

15. Ефимов В. С. Университет 4.0: философско-методологический анализ / В. С. Ефимов, А. В. Лаптева // *Университетское управление: практика и анализ*. — 2017. — № 21(1). — Pp. 16–29. — URL: <https://doi.org/10.15826/umpa.2017.01.002>.

16. Фадеев А. С. Модель университета 4.0 / А. С. Фадеев, О. А. Змеев, Т. Т. Газизов // *Научно-педагогическое обозрение (Pedagogical Review)*. — 2020. — Вып. 2(30). — С. 172–178. — DOI: 10.23951/2307-6127-2020-2-172-178.

17. Тихомирова О. Г. Технологическое предпринимательство и инновационные образовательные технологии в цифровой экономике / О. Г. Тихомирова // *Вестник*

Алтайской академии экономики и права. — 2019. — № 11-1. — С. 162–167.

18. Хайруллина М. В. Технологическое предпринимательство: сдерживающие факторы и условия развития / М. В. Хайруллина // *Российское предпринимательство*. — 2016. — Т. 17. — № 16. — С. 1831–1848. — DOI: 10.18334/rp.17.16.36402.

Дата поступления: 04.05.2022

Решение о публикации: 18.05.2022

Контактная информация:

ПАНЫЧЕВ Александр Юрьевич — канд. экон. наук, ректор; rector@pgups.ru

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна — д-р техн. наук, и. о. заведующего кафедрой «Управление эксплуатационной работой»; pokrovskaya@pgups.ru

БЛАЖКО Людмила Сергеевна — д-р техн. наук, первый проректор — проректор по учебной работе; blazhko@pgups.ru

САЦУК Татьяна Павловна — д-р экон. наук, начальник Учебного управления; uu@pgups.ru

ДРОЗДОВА Мария Александровна — канд. юрид. наук, заместитель начальника Учебного управления; drozdova@pgups.ru

The School of Engineering Entrepreneurship as a Basis of the Fourth Generation Transport University Image

A. Yu. Panychev, O. D. Pokrovskaya, L. S. Blazhko, T. P. Satsuk, M. A. Drozdova

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

For citation: Panychev A. Yu., Pokrovskaya O. D., Blazhko L. S., Satsuk T. P., Drozdova M. A. The School of Engineering Entrepreneurship as a Basis of the Fourth Generation Transport University Image // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 161–181. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-161-181

Summary

Purpose: To describe the first results of a unique experience of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS) as a branch transport university where there has been created a school of engineering entrepreneurship in the university scientific-educational ecosystem. **Methods:** System analysis of open sources of the Internet and of

PGUPS development program till 2030; as well as ecosystem, modular and project approaches for organizing the work of engineering entrepreneurship school. **Results:** The study shows that the search for effective formats for the development of human capital becomes particularly relevant in ensuring national technological sovereignty, and the creation of an engineering entrepreneurship school on a university basis as a new format for generating and integrating innovations is a time dictate. The key purpose of an engineering entrepreneurship school is an intellectual elite preparation by educational modules of entrepreneurship, engineering and inventive creativity of students with the formation of a unique pool of competencies in organization and management of full lifecycle of projects, innovations and high-tech production. It is noted that a branch university image is transformed into an ecosystem capable of creating a unique entrepreneurial space for involving students, employees and industrial partners into their own know-how hub. **Practical significance:** The application and subsequent scaling of the unique experience of PSUPS as a branch university will allow to pursue outrunning training of human capital with expanded scarce competencies and will form growth points in the competitiveness of transport education in modern Industry 4.0.

Keywords: School of engineering entrepreneurship, ecosystem, transport university, innovative educational project, Industry 4.0, University 4.0.

References

1. *Natsional'nyy doklad «Vysokotekhnologichnyy biznes v regionakh Rossii» 2020* [National report “High-tech business in the regions of Russia” 2020]. Available at: <https://roscongress.org/materials/natsionalnyy-doklad-vysokotekhnologichnyy-biznes-v-regionakh-rossii-2020> (accessed: May 01, 2022). (In Russian)
2. *Inzhenernye shkoly i tekhnologicheskoe predprinimatel'stvo voshli v spisok strategicheskikh initsiativ, utverzhdennykh Pravitel'stvom* [Engineering schools and technological entrepreneurship are included in the list of strategic initiatives approved by the Government]. Available at: https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/?ELEMENT_ID=40974 (accessed: May 01, 2022). (In Russian)
3. *Ya – professional. Tekhnologicheskoe predprinimatel'stvo* [I am a professional. Technological entrepreneurship]. Available at: https://yandex.ru/profi/courses2021/technology_business (accessed: May 01, 2022). (In Russian)
4. *Universitety 4.0* [Universities 4.0]. Available at: https://business-magazine.online/fn_17960.html. (accessed: May 01, 2022). (In Russian)
5. Vissema Y. G. *Universitet tret'ego pokoleniya* [Third Generation University]. Moscow: Olimp-Biznes Publ., 2016. 480 p. (In Russian)
6. Moore J. F. Predators and Prey: A New Ecology of Competition. *Harvard Business Review*. 1993, vol. 71, I. 3, pp. 75–86.
7. Olsson H. H., Bosch J. Strategic Ecosystem Management: A Multi-case Study on Challenges and Strategies for Different Ecosystem Types. 2015 41st Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications. Madeira, Portugal, 2015, pp. 398–401. DOI: 10.1109/SEAA.2015.44.
8. Kiselev I. P., Panychev A. Yu., Fortunatov V. V. *Obshchepoleznoe dlya Rossii uchrezhdenie: 100 faktov iz istorii Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I* [A generally useful institution for Russia: 100 facts from the history of the St. Petersburg State University of Communications of Emperor Alexander I]. St. Petersburg, 2017. 128 p. (In Russian)
9. Panychev A. Yu., Pokrovskaya O. D. *Ekosistema universiteta tret'ego pokoleniya v usloviyakh global'noy tsifrovizatsii* [The ecosystem of the third generation university in the conditions of global digitalization]. *III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum* [III Betancourt International Engineering Forum]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2021, pp. 74–77. (In Russian)
10. Panychev A. Yu., Pokrovskaya O. D. *Biznes-ekosistemy v transportnom obrazovanii: spetsifika i potentsial* [Business ecosystems in transport education: specificity and potential]. *III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum* [III Betancourt International Engineering Forum]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2021, pp. 77–80. (In Russian)

11. Panychev A. Yu., Pokrovskaya O. D. *Sovremennye trendy v kontsepte evolyutsii ekosistemy transportnogo universiteta* [Modern trends in the concept of the ecosystem evolution of a transport university]. *Tekhnika transporta: obrazovanie i praktika* [Transport technician: education and practice]. 2021, vol. 2, I. 2, pp. 128-146. DOI: 10.46684/2687-1033.2021.2.128-146. (In Russian)
12. Arora A., Fosfuri A., Gambardella A. *Markets for Technology and Their Implications for Corporate Strategy*. SSRN. 2000. Available at: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.204848>
13. Hicks D., Hegde D. *Highly Innovative Small Firms in the Market for Technology: Working Paper I. 4*. CiteSeerX. 2005. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.93.9394&rep=rep1&type=pdf>
14. Etzkowitz H., Dzisah J. *Rethinking development: circulation in the triple helix*. *Technology Analysis f& Strategic Management*. 2008, vol. 20, I. 6.
15. Efimov V. S., Lapteva A. V. *Universitet 4.0: filosofsko-metodologicheskii analiz. Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz* [University 4.0: philosophical and methodological analysis. University management: practice and analysis]. 2017, I. 21(1), pp. 16-29. <https://doi.org/10.15826/umpa.2017.01.002>. (In Russian)
16. Fadeev A. S., Zmeev O. A., Gazizov T. T. *Model' universiteta 4.0* [University model 4.0]. *Nauchno-pedagogicheskoe obozrenie* [Scientific and Pedagogical Review]. 2020, I. 2 (30), pp. 172-178. DOI:10.23951/2307-6127-2020-2-172-178. (In Russian)
17. Tikhomirova O. G. *Tekhnologicheskoe predprinimatel'stvo i innovatsionnye obrazovatel'nye tekhnologii v tsifrovoy ekonomike* [Technological entrepreneurship and innovative educational technologies in the digital economy]. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava* [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law]. 2019, I. 11-1, pp. 162-167. (In Russian)
18. Khayrullina M. V. *Tekhnologicheskoe predprinimatel'stvo: sderzhivayushchie faktory i usloviya razvitiya* [Technological Entrepreneurship: Constraints and Conditions for Development]. *Rossiyskoe predprinimatel'stvo* [Russian Journal of Entrepreneurship]. 2016, vol. 17, I. 16, pp. 1831-1848. DOI: 10.18334/rp.17.16.36402. (In Russian)

Received: May 04, 2022

Accepted: May 18, 2022

Author's information:

Alexander Yu. PANYCHEV — PhD in Economics, Rector; rector@pgups.ru

Oksana D. POKROVSKAYA — D. Sci. in Engineering, Acting Head of the Department “Operational Work Management”; pokrovskaya@pgups.ru

Lyudmila S. BLAZHKO — D. Sci. in Engineering, First Vice-Rector — Vice-Rector for Academic Affairs; blazhko@pgups.ru

Tatiana P. SATSUK — D. Sci. in Economics, Head of the Educational Department; uu@pgups.ru

Maria A. DROZDOVA — PhD in Law, Deputy Head of the Educational Department; drozdova@pgups.ru

УДК 629.423.1

Оценка долговечности и рациональное крепление кожуха зубчатой передачи к тяговому двигателю электровоза

А. Г. Андриевский¹, Е. А. Чабан¹, В. В. Москвичев²

¹Красноярский институт железнодорожного транспорта, филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, Российская Федерация, 660028, Красноярск, ул. Новой Зари, 2И

²Красноярский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, Российская Федерация, 660049, Красноярск, пр. Мира, 53

Для цитирования: Андриевский А. Г., Чабан Е. А., Москвичев В. В. Оценка долговечности и рациональное крепление кожуха зубчатой передачи к тяговому двигателю электровоза // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 182–192.

DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-182-192

Аннотация

Цель: Исследовать зависимость нагруженности кожуха зубчатой передачи электровоза от параметров его крепления к тяговому двигателю. Определить собственные частоты колебаний при различных условиях его крепления к тяговому двигателю. Предложить техническое решение, позволяющее снизить нагруженность кожуха зубчатой передачи в случае нештатной работы его крепления к тяговому двигателю. Предложить алгоритм расчета ресурса кожуха с учетом параметров его крепления. **Методы:** Значения собственных частот кожуха зубчатой передачи получены путем решения системы дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода. Созданная с этой целью математическая модель рассматриваемой механической системы учитывает упругий характер крепления кожуха к тяговому двигателю. **Результаты:** Показано влияние условий и параметров крепления кожуха зубчатой передачи к тяговому двигателю на его нагруженность, и соответственно, ресурс. Предложен алгоритм расчета ресурса кожуха зубчатой передачи с учетом условий и параметров его крепления. Показано существенное влияние на долговечность кожуха нештатных режимов нагружения. **Практическая значимость:** Предложено конструктивное решение, снижающее нагруженность кожуха зубчатой передачи в случае возникновения нештатных условий закрепления к тяговому двигателю. Разработан алгоритм оценки долговечности КЗП в случае перераспределения нагрузок между его опорными точками.

Ключевые слова: Кожух зубчатой передачи, болтовое крепление, динамика кожуха, нагруженность, динамическая нагруженность, долговечность.

Введение

Динамико-прочностные свойства кожуха тяговой зубчатой передачи (КЗП) в процессе эксплуатации грузового электровоза во многом зависят от его условий крепления к тяговому двигателю [1, 2].

Сварная конструкция КЗП нагружена собственным весом, динамическими эксплуатационными нагрузками и реакциями опор его крепления к тяговому двигателю. Очевидно, что величина опорных реакций и динамико-прочностные свой-

ства конструкции КЗП находятся в зависимости от количества и взаимного расположения точек его крепления к тяговому двигателю — отсюда следует необходимость разработки рационального подхода к выбору условий его закрепления, который должен быть отражен в соответствующей методике.

Традиционно в машиностроении различают проектировочные и поверочные прочностные расчеты [3]. Основной задачей проектировочных расчетов является выбор материала и геометрических размеров детали, а поверочных расчетов — определение возникающих максимальных напряжений при уже заданных размерах детали и их сравнение с допускаемым напряжением для используемого материала.

Задача определения количества и взаимного расположения точек крепления КЗП к тяговому двигателю включает как проектировочные, так и поверочные прочностные расчеты. При этом требуется определить количество точек крепления КЗП и их геометрические параметры взаимного расположения, после чего проверить прочность сварной коробчатой конструкции КЗП с учетом сложившихся новых условий нагружения.

Влияние параметров крепления КЗП к тяговому двигателю на его нагруженность

Параметры крепления КЗП к тяговому двигателю определяют нагруженность его сварной конструкции как при статическом, так и динамическом нагружении. Причем динамическое нагружение будет являться определяющим для усталостной прочности кожуха.

В практике машиностроения количество и диаметр болтов группового болтового соединения выбирают из условия их прочности при соблюдении критерия нераскрытия стыка. Однако если количество и взаимное положение болтов не задано и его нужно определить, то при этом следует руко-

водствоваться таким критерием, как коэффициент динамичности колебательной системы, обусловленной колебаниями закрепленной массы КЗП, возбуждаемые инерционными силами колеблющегося корпуса тягового двигателя по всей цепочке передачи внешних возмущений. Такие параметры, как жесткость точки крепления, их количество и расстояния, задающие взаимное расположение точек крепления, влияют на собственные частоты закрепленного к тяговому двигателю КЗП [1].

Таким образом, если принять во внимание упругий характер смещения КЗП в вертикальной плоскости при движении локомотива по неровностям пути, то можно получить расчетную схему, позволяющую определить собственные частоты рассматриваемой механической системы (рис. 1). Так как крепление КЗП не предусматривает специальных устройств для рассеивания энергии колебаний [4, 5], то силами сопротивления при нахождении собственных частот можно пренебречь.

Рассматривались три варианта закрепления КЗП к тяговому двигателю: штатное крепление — крепление кожуха при помощи трех болтов, применяемое на сегодняшний день при эксплуатации локомотивов (рис. 1, *a*); крепление с двумя точками — крепление кожуха при помощи двух болтов, выявляемое при эксплуатации локомотивов в случае отказа болтового соединения кронштейна (рис. 1, *б*); крепление четырьмя точками — крепление кожуха при помощи четырех болтов с целью исследования возможности усиления закрепления конструкции (рис. 1, *в*).

Данная механическая система имеет две степени свободы, для которой в качестве обобщенных координат приняты z — вертикальное перемещение КЗП, и φ — угол поворота КЗП. Для определения собственных частот кожуха можно составить два дифференциальных уравнения Лагранжа второго рода:

$$m\ddot{z} + c_1z + \varphi c_2 = 0; \quad (1)$$

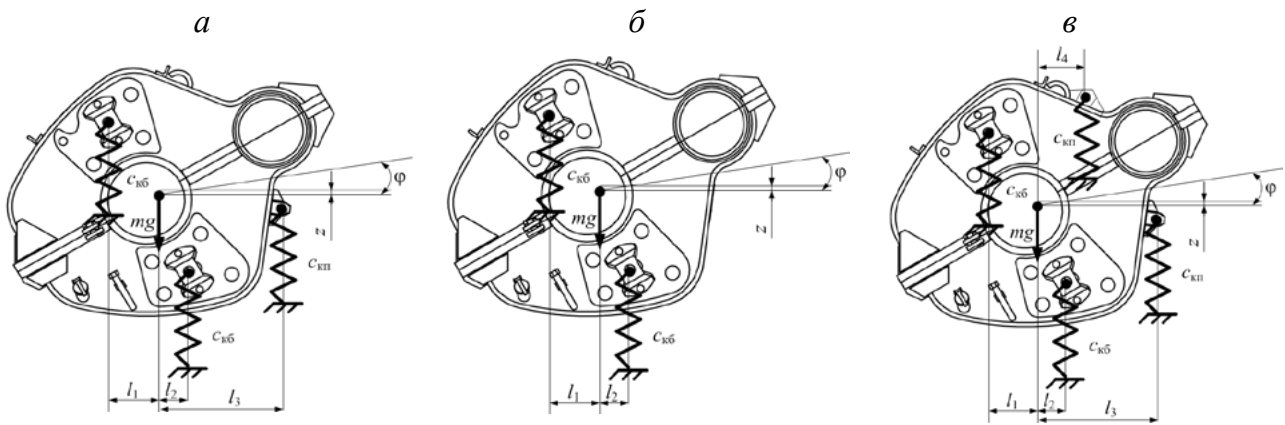


Рис. 1. Расчетные схемы колебаний КЗП для различных условий крепления: штатное крепление (а), с двумя точками крепления (б), с четырьмя точками крепления (в)

Расчет собственных частот колебаний КЗП

| Расчетная схема | Значения жесткостей, кН/м | | Значение собственных частот колебаний КЗП, c^{-1} | |
|-----------------|---------------------------|----------|---|------------|
| | $c_{к6}$ | $c_{кп}$ | ω_1 | ω_2 |
| Рис. 1 (а) | 38 900 | 14 000 | 772,762 | 335,82 |
| Рис. 1 (б) | 38 900 | 14 000 | 714,207 | 236,188 |
| Рис. 1 (в) | 38 900 | 14 000 | 834,829 | 364,879 |

$$I_c \ddot{\varphi} + \varphi c_3 + z c_2 = 0, \quad (2)$$

где m — масса КЗП; I — момент инерции КЗП относительно оси, проходящей через его точку центра тяжести перпендикулярно плоскости его движения; c_1 , c_2 и c_3 — коэффициенты, зависящие от условий закрепления, l_1 , l_2 , l_3 и l_4 — расстояния от центра тяжести КЗП до точек его крепления.

Коэффициенты c_1 , c_2 , c_3 , зависящие от количества точек крепления и их жесткости, а также от взаимного расположения точек крепления КЗП, можно определить по формулам:

для расчетной схемы рис. 1 (а):

$$c_1 = 2c_{к6} + c_{кп}; \quad (3)$$

$$c_2 = c_{к6}(l_2 - l_1) + c_{кп}l_3; \quad (4)$$

$$c_3 = c_{к6}(l_1^2 + l_2^2) + c_{кп}l_3^2. \quad (5)$$

для расчетной схемы рис. 1 (б):

$$c_1 = 2c_{к6}; \quad (6)$$

$$c_2 = c_{к6}(l_2 - l_1); \quad (7)$$

$$c_3 = c_{к6}(l_1^2 + l_2^2). \quad (8)$$

для расчетной схемы рис. 1 (в):

$$c_1 = 2c_{к6} + 2c_{кп}; \quad (9)$$

$$c_2 = c_{к6}(l_2 - l_1) + c_{кп}(l_3 + l_4); \quad (10)$$

$$c_3 = c_{к6}(l_1^2 + l_2^2) + c_{кп}(l_3^2 + l_4^2). \quad (11)$$

Здесь $c_{кб}$ — жесткость в точке крепления бобышка КЗП — кронштейн тягового двигателя; $c_{кп}$ — жесткость в точке крепления кронштейн КЗП — подшипниковый щит тягового двигателя.

Собственные частоты колебаний КЗП подпрыгивания и крутильные можно определить по формуле:

$$\omega = \sqrt{\frac{I_c c_1 + c_3 m \pm \sqrt{(I_c c_1 + c_3 m)^2 - 4 I_c m (c_1 c_3 - c_2^2)}}{2 I_c m}} \quad (12)$$

Согласно полученным результатам расчетов для рассматриваемых жесткостей крепления КЗП (таблица) наименьшая жесткость соответствует случаю двух точек крепления, при этом возникает минимальное значение собственной частоты колебаний кожуха. Значения собственных частот колебаний КЗП увеличиваются при увеличении жесткости точки крепления и их количества.

Напряжения, возникающие в динамически нагруженной конструкции кожуха, пропорциональны коэффициенту динамичности:

$$\sigma_d = \sigma_{ст} k_d, \quad (13)$$

где σ_d , $\sigma_{ст}$ — напряжения, возникающие в конструкции при динамическом и статическом нагружении соответственно; k_d — коэффициент динамичности конструкции.

Коэффициент динамичности зависит от величины собственных частот колебательной системы [6, 7], который можно определить по формуле:

$$k_d = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{(3,6 \cdot L_{нер} \cdot \omega)^2}{(2\pi\nu)^2}\right)^2 + \frac{4\omega^2 \cdot n^2 \cdot (3,6 \cdot L_{нер})^4}{(2\pi\nu)^4}}}, \quad (14)$$

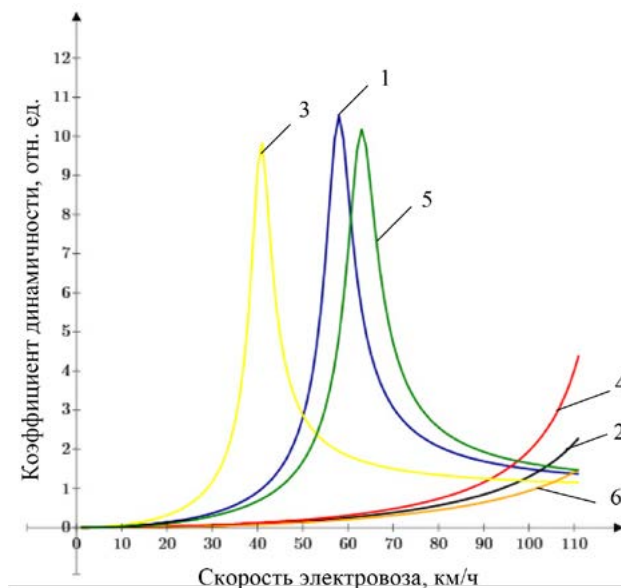


Рис. 2. Коэффициент динамичности колебаний КЗП:

1, 3, 5 — крутильных колебаний соответственно для расчетных схем: рис. 1 (а), рис. 1 (б), рис. 1 (в); 2, 4, 6 — вертикальных колебаний соответственно для расчетных схем: рис. 1 (а), рис. 1 (б), рис. 1 (в)

где $L_{нер}$ — длина неровности пути; ν — скорость электровоза; n — коэффициент, характеризующий вязкость системы (коэффициент затухания).

Если принять длину неровности пути $L_{нер}$, соответствующую волнообразному износу, равной 0,3 м, то можно построить зависимости коэффициента k_d от скорости движения электровоза при различных условиях крепления КЗП (рис. 2).

Как видно из рис. 2, коэффициент динамичности для вертикальных колебаний кожуха не достигает максимальных значений в зоне эксплуатируемых скоростей. При этом коэффициент динамичности для крутильных колебаний имеет пиковые значения в зоне эксплуатируемых скоростей, что свидетельствует о возможности резонансного режима работы кожуха при следовании по пути с волнообразным износом. При увеличении жесткости крепления пиковые значение коэффициента динамичности крутильных коле-

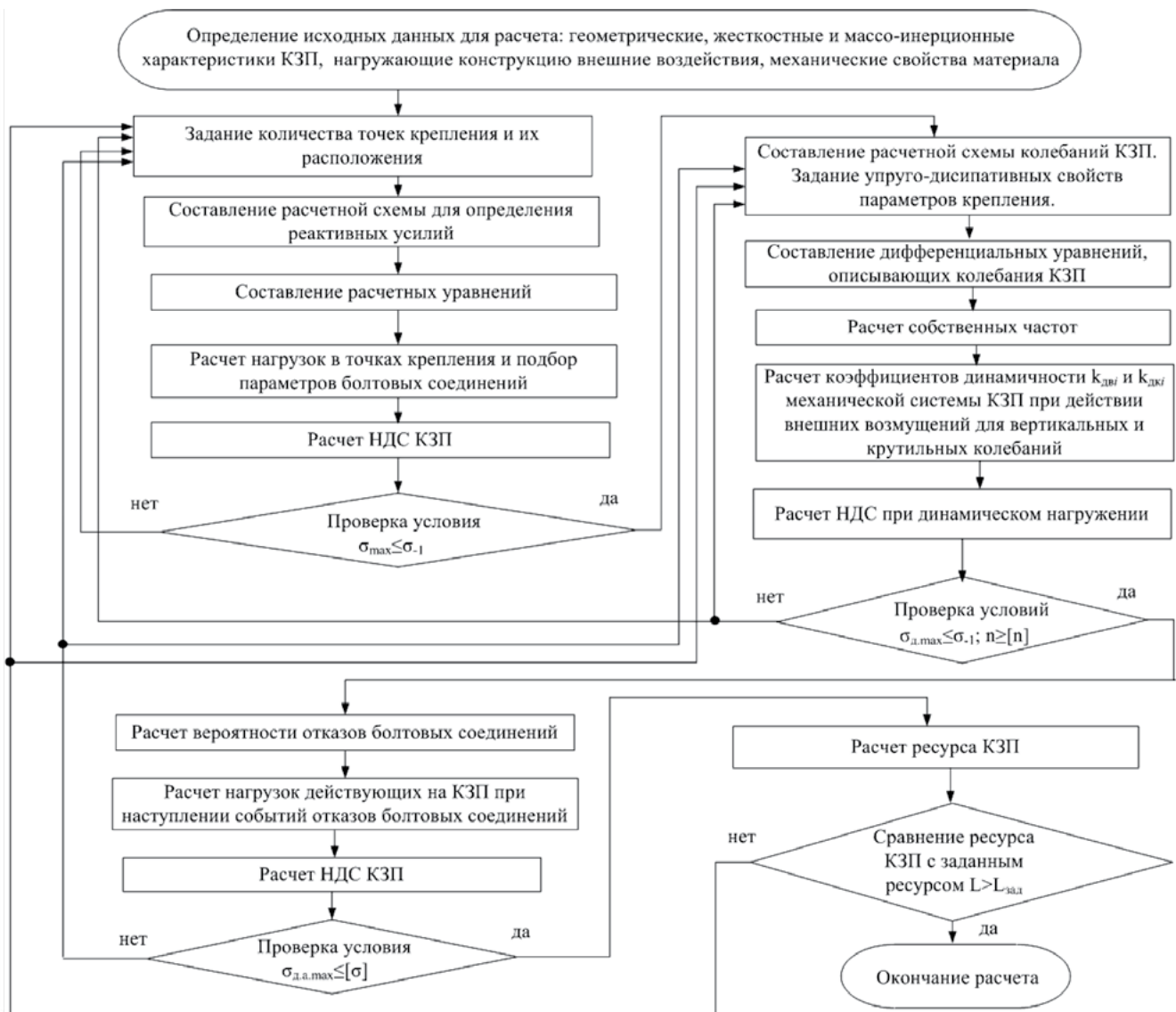


Рис. 3. Алгоритм расчета ресурса КЗП с учетом параметров его крепления к тяговому двигателю

баний смещаются в зону более высоких скоростей движения электровоза.

Количество точек крепления является важным параметром, так как от этого зависят не только динамические свойства крепления, но и нагруженность конструкции кожуха реактивными усилиями, как в штатном, так и аварийном режиме работы крепления. Например, в случае отказа болтового соединения и невосприятия нагрузки точкой крепления кожуха к тяговому двигателю.

При выборе количества точек крепления КЗП следует руководствоваться тем, что групповое болтовое соединение характеризуется вероятностью безотказной работы, которая определяется вероятностями безотказной работы по нераскрытию стыка, несдвигаемости стыка, прочности болтов и т. д. [8].

Следует отметить, что под отказом болтового соединения следует понимать невосприятие нагрузки точкой крепления, например, по при-

чине ослабления затяжки болта или излома тела болта, что неизбежно приводит к перераспределению воспринимаемой нагрузки на оставшиеся работоспособные болтовые крепления из группы болтов крепления.

Алгоритм расчета ресурса КЗП с учетом параметров его крепления к тяговому двигателю

Для рационального выбора технических решений целесообразно использовать критерии, оценка которых дает наиболее полное представление и снижает неопределенность в выборе технического заключения по поставленной задаче [9].

Структурные элементы методики выбора технического решения по количеству и взаимному расположению точек крепления КЗП к тяговому двигателю в составе алгоритма процедур расчета приведены на рис. 3.

Алгоритм расчета состоит из четырех циклов-процедур: определение напряженно-деформированного состояния (НДС) при условии статического нагружения, определение коэффициента динамичности и НДС КЗП при условии динамического нагружения КЗП, определение НДС КЗП при условии отказов болтовых соединений крепления КЗП к тяговому двигателю (аварийного нагружения КЗП), определение ресурса эксплуатации КЗП.

Параметры крепления КЗП к тяговому двигателю — штатное или аварийное, задаются изначально. Алгоритм предусматривает соблюдение следующих условий прочности

$$\begin{cases} \sigma_{\max} \leq \sigma_{-1}, \\ \sigma_{\text{д.макс}} \leq \sigma_{-1}; n \geq [n], \\ \sigma_{\text{д.а.макс}} \leq [\sigma], \\ L \geq L_{\text{зад}}, \end{cases} \quad (15)$$

где σ_{\max} , $\sigma_{\text{д.макс}}$, $\sigma_{\text{д.а.макс}}$ — наибольшие напряжения, возникающие в сварной конструкции кожуха при

статическом, динамическом штатном и динамическом аварийном нагружении; σ_{-1} — предел выносливости материала; n , $[n]$ — расчетный и допустимый коэффициенты запаса по усталостной прочности; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение по условию прочности конструкции; L , $L_{\text{зад}}$ — расчетный и заданный ресурс КЗП.

При соблюдении условия прочности в конце каждого цикла выполняется переход к следующему циклу. В случае несоблюдения условия прочности необходимо вернуться в начало цикла, изменить параметры, влияющие на условия крепления КЗП, и повторить расчет этого цикла.

Расчет усталостной долговечности (ресурса) КЗП в годах можно определить по формуле:

$$L = \left(\sum_{i=1}^k \frac{365 S_{\text{ср.сут}} \alpha_i}{v_{\text{тех}}} \left(\frac{\sum_{j=1}^n \frac{v_j k_{vj}}{L_{\text{неп.}i}}}{N_0 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ai} + \psi \sigma_{mi}} \right)^m} \right) \right)^{-1}, \quad (16)$$

где $S_{\text{ср.сут}}$ — среднесуточный пробег локомотива, $v_{\text{тех}}$ — техническая скорость локомотива, α_i — коэффициент, учитывающий долю пути от общего пробега с характерными длинами неровностей $L_{\text{неп.}i}$, v_j — средняя скорость для j -го интервала скоростей, k_{vj} — доля времени работы электроваза в j -м интервале скоростей, N_0 — базовое число циклов при испытании, σ_{-1} — предел выносливости для стали КЗП, σ_{ai} , σ_{mi} — амплитуда и среднее значение напряжений цикла для i -го режима нагружения, m — показатель степени кривой усталости материала, ψ — коэффициент чувствительности материала КЗП к асимметрии цикла нагружения, k — число учитываемых режимов эксплуатационного нагружения.

На рис. 4 показаны кривая усталости для материала кожуха при его эксплуатации (а), а также зависимость долговечности до образования усталостной трещины в сварном шве КЗП в случае эксплуатации при нештатном креплении, когда

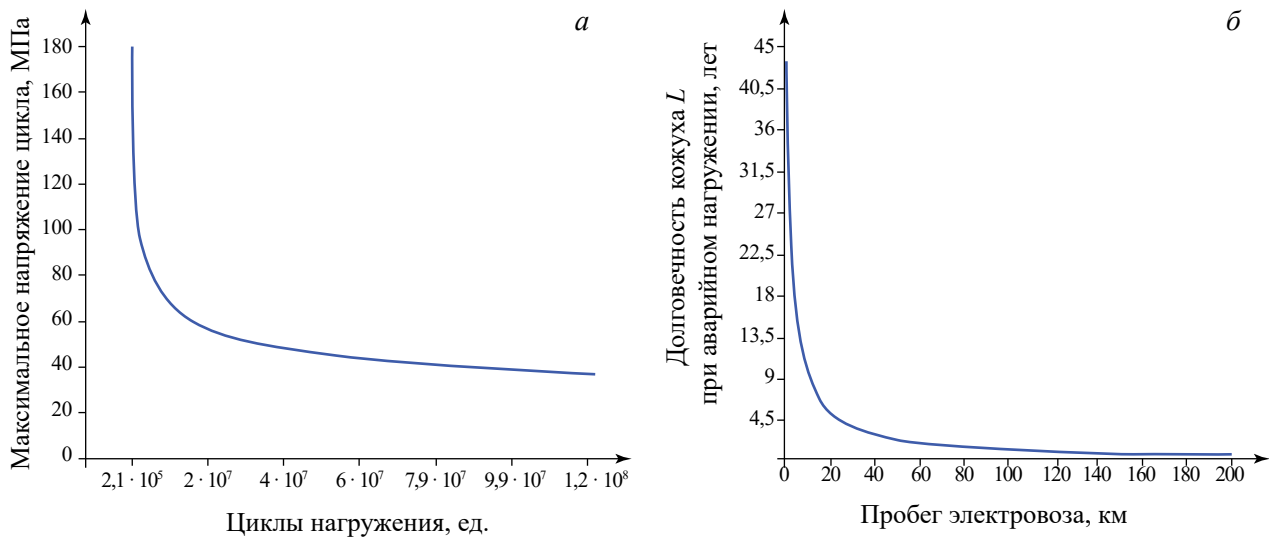


Рис. 4. Расчетная кривая усталости для КЗП (а), влияние на долговечность КЗП повышенных нагрузок в случае отказа точки крепления КЗП «бобышка — кронштейн тягового двигателя» (б)

точка крепления бобышка — кронштейн тягового двигателя не воспринимает нагрузку (б). В качестве данных для расчета по формуле (16) приняты следующие значения: $S_{\text{ср.сут.}} = 600$ км, $v_{\text{тех}} = 50$ км/ч, $N_0 = 2 \cdot 10^6$ циклов, $\sigma_{-1} = 100$ МПа, $\psi = 0,3$, $m = 3,88$, $k = 2$, k_{vj} и v_j принимались согласно [10] для электровоза с конструкционной скоростью 120 км/ч. Для $i = 1$: $L_{\text{нер}} = 25$ м, $\sigma_a = 13,25$ МПа, $\sigma_m = 0,75$ МПа, $\alpha = 0,9$. Для $i = 2$: $L_{\text{нер}} = 0,3$ м, $\sigma_a = 137,5$ МПа, $\sigma_m = 3,75$ МПа, $\alpha = 0,1$.

В условиях штатного нагружения уровень возникающих напряжений в стенке кожуха [11] с учетом динамической нагруженности при действии вертикальных ускорений 25g может составлять 45,9 МПа, что соответствует $1 \cdot 10^8$ циклов нагружения. В случае аварийного нагружения КЗП, например, при отказе болтового соединения одной бобышки, когда происходит увеличение уровня возникающих напряжений в стенке КЗП до 137,5 МПа, количество циклов нагружения составит $2,3 \cdot 10^5$. Как видно из рис. 4 (б), даже пробег порядка 100 км с повышенным уровнем напряжений приводит к сокращению в разы ресурса КЗП до появления усталостной трещины.

Конструктивное решение, снижающее нагруженность КЗП при нарушении штатных условий крепления к тяговому двигателю

Кожух зубчатой передачи является вибронгруженной конструкцией, что приводит к ослаблению затяжки болтов его крепления к тяговому двигателю и, как следствие, к перераспределению нагрузки на оставшиеся точки крепления и повышенной нагруженности конструкции КЗП опорными реакциями. Обозначенная проблема решается следующим образом [12] (рис. 5): кожух зубчатой передачи и остов (корпус) тягового двигателя соединяются между собой в трех точках: в двух точках через бобышки к кронштейнам остова тягового двигателя и в одной точке через кронштейн кожуха к подшипниковому щиту тягового двигателя с помощью болтового соединения, отличающегося тем, что соединение кронштейна тягового двигателя и бобышки выполнено по принципу «шип-паз», для чего на кронштейне тягового двигателя изготавливают два шипа, а на бобышке два паза.

Каждый шип кронштейна тягового двигателя заводится в соответствующий ему паз на

бобышке кожуха зубчатой передачи. В случае ослабления затяжки болтов крепления кожуха к тяговому двигателю шипы на кронштейнах тягового двигателя воспринимают нагрузку и не допускают существенного перераспределения нагрузок между точками крепления кожуха, тем самым ограничивая уровень возникающих напряжений в конструкции кожуха.

В каждый паз бобышки кожуха заводится соответствующий ему шип на кронштейне тягового двигателя, что позволяет обеспечить соосность соединения, а жесткость соединения в основном обеспечивается параметрами сопряжения кронштейна и бобышки, соединенных по принципу «шип — паз», которое скачкообразно не зависит от момента затяжки болтов.

Заключение

Условия крепления конструкции КЗП определяют уровень возникающих опорных реакций и динамико-прочностные свойства конструкции КЗП. Отказ одного из болтовых соединений кожуха вызывает перераспределение численных значений опорных реакций и является возникновением аварийного условия нагружения для КЗП. В этой связи разработка алгоритма расчета ресурса КЗП с учетом параметров его крепления к тяговому двигателю позволит определить ресурс эксплуатации кожуха в зависимости от пробега локомотива.

Анализ значений собственной частоты колебаний кожуха, вычисленных для трех вариантов крепления КЗП к тяговому двигателю, показал, что они увеличиваются при увеличении жесткости точки крепления, а также их количества. В свою очередь, коэффициент динамичности имеет наибольшую опасность с точки зрения возникновения повышенного уровня напряженного состояния для КЗП в случае крутильных колебаний для рассматриваемых условий крепления кожуха.

Алгоритм расчета ресурса КЗП с учетом параметров его крепления к тяговому двигателю пред-

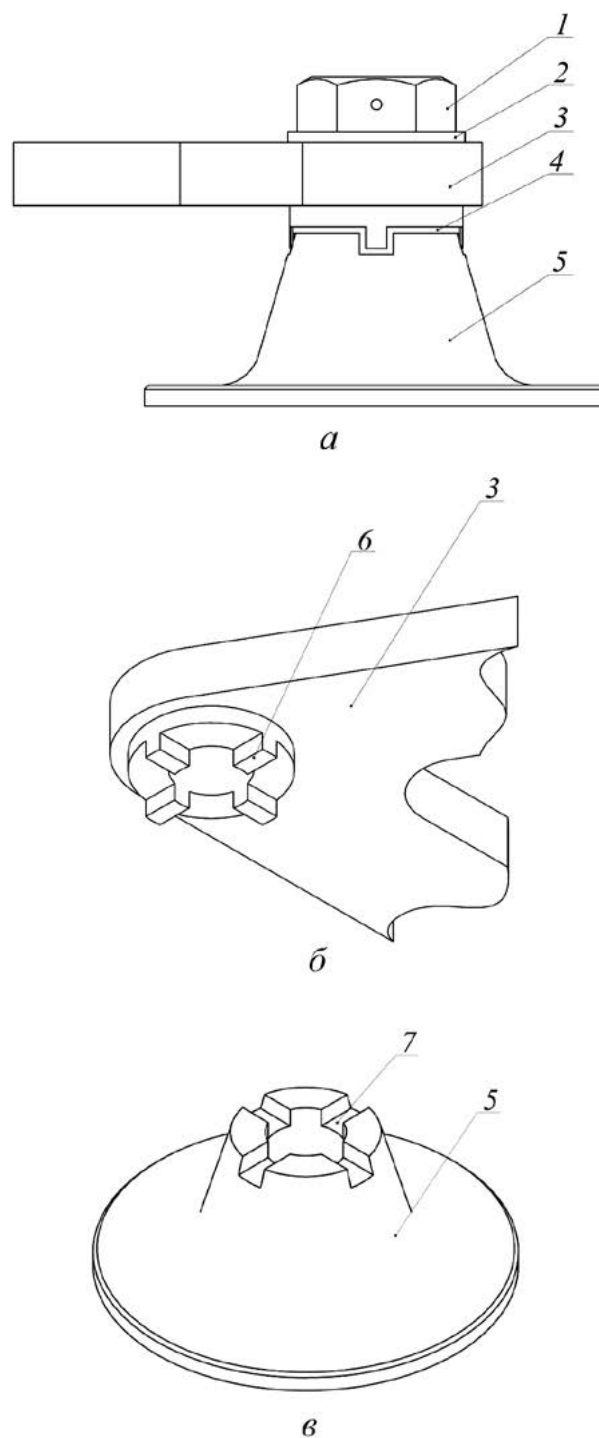


Рис. 5. Узел крепления КЗП к тяговому двигателю: соединение кронштейна тягового двигателя и бобышки (а), кронштейн тягового двигателя, бобышка КЗП (б): 1 — болт; 2 — упругая шайба; 3 — кронштейн тягового двигателя; 4 — регулировочная шайба; 5 — бобышка; 6 — шип кронштейна на поверхности сопряжения; 7 — паз на поверхности сопряжения бобышки

полагает анализ НДС в результате динамического нагружения как при условии штатной эксплуатации, так и при аварийных условиях, возникающих при отказе болтовых соединений крепления КЗП. Сравнение кривых усталости для металла стенок КЗП показало, что возникновение отказа одного из болтовых креплений кожуха увеличивает уровень возникающих в ней напряжений, при этом количество циклов нагружения до возникновения трещины уменьшается на несколько порядков, следовательно, ресурс эксплуатации КЗП значительно уменьшается.

Библиографический список

1. Андриевский А. Г. Расчетно-экспериментальное определение динамических характеристик кожуха тяговой зубчатой передачи электровоза / А. Г. Андриевский, В. В. Москвичев, Е. А. Чабан // Известия Транссиба. — 2020. — № 3(43). — С. 47–57.
2. Школьный М. И. Кожухи зубчатых передач. Проблемы и альтернативные конструкции / М. И. Школьный, Г. Г. Ахмедов, И. П. Демченко // Вестн. Всерос. науч.-исслед. и проект.-конструкт. ин-та электровозостроения. — 2017. — № 2(76). — С. 43–51.
3. Горский А. И. Определение допускаемых напряжений при расчетах на прочность / А. И. Горский, Е. Б. Иванов-Эмин, А. И. Кореновский. — М.: НИИмаш, 1974. — 79 с.
4. Электровоз ВЛ85: руководство по эксплуатации. — Всесоюз. науч.-исслед., проект.-конструкт. и технол. ин-т электровозостроения; Новочеркасск. электровозостроит. завод. — М.: Транспорт, 1992. — 479 с.
5. Бирюков И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. — М.: Транспорт, 1986. — 256 с.
6. Иосилевич Г. Б. Детали машин: учебник для машиностроит. специальностей вузов / Г. Б. Иосилевич. — М.: Машиностроение, 1988. — 366 с.
7. Конструкция и динамика тепловозов: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. проф., д-ра техн. наук В. Н. Иванова. — 2-е изд., доп. — М.: Транспорт, 1974. — 336 с.
8. Биргер И. А. Резьбовые и фланцевые соединения / И. А. Биргер, Г. Б. Иосилевич. — М.: Машиностроение, 1990. — 368 с.
9. Кандырин Ю. В. Исследование неметрических постановок решения задач выбора в САПР / Ю. В. Кандырин, М. Х. Хла, Л. Т. Сазонова, Г. Л. Шкурина // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2016. — № 6(185). — С. 45–51.
10. ГОСТ Р 55513—2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам: национальный стандарт Российской Федерации / Разработан: Научно-исследоват. и конструктор.-технолог. ин-т подвиж. состава. — Изд. офиц.: введен впервые: введен 2014-07-01. — М.: Стандартинформ, 2014. — 41 с.
11. Андриевский А. Г. Анализ нагруженности кожуха зубчатой передачи электровоза при условии ослабления затяжки болтов его крепления к тяговому двигателю / А. Г. Андриевский, Е. А. Чабан, В. В. Москвичев // Известия Петербургского университета путей сообщения — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 2. — С. 201–210.
12. Патент на полезную модель № 207381 U1 Российская Федерация, МПК В60К 17/00, F16H 57/031, В61С 9/06. Узел крепления кожуха зубчатой передачи локомотива: № 2021108854: заявл. 01.04.2021; опубл. 26.10.2021 / А. Г. Андриевский, Е. А. Чабан, А. И. Романовский; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения».

Дата поступления: 20.03.2022

Решение о публикации: 05.04.2022

Контактная информация:

АНДРИЕВСКИЙ Анатолий Геннадьевич — преподаватель; andrievs1@yandex.ru

ЧАБАН Елена Анатольевна — канд. техн. наук, доц.; chaban_tm@mail.ru

МОСКВИЧЕВ Владимир Викторович — д-р. техн. наук, проф.; krasn@ict.nsc.ru

Durability assessment and rational fastening to Traction Engine of gear housing of an electric locomotive

A. G. Andrievsky¹, E. A. Chaban¹, V. V. Moskvichev²

¹ Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Branch of Irkutsk State University of Railway Communications, 2И, Novoi Zori ul., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation

² Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 53, Mira pr., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

For citation: Andrievsky A. G., Chaban E. A., Moskvichev V. V. Durability assessment and rational fastening to Traction Engine of gear housing of an electric locomotive // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 182–192. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-182-192

Purpose: To investigate the dependence of workload of an electric locomotive gear housing on the parameters of its attachment to a traction motor. To determine own oscillation frequencies under various conditions of its attachment to a traction motor. To propose technical solution allowing to reduce the workload of gear housing in the case of abnormal operation of its attachment to a traction motor. To propose an algorithm for housing lifetime calculation taking into account its fastening parameters. **Methods:** The values of gear housing own frequencies are obtained by solving the system of Lagrange differential equations of the second kind. Created with this purpose mathematical model of mechanical system under consideration takes into account an elastic nature of housing attachment to a traction motor. **Results:** The influence of conditions and parameters of gear housing attachment to a traction motor on its workload and, correspondingly, its lifetime is shown. The algorithm for gear housing lifetime calculation is proposed, taking into account its fastening conditions and parameters. The significant influence of workload abnormal modes on housing durability is shown. **Practical importance:** Constructive solution is proposed that reduces gear housing workload in the case of abnormal conditions of attachment to a traction motor. The algorithm for estimating gear housing durability in the case of redistribution of workloads between its reference points has been developed.

Keywords: Gear housing, bolt fastening, housing dynamics, workload dynamic workload, durability.

References

1. Andrievskiy A. G. Raschetno-eksperimental'noe opredelenie dinamicheskikh kharakteristik kozhukha tyagovoy zubchatoy peredachi elektrovoza [Calculation and experimental determination of the dynamic characteristics of the casing of the traction gear of an electric locomotive]. *Izvestiya Transsiba* [Izvestiya Transsib]. 2020, I. 3(43), pp. 47-57. (In Russian)

2. Shkol'nyy M. I. Kozhukhi zubchatykh peredach. Problemy i al'ternativnye konstruksii [Casings of gears. Problems and alternative constructions]. *Vestn. Vseros. nauch.-issled. i proekt.-konstrukt. in-ta elektrovozostroeniya*

[Vestn. Vseros. scientific research and project.-construct. in-ta electric locomotive building]. 2017, I. 2 (76), pp. 43-51. (In Russian)

3. Gorskiy A. I. *Opredelenie dopuskaemykh napryazheniy pri raschetakh na prochnost'* [Determination of allowable stresses in strength calculations]. Moscow: NIImash Publ., 1974. 79 p. (In Russian)

4. *Elektrovoz VL85: rukovodstvo po ekspluatatsii. Vsesoyuz. nauch.-issled., proekt.-konstrukt. i tekhnol. in-t elektrovozostroeniya; Novoherkask. elektrovozostroit. Zavod* [Electric locomotive VL85: operation manual. All-Union. scientific-research., project.-construct. and technol. in-t of

electric locomotive building; Novocherkask. electric locomotive. plant]. Moscow: Transport Publ., 1992. 479 p. (In Russian)

5. Biryukov I. V. *Tyagovye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [Traction transmissions of electric rolling stock of railways]. Moscow: Transport Publ., 1986. 256 p. (In Russian)

6. Iosilevich G. B. *Detali mashin: uchebnik dlya mashinostroitel'nykh spetsial'nostey vuzov* [Machine parts: textbook for mechanical engineering, specialties of universities]. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 366 p. (In Russian)

7. *Konstruktsiya i dinamika teplovozov* [The design and dynamics of diesel locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1974. 336 p. (In Russian)

8. Birger I. A. *Rez'bovye i flantsevye soedineniya* [Threaded and flange connections]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 368 p. (In Russian)

9. Kandyrin Yu. V., Khla M. Kh., Sazonova L. T., Shkurina G. L. *Issledovanie nemetricheskikh postanovok resheniya zadach vybora v SAPR* [Investigation of non-metric formulations for solving choice problems in CAD]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Volgograd State Technical University]. 2016, I. 6(185), pp. 45-51. (In Russian)

10. *GOST R 55513–2013. Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam: natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Razrabotan: Nauchno-issledovat. i konstruktor.-tehnolog. in-t podvizh. sostava. Izd. ofits.: vveden v pervyye: vveden 2014–07–01* [GOST R 55513–2013. Locomotives. Requirements for strength and dynamic qualities: national standard of the Russian Federation. Developed by: Nauchno-issledovat. and designer.-technologist. in-t mobility composition. Ed. official: introduced for the first time: introduced 2014–07–01]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 41 p. (In Russian)

11. Andrievskiy A. G., Chaban E. A., Moskvichev V. V. *Analiz nagruzhennosti kozhukha zubchatoy peredachi elektrovoza pri uslovii oslableniya zatyazhki boltov ego krepleniya k tyagovomu dvigatelyu* [Analysis of the loading of the gear housing of an electric locomotive under the condition of loosening the bolts of its fastening to the traction motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, I. 2, pp. 201–210. (In Russian)

12. Andrievskiy A. G., Chaban E. A., Romanovsky A. I. *Patent na poleznuyu model' № 207381 U1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B60K 17/00, F16H 57/031, B61C 9/06. Uzel krepleniya kozhukha zubchatoy peredachi lokomotiva: № 2021108854: zayavl. 01.04.2021: opubl. 26.10.2021. Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Irkutskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya»* [Utility model patent No. 207381 U1 Russian Federation, IPC B60K 17/00, F16H 57/031, B61C 9/06. Locomotive gear case fastening assembly: No. 2021108854: Appl. 04/01/2021: publ.]. October 26, 2021 (In Russian)

Received: March 20, 2022

Accepted: April 05, 2022

Author's information:

Anatoliy G. ANDRIEVSKY — Lecturer;
andrievs1@yandex.ru

Elena A. CHABAN — PhD in Engineering, Associate
Professor; chaban_tm@mail.ru

Vladimir V. MOSKVICHEV — D. Sci. in Engineering,
Professor; krasn@ict.nsc.ru

УДК 621.86.0

Компьютерное моделирование грузозахватного устройства автоматизированной системы выгрузки-подачи рельсовых плетей в РСП-1

А. В. Атаманюк, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев, И. Ю. Новосельский

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

Для цитирования: Атаманюк А. В., Ватулин Я. С., Воробьев А. А., Новосельский И. Ю. Компьютерное моделирование грузозахватного устройства автоматизированной системы выгрузки-подачи рельсовых плетей в РСП-1 // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 193–202. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-193-202

Аннотация

Цель: Модернизация технологии выгрузки и подачи рельсов автоматизированной системы выгрузки-подачи рельсов с разработкой многофункционального рельсового захвата и определением степени соответствия применяемого двутавра 36М в качестве монорельса новым прочностным требованиям. **Методы:** Компьютерное моделирование твердотельной виртуальной модели проектируемого рельсового захвата разработана в среде системы автоматизированного проектирования SolidWorks. **Результаты:** Рассчитана ездовая балка грузоподъемного устройства АСВП с новым захватом. Установлено, что ездовая балка в виде двутавра марки 36М полностью удовлетворяет требуемым условиям прочности и жесткости при установке на ГУ нового захвата. **Практическая значимость:** Определена конструкция автоматического рельсового захвата, рассчитанного на работу с одним или тремя рельсами одновременно.

Ключевые слова: Рельс, многофункциональный рельсовый захват, рельсовая плеть, балка, грузоподъемное устройство, сечение, прочность, жесткость, твердотельная виртуальная модель.

Российский железнодорожный транспорт выполняет важную экономическую и социальную роль [1, 2]. По данным Росстата, эксплуатационная длина путей сообщения общего пользования составляет более 87 тыс. км, на электрифицированные участки приходится более половины всей протяженности [1].

Полигон укладки бесстыкового пути в ОАО «РЖД» постоянно увеличивается и в насто-

ящее время приближается к 80 % от общей протяженности железнодорожных путей. Применение на сети железных дорог бесстыкового пути положительно влияет на взаимодействие пары «колесо — рельс» [3–5]. На сегодняшний день, для обеспечения программы капитального ремонта сети ОАО «РЖД» и в связи со строительством новых скоростных железных дорог, потребность в новых бесстыковых рельсовых

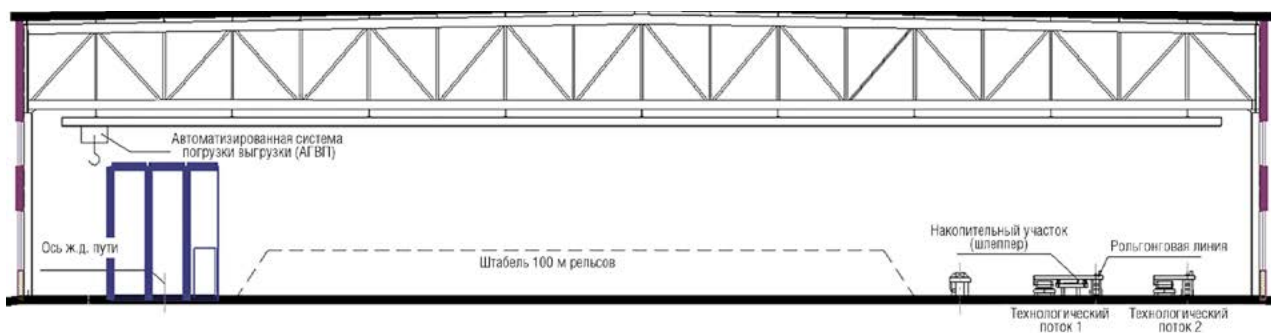


Рис. 1. План склада в разрезе

плетях остается на высоком уровне. Покрытие этой потребности происходит за счет рельсосварочных предприятий, в том числе и РСП-1.

РСП-1 является одним из ведущих предприятий в нашей стране по выпуску плетей длиной до 800 метров. На предприятии проводятся работы по реконструкции и переоборудованию производства современным технологическим оборудованием для удовлетворения нужд Северо-Западного региона ОАО «РЖД» в качественных сварных рельсовых плетях и организации скоростного пассажирского движения.

РСП-1 — это первое в России предприятие, которое было реконструировано для работы с прокатными рельсами длиной 100 метров (ранее 25 метров). Использование таких рельсов позволяет снизить количество сварных стыков плети с 32 до 7, благодаря чему увеличивается ее прочность и долговечность [6, 7].

Автоматизированная система выгрузки-подачи рельсов (АСВП) отечественного производства ООО «Вест-Тер» спроектирована и установлена на предприятии РСП-1, г. Санкт-Петербург, состоит из 8 синхронно работающих грузоподъемных устройств (ГУ) с рельсовыми захватами. Все устройства синхронизированы друг с другом, за счет чего образуется единая грузоподъемная линия. Благодаря внедрению данной системы на увеличенном складе предприятия стали возможны разгрузка, транспортировка и погрузка на потоки рельсов длиной 100 метров.

Расчетная мощность выработки Рельсосварочного предприятия № 1 после реконструкции при работе со стометровыми рельсами увеличилась втрое, до 540 км в год, и в настоящий момент предприятие продолжает искать разные пути повышения производительности.

Перевозка рельсов 100-метровой длины производится на специализированном составе типа ОПР-100, который представляет собой сцеп из семи платформ со специальным оборудованием для размещения плетей. Он въезжает на склад по рельсам.

Основная цель расчета — модернизация технологии выгрузки и подачи рельсов АСВП с разработкой многофункционального рельсового захвата и определением степени соответствия применяемого двутавра 36М в качестве моно-рельса новым прочностным требованиям.

Складское помещение имеет площадь 5832 кв. метра (рис. 1) и предназначено для хранения и переноса рельсового сырья. Разгрузка состава производится АСВП. Большая часть пространства склада занята штабелем рельсов. Максимальное количество рядов в штабеле — 8. В нижнем ряду штабеля может разместиться 146 стометровых рельсов. Вместимость склада — 1112 штук стометровых Р65 или 55,6 км пути. Также внутри склада установлены кабина управления АСВП и помещение зачистных станков.

Технология разгрузки сцепов из семи платформ состоит из четырех основных операций:

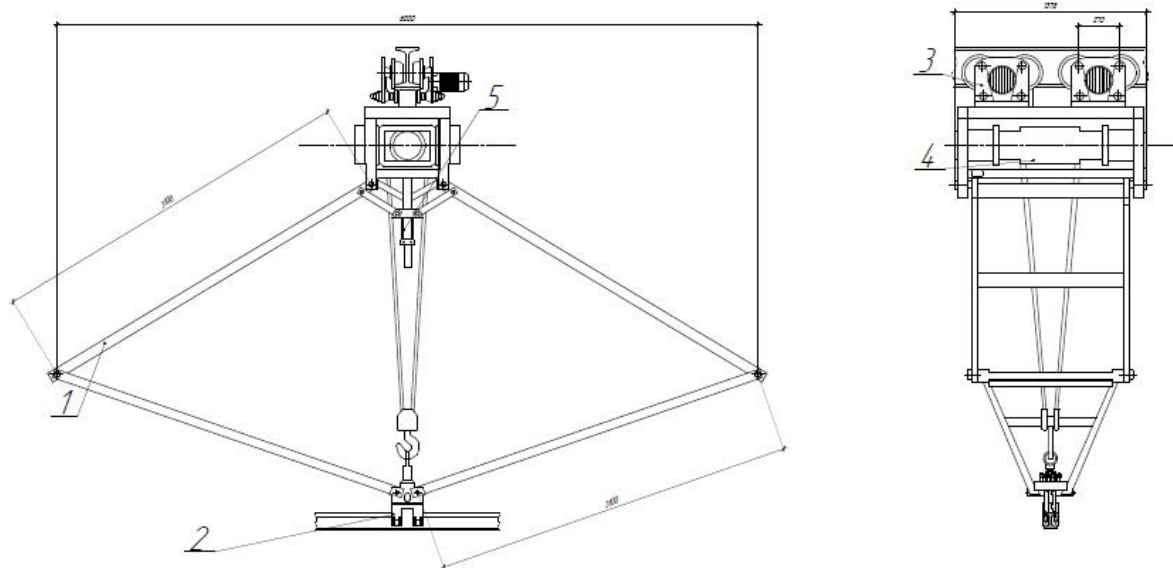


Рис. 2. Устройство грузоподъемное:
1 — пантограф; 2 — захват; 3 — приводная тележка; 4 — тельфер; 5 — ползун

1. Приведение сцепа из 7 платформ в положение для выгрузки.

2. Разгрузка уложенного ряда 100-метровых рельсов со сцепа на склад рельсов.

3. Разгрузка следующих рядов 100-метровых рельсов со сцепа на склад рельсов.

4. Разгрузка уложенного ряда стометровых рельсов со сцепа на шлеппер (рольганг).

Максимальный цикл подачи под сварку с колёс одного рельса — 10 минут. На сцепах перевозится 60 рельсов, следовательно, на разгрузку всех рельсов затрачивается около 10 часов, не считая времени на разбор рядов. Одновременно можно работать только с одним рельсом, что замедляет процесс. В результате происходит простой рельсовозного состава. Таким образом, существует потребность в увеличении скорости разгрузки с целью уменьшения простоев и улучшения экономических показателей.

АСВП является главным оборудованием на складе и служит для подъема, удержания, перемещения и опускания рельса. Система состоит

из восьми синхронизированных грузоподъемных устройств (рис. 2), связанных единой системой управления.

Система может работать в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах.

Автоматическое устройство для захвата рельсов (рис. 3), установленное на АСВП, подвешивается на крюк тельфера. Для ориентации в пространстве к устройству присоединяется пантограф. Грузоподъемность устройства — 3,2 тонны. Принцип действия основан на четырехтактном механизме фиксации захватных органов:

1. Первый такт — исходное положение грузозахватного устройства.

2. Второй такт — опускание захвата на груз.

3. Третий такт — захват груза, его подъем и транспортировка.

4. Четвертый такт — освобождение устройства от груза.

Такой механизм характеризуется наличием фиксирующей звездочки. Во время каждого такта звездочка занимает определенное положение.

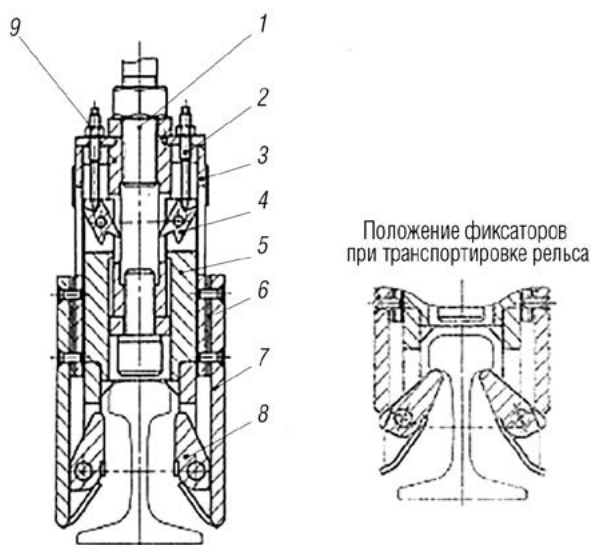


Рис. 3. Рельсозахватное устройство АСВП:

- 1 — крепление к грузовой тали;
- 2 — упор; 3 — защитный кожух;
- 4 — звездочка; 5 — корпус; 6 — набор прокладок;
- 7 — упор; 8 — фиксатор;
- 9 — гильза

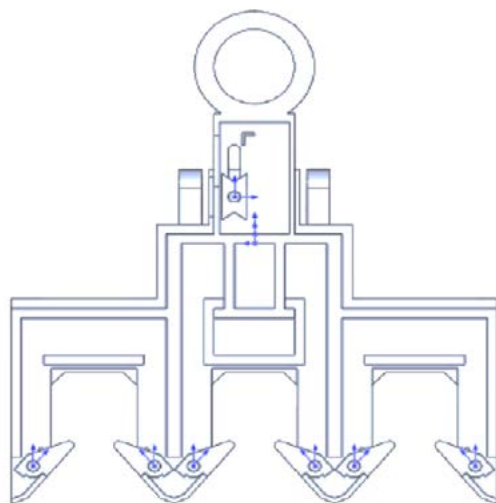


Рис. 4. Твёрдотельная виртуальная модель проектируемого рельсового захвата

Предлагается применение автоматического рельсового захвата для нескольких рельсов, что обеспечит экономический эффект за счет сокращения времени разгрузки и уменьшения простоев

состава для перевозки 100-метровых рельсов. На основе морфологического анализа выбран вариант — рельсовый захват на 3 рельса.

В основу работы захвата заложен четырехтактный принцип фиксации грузозахватных органов. Также предусмотрена работа захвата с одним рельсом за счет специальных отверстий для фиксации боковых зацепов.

Твёрдотельная виртуальная модель проектируемого рельсового захвата разработана в среде системы автоматизированного проектирования SolidWorks (рис. 4).

Захват состоит из следующих основных элементов: внешняя подвижная часть корпуса, внутренняя неподвижная часть корпуса, зацепы, зацепы с фиксатором, оси зацепов, звездочка, ось звездочки и тормозная пружина для предотвращения свободного вращения звездочки. Также предусмотрены специальные отверстия в боковых частях захвата для фиксации зацепов и перевода захвата в режим работы только с одним рельсом.

Для решения задачи прочностного расчета использован функционал программного комплекса — SolidWorks Simulation [8].

При выполнении расчета принимаются следующие допущения и упрощения:

1. Материал считается однородным и изотропным.
2. Незначительные детали конструкции редуцированы.
3. Расчет выполняется для квазиустановившегося режима, влияние динамики колебательных процессов многоопорных подвесов длинногабаритных рельсовых плетей не учитывается.
4. Деформации элементов бака и ротора пренебрежимо малы.

Прочностной анализ захвата выполнен для режима подъема и транспортирования груза. В качестве материала принята конструкционная сталь 1.0503 стандарта EN 10277-2 (аналог: Сталь 45) (см. таблицу).

Таблица свойств материала

| | |
|-----------------------------------|--|
| Марка стали: | 1.0503 Стандарт: EN 10277-2 (аналог: Сталь 45) |
| Тип модели: | Linear Elastic Isotropic |
| Критерий отказа по умолчанию: | Max von Mises Stress |
| Предел текучести: | 5.8e + 08 N/m ² (580 N/ m m ²) |
| Предел прочности: | 7.5e + 08 N/m ² (750 N/ m m ²) |
| Модуль упругости: | 2.1e + 11 N/m ² (210000 N/ m m ²) |
| Коэффициент Пуассона: | 0.28 |
| Коэффициент Пуассона: | 7800 kg/m ³ |
| Модуль сдвига: | 7.9e + 10 N/m ² (79000 N/ m m ²) |
| Коэффициент теплового расширения: | 1.1e-05 /Kelvin |

Фиксация захвата осуществляется посредством шарнирного соединения подвесных элементов АСВП по контактным поверхностям несущих проушин: сектор внутренней поверхности отверстий (опора типа «зафиксированный шарнир»), боковая поверхность корпуса проушины (опора типа «ролик/скольжения») (рис. 5).

Силовой фактор (нормальная сила 24 000 Н) от веса рельсовых плетей приложен к скругленным кромкам замыкающих кулачков зацепа головки рельса (рис. 6).

В результате проведенного численного моделирования нагружения [9–13] конструкции подвеса установлено:

Конструкция работает в условиях изгиба (рис. 7).

По результатам моделирования максимальные напряжения в элементах конструкции (полки швеллера) соответствуют:

$S_{\max} = 195 \text{ N/mm}^2 \text{ (МПа)} < [S_{\text{пред}}] = 580 \text{ N/mm}^2 \text{ (МПа)}$ не превышает допустимые.

Согласно ст. 8.2.1. СП 16.13330.2011 [14] расчет на прочность элементов из стали при действии поперечной силы выполняется по формуле:

$$\frac{QS}{I_w R_{yn} \gamma_m} \leq 1,$$

где I — момент инерции сечения брутто, 11 552 см⁴ (без учета соединительных планок);
 Q — поперечная сила, 2400 кгс;

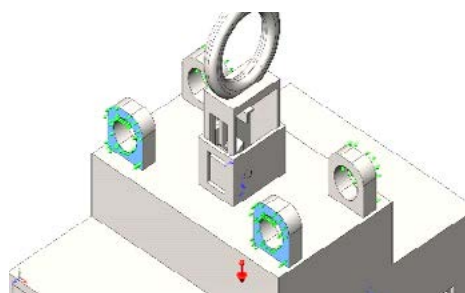


Рис. 5. Узлы шарнирного соединения корпуса захвата с подвесом АСВП

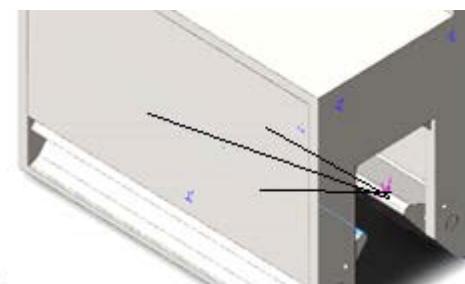
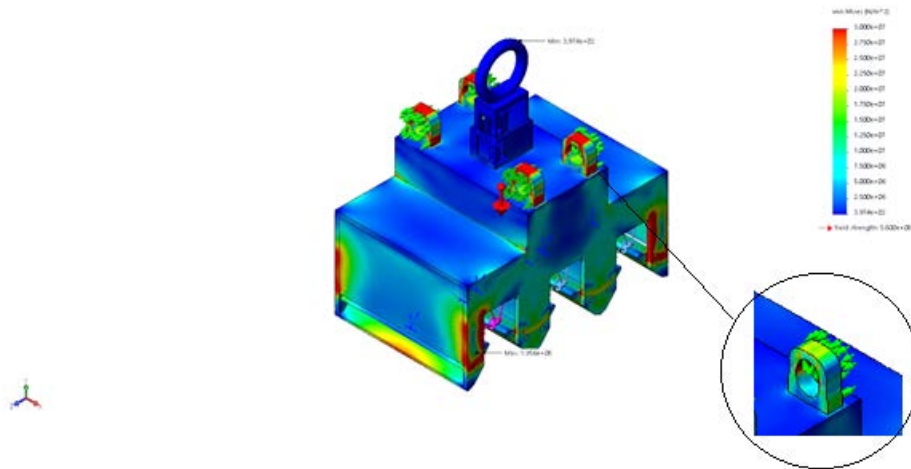


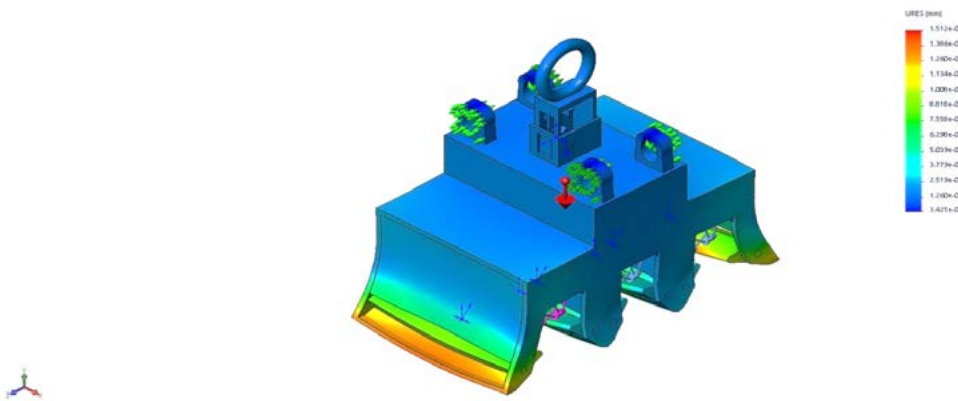
Рис. 6. Поверхности элементов приложения силовых факторов от веса рельсовых плетей

S — статический момент сдвигаемой части сечения брутто относительно нейтральной оси, 458 см³ для полусечения корпуса захвата;
 t_w — толщина стенки, 0,5 см;
 R_{yn} — предел текучести, 580 N/mm² (МПа) (сталь 45);
 γ_m — 1,025, коэффициент надежности по материалу (табл. 3 [4]).



| Name | Type | Min | Max |
|-------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Напряжение1 | VON: von Mises Stress | 3.974e + 02 N/m^2 Node: 1234673 | 1.956e + 08 N/m^2 Node: 1072406 |

Рис. 7. Эпюра напряжений захвата



| Name | Type | Min | Max |
|--------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Перемещение1 | URES: Resultant Displacement | 3.425e-07 mm Node: 1022240 | 1.512e-01 mm Node: 1123144 |

Рис. 8. Эпюра перемещений захвата

$$2400 \cdot 2 \cdot 458 / (11552 \cdot 0,5 \cdot 580 \cdot 0,9) = \\ = 2\,199\,120 / 3\,015\,072 = 0,72;$$

$0,72 \leq 1$ — условие выполняется.

Согласно ст. 8.1. [14] объект относится к балкам 1 класса — НДС в пределах упругих деформаций.

На рис. 8 показаны максимальные перемещения узла $U_{\max} = 0,15$ мм, $L_{\text{балки}} = 191$ мм (длина деформированной консоли конструкции).

$$[U_{\text{пред}}] = L_{\text{балки}} \cdot 1/500 = 191 \cdot 1/500 = 0,38 \text{ мм.}$$

Максимальные смещения не превышают предельные $0,38 / 0,15 = 2,53$.

Таким образом, для нагрузки 24 000 кгс конструкция захвата удовлетворяет требованиям прочности и жесткости.

При установке на грузоподъемное устройство АСВП нового рельсового захвата, нагрузки, действующие на конструкцию, в том числе и на монорельс, изменятся. Это связано с тем, что изменится конструкция захвата, следовательно, увеличится

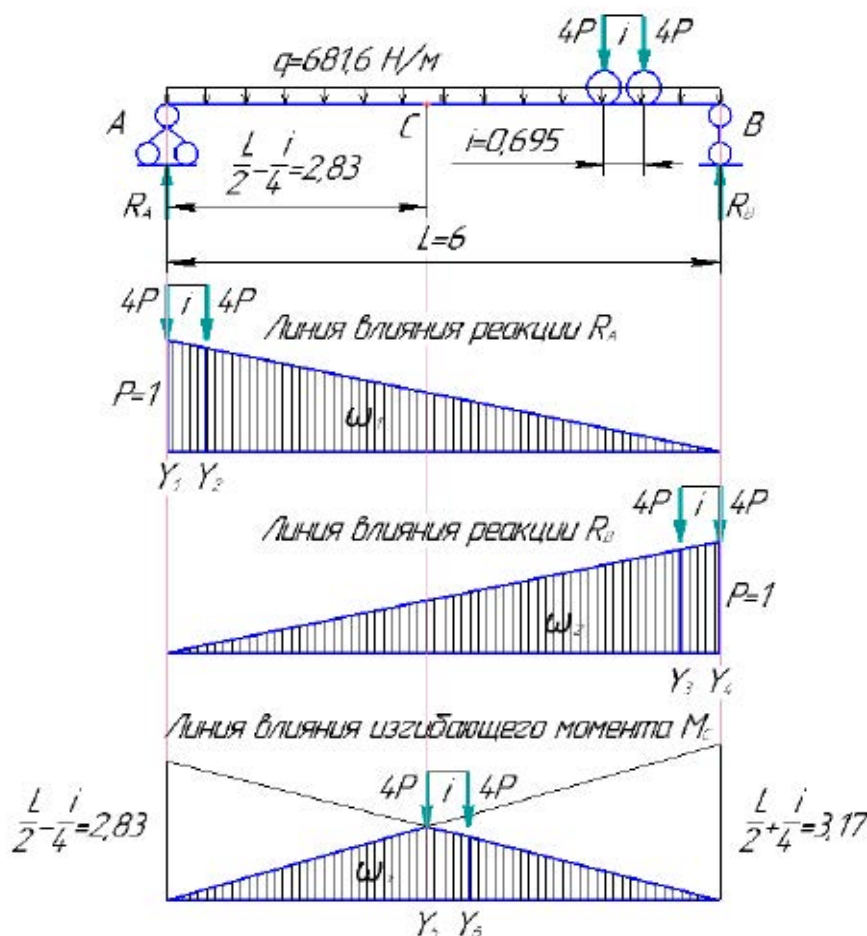


Рис. 9. Схема нагружения балки, линии влияния реакций и изгибающего момента

масса устройства в целом и масса перевозимого груза.

Поэтому произведена проверка соответствия установленных на складе предприятия ездовых балок условиям прочности при использовании нового рельсового захвата.

Монорельс представляет собой неподвижную балку длиной 48 м. Балка крепится в 9 точках к МК здания от края до края с шагом 6 м (рис. 9). Профиль — двутавр 36М (ГОСТ 19425—74), материал — С275 (ГОСТ 27772—88).

Выводы

1. Определена конструкция автоматического рельсового захвата, рассчитанного на работу с одним или тремя рельсами одновременно.

2. Рассчитана ездовая балка грузоподъемного устройства АСВП с новым захватом. В результате расчета проверена прочность балки в опасном сечении по нормальным напряжениям общего изгиба, напряжения составили 91,35 МПа при допустимых 275 МПа; определены местное продольное и местное поперечное напряжения, сумма напряжения общего изгиба и местного продольного напряжения удовлетворяет требуемому условию: $91,35 + 131,12 = 222,45$ МПа \leq 275 МПа; местное поперечное напряжение удовлетворяет условию: 36,27 МПа \leq 275 МПа; проверена жесткость балки, условие жесткости было соблюдено: $0,00103 \leq 0,0014$.

3. Установлено, что ездовая балка в виде двутавра марки 36М полностью удовлетворяет тре-

буемым условиям прочности и жесткости при установке на ГУ нового захвата.

Библиографический список

1. Основные показатели перевозочной деятельности. — URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455> (дата обращения: 18.02.2022).

2. Воробьев А. А. Прогнозирование ресурса и совершенствование технологии ремонта колес железнодорожного подвижного состава: дисс. ... д-ра техн. наук / А. А. Воробьев. — СПб.: ПГУПС, 2018. — 289 с.

3. Воробьев А. А. Методика определения нагруженности колесной пары подвижного состава при движении по репрезентативным маршрутам с использованием математического моделирования системы «вагон — путь»: монография / А. А. Воробьев. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 151 с.

4. Воробьев А. А. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог. Монография / А. А. Воробьев, С. И. Губенко, И. А. Иванов и др.; под ред. проф. И. А. Иванова. — М.: ИНФРА-М, 2011. — 264 с.

5. Валинский О. С. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава: Монография / О. С. Валинский, А. А. Воробьев, С. И. Губенко и др.; под ред. И. А. Иванова. — Казань: Бук, 2022. — 324 с.

6. Попович М. В. Путевые машины: учебник / М. В. Попович, В. М. Бугаенко, Б. Г. Волковойнов и др.; под ред. М. В. Поповича, В. М. Бугаенко. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. — 960 с.

7. РСМ-М: сайт. — URL: <http://www.rspm.ru/> (дата обращения: 25.12.2021).

8. Алямовский А. А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks: учебное пособие / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 783 с. — С. 771–783.

9. Vatulin Y. S. Stability Control of a Self-Propelled Crane in Dynamic Loading / Y. S. Vatulin, D. A. Potakhov // Russian Engineering Research — № 40(7). — Pp. 545–550. — DOI: 10.3103/S1068798X20070254.

10. Vorobev A. A. Study of the stress-strain state of the wheel pair of a freight car during braking / A. A. Vorobev, A. A. Krutko, N. U. Shadrina, A. M. Badamshin // Journal of Physics: Conference Series. — 1260 (7). — Art. № 072019. — DOI: 10.1088/1742-6596/1260/7/072019.

11. Bardyshev O. Expert Review of Metro Escalators Safety / O. Bardyshev, V. Popov, P. Druzhinin, A. Bardyshev // Transportation Research Procedia. — № 20. — Pp. 31–35. — DOI: 10.1016/j.trpro.2017.01.007.

12. Bardyshev O. A. Monitoring of technical condition of technical devices at hazardous production facilities / O. A. Bardyshev, V. A. Popov, S. K. Korovin, A. N. Filin // Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti. — 2020 (1). — Pp. 52–56. — DOI: 9.24000/0409-2961-2020-1-52-56.

13. Bardyshev O. A. Method of safety control of transport and technological machines in the initial period of operation (on the example of tunnel escalators) / O. A. Bardyshev, P. V. Druginin, S. Repin, A. N. Filin et al. // Bulletin of Civil Engineers. — 2018. — № 6(71). — Pp. 129–134. — DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-6-129-134.

14. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции.

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации Федеральной программы поддержки университетов ПРИОРИТЕТ 2030.

Дата поступления: 15.04.2022

Решение о публикации: 05.05.2022

Контактная информация:

АТАМАНЮК Александр Васильевич — канд. техн. наук, доц.; aleksanderataman@mail.ru

ВАГУЛИН Ян Семенович — канд. техн. наук, доц.; yan-roos@yandex.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; 79219751198@yandex.ru

НОВОСЕЛЬСКИЙ Игорь Юрьевич — канд. техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

Computer Simulation of Load-Handling Device of Automatic System for Unloading-Supply of Rail Straps at Rail Welding Enterprise RWE-1

A. V. Atamanyuk, Ya. S. Vatulin, A. A. Vorobyov, I. Yu. Novoselsky

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

For citation: Atamanyuk A. V., Vatulin Ya. S., Vorobyov A. A., Novoselsky I. Yu. Computer Simulation of Load-Handling Device of Automatic System for Unloading-Supply of Rail Strings at Rail Welding Enterprise RWE-1 // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 193–202. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-193-202

Summary

Purpose: Modernization of rail unloading-supply technology of rail unloading-supply automatic system with the development of multifunctional rail grip and the definition of compliance degree of being used I-beam 36M as a monorail to new requirements for a strength. **Methods:** Computer modeling of solid virtual model of being designed rail grip is developed in the environment of computer-aided design system SolidWorks. **Results:** Load-carrying beam of unloading-supply automatic system (USAS) lifting device with a new grip is calculated. It's found that the I-beam as of 36M grade fully meets required strength and rigidity conditions at installing a new grip on a solid plot. **Practical significance:** Design of automatic rail grip is designed that's reckoned upon work with one or three rails simultaneously.

Keywords: Rail, multifunctional rail grip, rail strap, beam, lifting device, section, strength, rigidity, solid virtual model.

References

1. Osnovnye pokazateli perevozochnoy deyatelnosti [Main indicators of transportation activity]. *EB Federal'noy sluzhby gosudarstvennoy statistiki* [EB of the Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455> (accessed: February 18, 2022). (In Russian)
2. Vorob'ev A. A. *Prognozirovanie resursa i sovershenstvovanie tekhnologii remonta koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Dokt. Diss* [Forecasting the resource and improving the technology of repair of wheels of railway rolling stock. Doct. Diss]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2018. 289 p. (In Russian)
3. Vorob'ev A. A. *Metodika opredeleniya nagruzhenosti kolesnoy pary podvizhnogo sostava pri dvizhenii po reprezentativnym marshrutam s ispol'zovaniem matematicheskogo modelirovaniya sistemy «vagon — put'»* [Methodology for determining the loading of a wheel pair of rolling stock when moving along representative routes using mathematical modeling of the “car - track” system]. Moscow: 2020. 151 p. (In Russian)
4. Vorob'ev A. A., Gubenko S. I., Ivanov I. A., Kondratenko V. G., Kononov D. P., Orlova A. M. *Resurs i remontoprigochnost' kolesnykh par podvizhnogo sostava zheleznikh dorog* [Resource and maintainability of wheel sets of rolling stock of railways]. Moscow: INFRA-M Publ., 2011. 264 p. (In Russian)
5. Valinskiy O. S., Vorob'ev A. A., Gubenko S. I. *Povyshenie rabotosposobnosti kolesnykh par podvizhnogo sostava* [Improving the performance of wheel sets of rolling stock]. Kazan': Buk Publ., 2022. 324 p. (In Russian)
6. Popovich M. V., Bugaenko V. M., Volkovoynov B. G. *«Putevye mashiny»* [“Track machines”]. Moscow: «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2019. 960 p. (In Russian)

7. *RSP-M: sayt* [RSP-M: site]. Available at: <http://www.rspm.ru/> (accessed: December 25, 2021). (In Russian)
8. Alyamovskiy A. A. *COSMOSWorks. Osnovy rascheta konstruktsiy na prochnost' v srede SolidWorks* [COSMOS Works. Fundamentals of strength calculation of structures in the SolidWorks environment]. Moscow: DMK Press Publ., 2010. 783 p. Available at: <http://e.lanbook.com/book/1318>. (In Russian)
9. Vatulin Y. S., Potakhov D. A. Stability Control of a Self-Propelled Crane in Dynamic Loading. *Russian Engineering Research*, I. 40 (7), pp. 545-550. DOI: 10.3103/S1068798X20070254
10. Vorobev A. A., Krutko A. A., Shadrina N. U., Badamshin A. M. Study of the stress-strain state of the wheel pair of a freight car during braking. *Journal of Physics: Conference Series*, I. 1260 (7), art. 072019. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/7/072019.
11. Bardyshev O., Popov V., Druzhinin P., Bardyshev A. Expert Review of Metro Escalators Safety.
12. Bardyshev O. A., Popov V. A., Korovin S. K., Filin A. N. Monitoring of technical condition of technical devices at hazardous production facilities. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 2020 (1), pp. 52-56. DOI: 9.24000/0409-2961-2020-1-52-56
13. Bardishev O. A., Druginin P. V., Repin S., Filin A. N., Popov V. A. Method of safety control of transport and technological machines in the initial period of operation (on the example of tunnel escalators). *Bulletin of Civil Engineers*. 2018, I. 6 (71), pp. 129-134. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-6-129-134
14. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. [SP 16.13330.2011. Steel structures]. (IN Russian)

Received: April 15, 2022

Accepted: May 05, 2022

Author's information:

Alexander V. ATAMANYUK — PhD in Engineering, Associate Professor; aleksanderataman@mail.ru

Yan S. VATULIN — PhD in Engineering, Associate Professor; yan-roos@yandex.ru

Alexander A. VOROBIEV — D. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru

Igor Y. NOVOSELSKY — PhD in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru

УДК 625.172

Особенности работы верхнего строения пути в условиях продолжительного зимнего периода

В. П. Бельтюков, А. В. Андреев

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

Для цитирования: Бельтюков В. П., Андреев А. В. Особенности работы верхнего строения пути в условиях продолжительного зимнего периода // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 203–209. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-203-209

Аннотация

Цель: Определение закономерностей изменения технического состояния верхнего строения пути на участках, расположенных в зонах с суровыми климатическими условиями с целью проектирования системы содержания пути в условиях Арктики. **Методы:** В ходе исследования проведен анализ таких основных показателей технического состояния верхнего строения пути как дефектность его элементов (рельсы, скрепления, шпалы, загрязненность балласта) и отступления от норм геометрических параметров рельсовой колеи (уширения, сужения, положение по уровню, перекосы, просадки, положение в плане). Анализ данных производился в соответствии с разработанной моделью зависимости изменения параметров технического состояния верхнего строения пути от наработки тоннажа и срока в годах. **Результаты:** На основании наблюдений определено изменение затрат на содержание пути на линиях, расположенных в условиях продолжительного зимнего периода в части неисправностей рельсовой колеи и дефектности элементов верхнего строения пути. **Практическая значимость:** Результаты исследования предназначены для разработки системы планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту пути в условиях сурового климата.

Ключевые слова: Арктическая зона, верхнее строение пути, система содержания пути в условиях Арктики, путь в условиях сурового климата, затраты на содержание пути.

Введение

В предлагаемой статье рассмотрены результаты анализа работы верхнего строения пути на участках с продолжительностью зимы 5 месяцев и более.

При подготовке исследования был предварительно проведен анализ исследований по моделированию изменения показателей технического

состояния пути в зависимости от наработки тоннажа (рис. 1).

Часто встречаются простые линейные и степенные зависимости, которые не учитывают природу работы пути во времени.

Использование логарифмических зависимостей (у В. В. Мишина [1, 2]), полиномов различной степени [3] также не описывает работу пути,

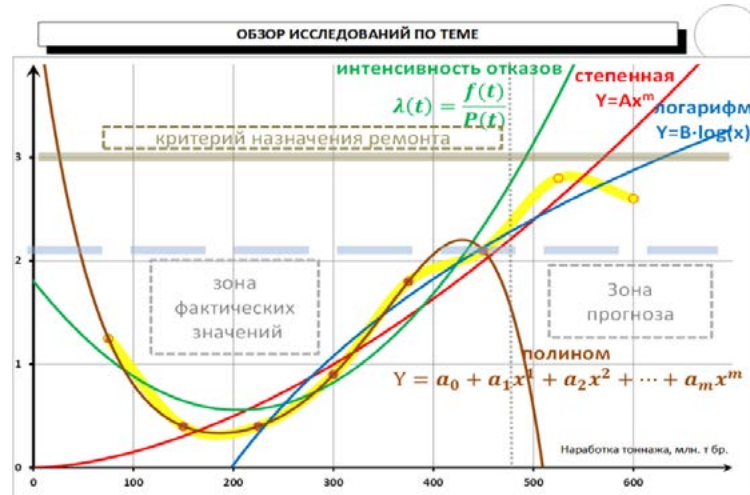


Рис. 1. Обзор использованных различными исследователями моделей работы железнодорожного пути (зависимость изменения показателей состояния верхнего строения от наработки)

а часто дает совершенно неверные и невероятные результаты.

В последнее время используется модель интенсивности отказов теории надежности. Глубоко она проработана в работах Кумара [4], Зоетмана [5], Патры [6]. В ОАО «РЖД» она применена в методологии УРРАН (применительно к различным конструкциям и условиям — например, в работах [7, 8]). Но она также не описывает работу такой восстанавливаемой конструкции пути, как железнодорожный путь.

В результате анализа моделей выявлено, что ни одна из моделей не описывает правильно изменение состояния пути в ходе эксплуатации.

Методика анализа

В результате была предложена модель [9, 10], описывающая работу пути в виде четырех периодов:

- первый период — приработка на протяжении наработки нескольких миллионов тонн пропуска тоннажа;

- второй период — нормальной эксплуатации, стабильно низкое количество неисправностей пути;

- третий период — это период ухудшения состояния пути, накопление числа неустранен-

ных неисправностей и рост числа отказов и предотказов.

Продолжительность третьего периода обусловлена объемом затрат на текущее содержание пути и интенсивностью движения поездов;

- четвертый период можно выделить на участках с низкой грузонапряженностью. На них состояние пути может стабилизироваться при некотором более высоком количестве неустраненных неисправностей.

Модель работы пути во времени может быть представлена в следующем виде (рис. 2)

Эта модель может быть описана зависимостью для любого параметра состояния пути Y от наработки тоннажа или срока эксплуатации в годах x :

$$Y = B \frac{m}{t_0} x^{m-1} + C + A \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \right] \left[\frac{\eta}{\frac{x}{\beta} \ln \eta + 1} \right], \quad (1)$$

где первый член описывает постепенное уменьшение числа неисправностей по гиперболическому закону в период приработки; второй член C — незначительный объем случайных неисправностей в период нормальной эксплуатации;

третий член описывает закономерности нарастания число отказов, предотказов и отступлений в период ухудшения состояния пути. При этом последний множитель в круглых скобках описывает поведение системы с учетом объемов работ текущего содержания. В зависимости от коэффициента полноты восстановления конструкции после работ η количество неисправностей может как увеличиваться, так и уменьшаться.

Остальные параметры зависимостей вычисляются в ходе аппроксимационных расчетов.

Материалы для анализа

Анализ производился на основании материалов баз данных по состоянию участков пути железных дорог, подразделенных на группы в соответствии с выделенными типовыми условиями эксплуатации, описанными во введении. В качестве участков с продолжительным зимним периодом выбраны районы, на которых период низких температур в соответствии составляет 150 и более суток. Исследовались данные по участкам с уложенными новыми закаленными рельсами типа Р65, железобетонными шпалами на щебеночном балласте. Обследовались участки с наиболее распространенными типами креплений (КБ, ЖБР, АРС). Для сопоставимости данных для анализа были взяты только те километры, на протяжении которых не изменяются ни конструкция пути, ни набор выполненных ранее ремонтов. Все участки прямые, без кривых.

По результатам аппроксимационного анализа построены зависимости изменения основных параметров технического состояния пути. В расчете использованы многие тысячи километров, поэтому на приведенных далее графиках показаны только сглаженные зависимости, полученные в результате аппроксимации.

По результатам анализа была определена стоимость затрат на текущее содержание пути для участков с продолжительным зимним периодом.

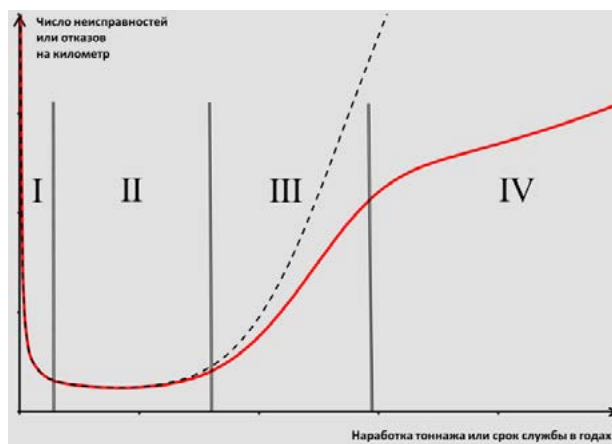


Рис. 2. Модель изменения параметров технического состояния пути в зависимости от наработки тоннажа в млн т брутто или длительности эксплуатации пути после укладки в годах

Результаты анализа

На графиках (рис. 3) показаны зависимости среднего числа отступлений, неисправностей и дефектов элементов верхнего строения пути в зависимости от пропущенного тоннажа на участках в регионах с длительной зимой (winter) в сравнении с обычными условиями эксплуатации (network).

Анализ зависимостей показывает, что количество неисправностей по ширине колеи на участках с длительным зимним периодом почти на всем периоде эксплуатации примерно на 20 % превышает аналогичный показатель для всей сети и на 30 % превышает показатель для участков пассажирского движения. При этом наихудшие показатели показывает крепление АРС.

Количество неисправностей, требующих выправки в профиле, на участках с длительным зимним периодом почти примерно такое же, как по всей сети, но в 1,5–2 раза превышает показатели для участков пассажирского движения. Наихудшие показатели показывает крепление ЖБР.

Количество неисправностей, требующих выправки в плане, на участках с длительным

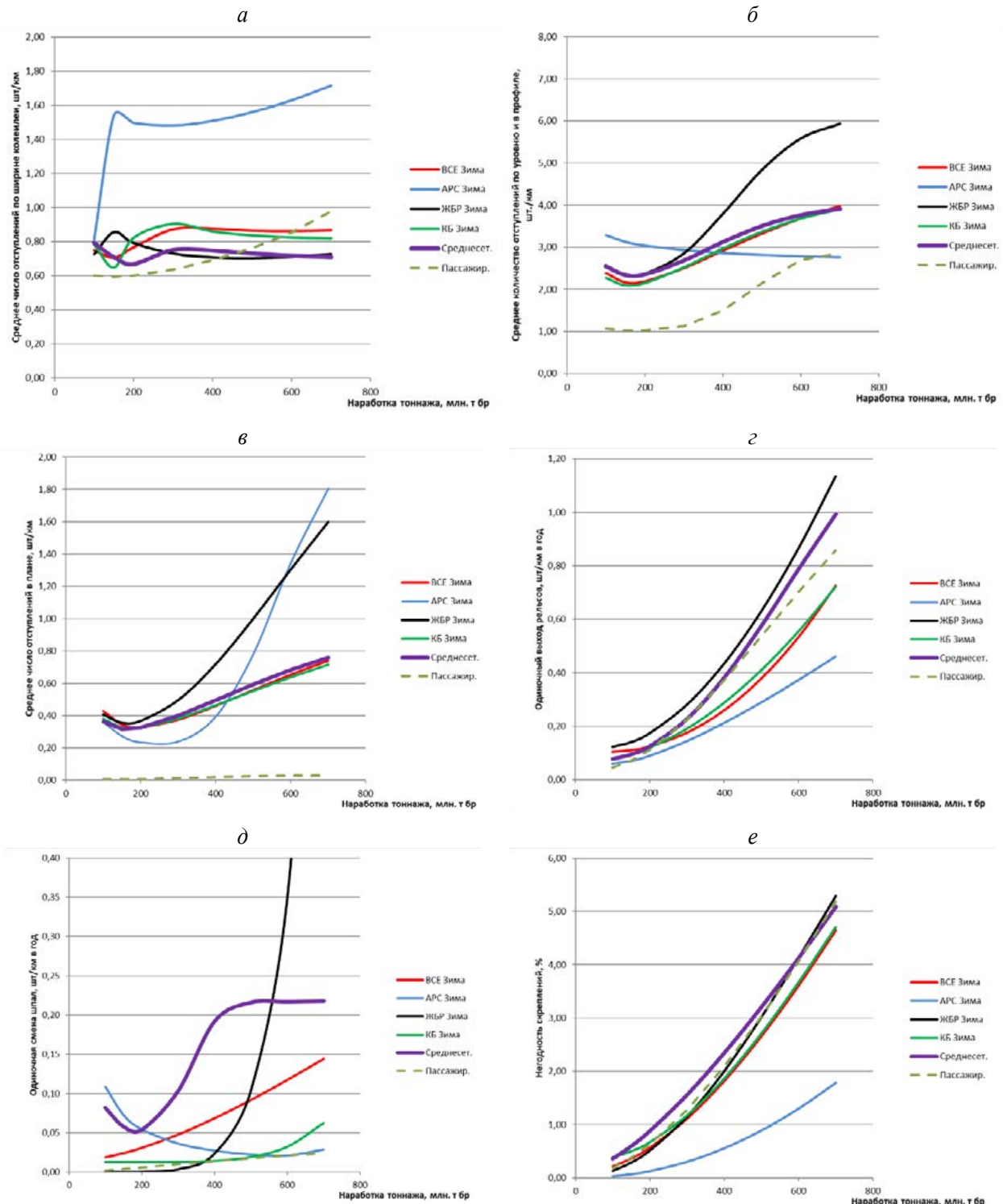


Рис. 3. Зависимость среднего количества отступлений пропущенного тоннажа: *a* — неисправности по ширине колеи; *б* — неисправности, требующие выправки пути в профиле и по уровню; *в* — отступления от положения пути в плане; *г* — объемы одиночного выхода рельсов; *д* — объемы одиночной замены шпал; *е* — доля негодных креплений. Обозначения зависимостей: Среднесет. — среднесетевые зависимости для всего протяжения сети; ВСЕ Зима — для участков с продолжительностью зимы 5 мес. и более, в том числе: АРС Зима — для участков со креплениями АРС; ЖБР Зима — для участков со креплениями ЖБР; КБ Зима — для участков со креплениями КБ; Пассажир. — для участков пассажирского движения

зимним периодом примерно такое же, как по всей сети. При этом объемы работ по рихтовке для скреплений АРС и ЖБР значительно возрастают с ростом пропущенного тоннажа.

Одиночный выход рельсов на участках с длительным зимним периодом примерно такой же, как по всей сети, и даже ниже. Это объясняется тем, что на этих участках преимущественно грузовое движение и наработка тоннажа происходят быстрее.

Рост числа негодных скреплений на участках с длительным зимним периодом примерно такой же, как по всей сети. Исключение составляет путь на скреплениях АРС, на котором выход скреплений в негодные ниже, чем для остальных скреплений.

По результатам анализа были определены суммарные затраты на устранение выявляемых объемов неисправностей (рис. 4).

Анализ показал, что средние затраты на работы текущего содержания в расчете на один миллион тонн немного меньше, чем затраты по сети. Это обусловлено тем, что это участки грузовых перевозок, как правило, с высокой грузонапряженностью, поэтому затраты на один год будут значительно выше.

Заключение

Разработанная модель изменения параметров технического состояния пути в зависимости от наработки тоннажа или количества лет эксплуатации позволяет провести сравнительный анализ изменения состояния пути, объемов работ, затрат на содержание пути для применения их в дальнейшем планировании.

В частности, для участков, находящихся в районах с длительной зимой, по результатам анализа можно сделать выводы о сферах применения различных конструкций пути.

Так, скрепления АРС показывают низкую способность противостоять поперечным переме-

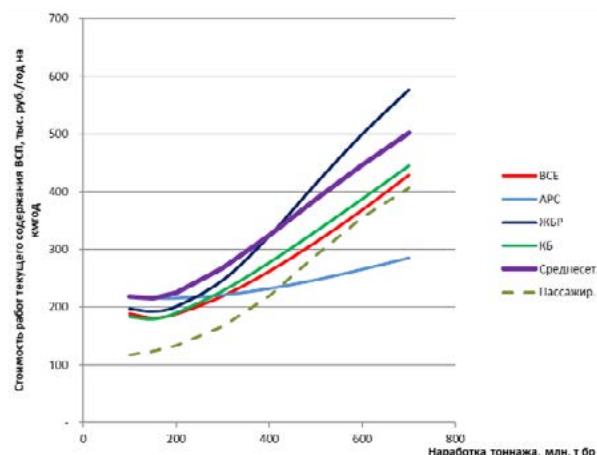


Рис. 4. Зависимость прямых затрат на работы текущего содержания пути от пропущенного тоннажа (обозначения — как на рис. 3)

ниям рельса, особенно в кривых участках пути, нагрузках от грузовых поездов в условиях низких температур. Это вызывает появление неисправностей по ширине колеи и по положению в плане.

Скрепления ЖБР требуют доработки для достижения необходимой жесткости пути для исключения динамических ударов от подвижного состава в период низких температур при замерзшем балласте как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Новые конструкции скреплений ЖБР (ЖБР-65 ПШМ, ЖБР-65 ПШР) должны решить эту проблему, но для подтверждения их эффективности требуются дополнительные многолетние наблюдения.

Скрепление КБ пригодно для работы в суровых условиях, но при условии невысоких грузонапряженностей и скоростей движения поездов.

Библиографический список

1. Мишин В. В. Вероятностно-статистический анализ перекоса и просядок рельсовой колеи / В. В. Мишин // Вестник ВНИИЖТ. — 2004. — № 4. С. 31–36.
2. Прогнозирование состояния пути. проблемы и решения // Путь и путевое хозяйство. — 2011. — № 7. — С. 2–6.

3. Pevzner V. Improving the Railway Stability in the Joint Zone for Modern Operating Conditions / V. Pevzner, V. Kaplin // *Transportation Research Procedia*, 2 March 2021.
4. Kumar S. A Study of the Rail Degradation Process to Predict Rail Breaks / S. Kumar // *Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå University of Technology*. — 2006. — Pp. 47–59.
5. Zoeteman A., Coenraad E. Evaluating Track Structures: Life Cycle Cost Analysis as a Structured Approach / A. Zoeteman, E. Coenraad. — Delft University of Technology, Delft, 2000.
6. Patra A. RAMS and LCC in Rail Track Maintenance / A. Patra // *Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå University of Technology*, 2007. — Pp. 37–71.
7. Asalkhanova T. Development of Strategies for Analysing the Factors which Influence the Organization of Routine Railway Track Maintenance / T. Asalkhanova, I. Karpov, E. Kolisnichenko // *Transportation Research Procedia*, 3 February 2022. — Vol. 61 (Cover date: 2022). — Pp. 582–587.
8. Smerdov D. Indicators of Reliability of Artificial Structures with Elements Made of Polymer Composite Materials at all Stages of their Life Cycle on the Basis of Risk Assessment / D. Smerdov, A. Klementyev // *Transportation Research Procedia*. — 2017. — Vol. 20. — Pp. 624–629.
9. Beltiukov V. Evaluation of Effectiveness of Separating Layers in Railroad Track Structure Using Life Cycle Cost Analysis / V. Beltiukov, E. Shehtman, O. Malikov // *Procedia Engineering*. — 2017.
10. Beltiukov V. Analysis of Changes of Track Upper Structure Technical Condition and its Operation Costs in Regions with Long Winter Period for Different Types of Rail Fastenings / V. Beltiukov, A. Andreev, A. Sennikova // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions (Lecture notes in Civil Engineering)*. — 2020. — Vol. 1. — Pp. 265–274. — DOI 10.1007/978-981-15-0450-1_27, eid: 2-s2.0-85078149994.
- Дата поступления: 21.03.2022
Решение о публикации: 04.05.2022
- Контактная информация:**
БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович — д-р техн. наук, профессор; bw@peterlink.ru
АНДРЕЕВ Андрей Викторович — ассистент; oddman@bk.ru

Specificities of Work of Railway Permanent Way in Conditions of Continuous Winter Period

V. P. Beltiukov, A. V. Andreev

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

For citation: Beltiukov V. P., Andreev A. V. Specificities of Work of Railway Permanent Way in Conditions of Continuous Winter Period // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 203–209. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-203-209

Summary

Purpose: To determine legitimacies of changes in technical state of railway permanent way in the areas with harsh climate conditions with the purpose to design track maintenance system in the Arctic conditions. **Methods:** During the study, an analysis of main indicators of permanent way (upper construction) technical condition was carried out such as the way's element defectiveness (rails, fastenings, sleepers, ballast pollution) and faults of geometric parameter norms of rail track (widening and narrowings, alignment by a level, sags, subsidences, position in a plan). Data analysis was carried out in accordance with specially created model of the dependence

of changes in the parameters of permanent way technical condition from a workload tonnage inclusive of annual periods. **Results:** Based on the observations, the change in track maintenance costs for the lines located in continuous winter conditions was determined. These are costs, related to railway track faults and defectiveness of track superstructure (permanent way) elements. **Practical importance:** The results of the study 're intended for the work planning system development on track maintenance and repairs in harsh climate conditions.

Keywords: Arctic zone, permanent way, track maintenance system in a harsh climate, track maintenance costs.

References

1. Mishin V. V. Veroyatnostno-statisticheskiy analiz perekosa i prosadok rel'sovoy kolei [Probabilistic-statistical analysis of skew and subsidence of the rail gauge]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik VNIIZhT]. 2004, I. 4, pp. 31-36. (In Russian)
2. Prognozirovaniye sostoyaniya puti. problemy i resheniya [Forecasting the state of the path. problems and solutions]. Put' i putevoe khozyaystvo [Way and track facilities]. 2011, I. 7, pp. 2-6. (In Russian)
3. Pevzner V., Kaplin V. Improving the Railway Stability in the Joint Zone for Modern Operating Conditions. Transportation Research Procedia. March 2, 2021.
4. Kumar S. A Study of the Rail Degradation Process to Predict Rail Breaks, Division of Operation and Maintenance Engineering. Luleå University of Technology. 2006, pp. 47-59.
5. Zoeteman A., Coenraad E. Evaluating Track Structures: Life Cycle Cost Analysis as a Structured Approach. Delft University of Technology, Delft, 2000.
6. Patra A. RAMS and LCC in Rail Track Maintenance. Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå University of Technology. 2007, pp. 37–71.
7. Asalkhanova T., Karpov I., Kolisnichenko E. Development of Strategies for Analysing the Factors which Influence the Organization of Routine Railway Track Maintenance. Transportation Research Procedia. 2022, vol. 61, pp. 582–587.
8. Smerdov D., Klementyev A. Indicators of Reliability of Artificial Structures with Elements Made of Polymer Composite Materials at all Stages of their Life Cycle on the Basis of Risk Assessment. Transportation Research Procedia. 2017, vol. 20, pp. 624–629.
9. Beltiukov V., Shehtman E., Malikov O. Evaluation of Effectiveness of Separating Layers in Railroad Track Structure Using Life Cycle Cost Analysis. Procedia Engineering. 2017
10. Beltiukov V., Andreev A., Sennikova A. Analysis of Changes of Track Upper Structure Technical Condition and its Operation Costs in Regions with Long Winter Period for Different Types of Rail Fastenings. Transportation Soil Engineering in Cold Regions (Lecture notes in Civil Engineering). 2020, vol. 1, pp. 265–274. DOI 10.1007/978-981-15-0450-1_27, eid: 2-s2.0-85078149994.

Received: March 21, 2022

Accepted: May 04, 2022

Author's information:

Vladimir P. BELTIUKOV — D. Sci. in Engineering, Professor; bw@peterlink.ru

Andrey V. ANDREEV — Assistant; oddman@bk.ru

УДК 620.174.24

Выбор материалов и конструктивных решений раздвижной стены сменного кузова

О. И. Зайнитдинов¹, С. О. Комиченко²

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

² АО «НВЦ Вагоны», Российская Федерация, 190031, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 2

Для цитирования: Зайнитдинов О. И., Комиченко С. О. Выбор материалов и конструктивных решений раздвижной стены сменного кузова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 210–220. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-210-220

Аннотация

Цель: Выбор материалов и разработка конструкции раздвижной стены для сменного кузова с раздвигающимися боковыми стенами и крышей. **Методы:** Разработка и расчет конструкции раздвижной стены сменного кузова выполнялись согласно нескольким технико-нормативным документам с помощью конструкторских программ КОМПАС-3D v18.1 и SOLIDWORKS 2016. Механические испытания образцов проводились на базе ПГУПС в механической лаборатории им. проф. Н. А. Белелюбского. **Результаты:** Разработана конструкция раздвижной двери сменного кузова. Предложены варианты образцов боковых стен сменного кузова с различными материалами и конструкцией. Проведены натурные испытания образцов для определения механических свойств. Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований по определению напряженно-деформированного состояния конструкции образцов раздвижных боковых стен сменного кузова. **Практическая значимость:** Разработанная конструкция раздвижной стены с применением различных материалов дает возможность снизить массу тары новых проектируемых сменных и съемных кузовов с раздвигающимися боковыми стенами и крышей, при этом сохраняя свои прочностные характеристики.

Ключевые слова: Раздвижная дверь, алюминиевые панель, конструкция элемента кузова, алюминиевый составной каркас, профильная труба, обшивка, математическая модель, механические свойства.

Введение

Для повышения эффективности работы железнодорожного транспорта в последние годы рассматривается вопрос создания принципиально нового подвижного состава — вагонов со съемными или сменными кузовами [1–3].

У таких вагонов наиболее дорогая часть — рама с ходовыми частями, автотормозным обо-

рудованием и автосцепками — будет постоянно эксплуатироваться, а сменные кузова будут меняться в зависимости от перевозимого груза [4]. Терминология в названиях пока не устоялась, в данной работе съемным кузовом называется кузов, который может подниматься в груженном состоянии, а сменным — который рассчитан на подъем только в порожнем состоянии. В статье

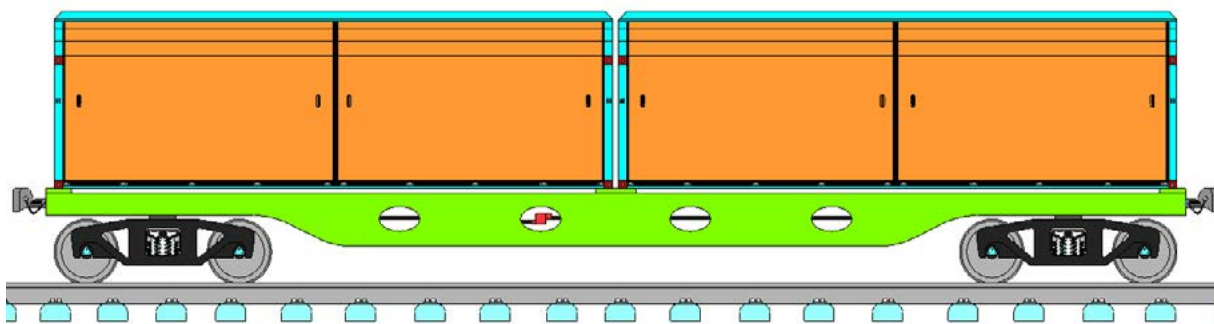


Рис. 1. Общий вид вагона со сменными кузовами крытого типа

рассматриваются вопросы разработки конструкции сменного кузова, аналога крытого вагона. Предлагается, что такой сменный кузов должен эксплуатироваться (загружаться и разгружаться) аналогично крытому вагону на существующих терминалах. Подъем и замена сменного кузова будет осуществляться только при сезонных изменениях в спросе на перевозки в крытых вагонах. При ряде достоинств современные крытые вагоны обладают одним общим недостатком — малой длиной фронта погрузочных работ. Применение уширенных дверей частично улучшает разгрузку, но не устраняет указанный недостаток полностью. Поэтому, на наш взгляд, сменный крытый кузов должен предоставлять лучший доступ к перевозимому грузу, для увеличения фронта работ при загрузке — выгрузке и креплении необходима разработка новой конструкции боковых дверей, которая бы позволяла вести по всей длине вагона погрузо-выгрузочные работы на существующих терминалах [5]. В работе [6] предложено оснащать сменные кузова подъемными дверями. Такое решение требует больших энергозатрат и усилий на открывание. Поэтому предлагается создать новую конструкцию сдвижной боковой стены облегченной конструкции. Такая стена позволит первоначально разгрузить одну половину кузова, а потом вторую. К сдвижной стене предъявляется ряд требований по прочности и недеформируемости, связанных не

только с ее надежным прикреплением и возможностью легкого открывания, но и возможностью навала груза [7].

Общий вид предлагаемого вагона со сменными кузовами представлен на рис. 1. Проектируемый сменный кузов предназначен для перевозки тарно-штучных, пакетированных и длинномерных грузов [8–10]. Конструкция кузова имеет четыре автономные раздвижные двери, установленные на роликовых опорах, которые раздвигаются вдоль кузова, освобождая пространство на половине длины кузова. Технические характеристики сменного кузова представлены в табл. 1.

В проектируемом сменном кузове загрузка и выгрузка грузов предусматривается через боковые раздвижные стены с помощью автопогрузчиков, которые могут свободно заезжать с грузом во внутрь сменного кузова и свободно маневрировать внутри.

На рис. 2 приведена модель конструкции раздвижной стены сменного кузова.

Конструкция раздвижной стены состоит из профильного каркаса, обшитого листом, верхняя и нижняя части оборудованы роликовыми подвесками (рис. 2).

Для испытания и определения механических свойств конструкции раздвижной стены в качестве четырех образцов была выбрана одна ячейка раздвижной стены из профильного каркаса в масштабе 1:1 с использованием различных мате-

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики сменного кузова

| Наименование параметров | Значение |
|---|---------------------------|
| Максимальная грузоподъемность, т | 30 |
| Масса тары сменного кузова, т | 5,9 |
| Масса брутто вагона, т | 36 |
| Площадь пола максимальная, м ² | 36,2 |
| Высота наружная максимальная, мм | 3800 |
| Длина наружная максимальная, мм | 12,200 |
| Ширина наружная максимальная, мм | 3200 |
| Внутренняя длина кузова, мм | 12,000 |
| Внутренняя высота кузова, мм | 3400 |
| Внутренняя ширина кузова, мм | 3020 |
| Объем сменного кузова, м ³ | 122 |
| Количество дверей, шт. | 4 |
| Ширина дверного проема, мм | 6000 |
| Высота дверного проема, мм | 3400 |
| Толщина двух боковых раздвижных стен, мм | 180 |
| Толщина двух торцевых стен, мм | 200 |
| Количество фитингов верхних, шт. | 4 |
| Количество фитингов нижних, шт. | 4 |
| Материалы изготовления элементов кузова | 345-09Г2С ГОСТ 19281–2014 |

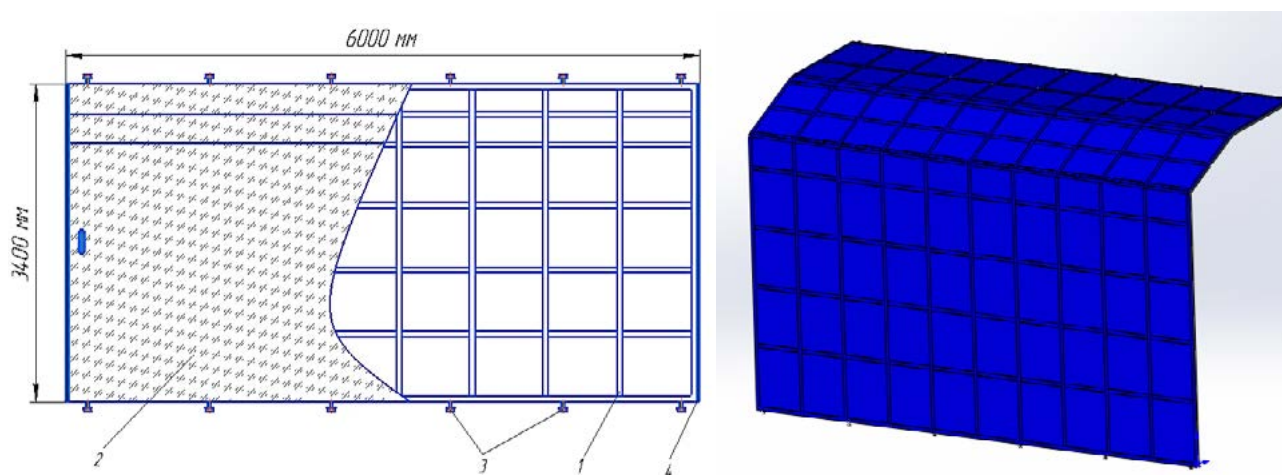


Рис. 2. Общий вид раздвижной стены сменного кузова:

1 — профильный каркас двери; 2 — обшивка двери; 3 — ролики; 4 — резиновые уплотнители

риалов. Технические характеристики выбранных образцов приведены в табл. 2. Механические характеристики материалов, применяемых в образцах, представлены в табл. 3.

Методика испытания образцов

В ходе исследования прочностных характеристик образцы (табл. 2) были подвергнуты натурным механическим испытаниям на трех точечных

ТАБЛИЦА 2. Характеристики испытываемых образцов

| № | Наименование образцов | Конструктивная схема образцов, 600 × 600 × 22 мм | Несущий профиль, 40 × 20 × 2 мм | Масса образцов, кг | Общий вид образцов |
|---|---|--|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | Алюминиевый составной каркас из конструкционного профиля: АД31Т1 / ГОСТ 4784—97 Уголок с перемычкой марки: УП-1 × 4-4040 Крепежные винты: DIN7380 M5 × 10 Zn | | | 3,30 | |
| | Алюминиевый рифленый лист: АМг2НР 1,5 мм ГОСТ 21631—76 | | | | |
| 2 | Сварной каркас из алюминиевого прямоугольно-трубчатого профиля из марки сплава АД31Т1 (6060) ГОСТ 18475—82 | | | 2,70 | |
| | Алюминиевый рифленый лист: АМг2НР 1,5 мм ГОСТ 21631—76 | | | | |
| 3 | Сварной каркас из стального прямоугольно-трубчатого профиля из марки сплава Ст3 ГОСТ 8645—68 | | | 5,30 | |
| | Алюминиевый рифленый лист: АМг2НР 1,5 мм ГОСТ 21631—76 | | | | |
| 4 | Сварной каркас из алюминиевого прямоугольно-трубчатого профиля из марки сплава АД31Т1 (6060) ГОСТ 18475—82 | | | 2,20 | |
| | Полимерный композиционный «Прег», армированный стекломатом. Плотность 300 кг/м ³ | | | | |

Примечание: Все четыре предложенных образца имеют размеры в масштабе 1:1, выбраны в качестве одной ячейки раздвижной двери (рис. 1).

ТАБЛИЦА 3. Механические характеристики материалов, применяемых в образцах

| Характеристики материалов | Алюминиевая профильная труба | Стальная профильная труба | Алюминиевый рифленый лист | Полимерный композиционный материал «Прег» |
|---|------------------------------|---------------------------|---------------------------|---|
| Плотность, кг/м ³ | 2850 | 7850 | 2850 | 300 г/м ² |
| Временное сопротивление σ_b , МПа (кгс/мм ²) | 196 (20) | 400 (40) | 220 (22) | 73 (7) |
| Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм ²) | 210 (21) | 242 (24) | 190 (19) | 54 (5) |
| Относительное удлинение σ , % | 8 | 25 | 10 | 3 |

изгибах. Схема испытания образцов приведена на рис. 3.

Испытания проводились согласно стандартам ГОСТ 3728—78, при комнатной температуре на универсальной испытательной машине типа НВ-250 с погрешностью не более 1 % (рис. 4).

Образцы устанавливались на основание испытательной машины на высоте 180 мм на двух опорах, в качестве опор служили железнодорожные рельсы марки Р65 длиной 1000 мм.

Все четыре образца имеют одинаковые размеры 600 × 600 × 20 мм с разными составляющими материалами (табл. 2). На рис. 5 приведен процесс испытания четырех образцов на трехточечный изгиб под универсальной испытательной машины НВ-250. Максимальный ход перемещения нагружателя составляет 1200 мм. Из-за нехватки длины перемещения подвижной траверсы на образцах устанавливались дополнительные жесткие элементы, с помощью которых

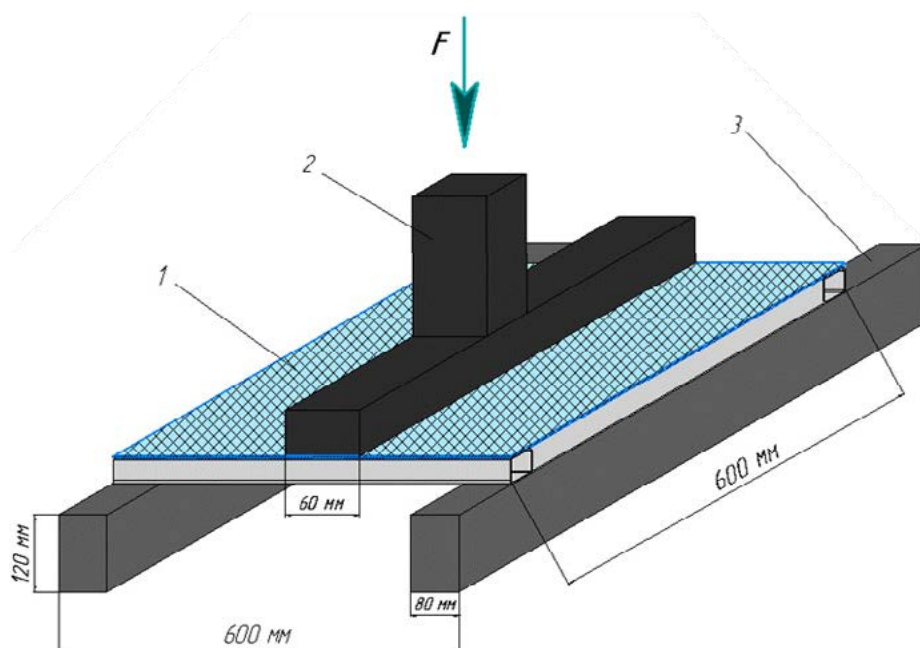


Рис. 3. Схема нагружения образцов при статическом изгибе:
1 — испытуемый образец; 2 — нагрузитель; 3 — опоры



Рис. 4. Универсальная испытательная машина
типа HB-250

увеличивался ход нагрузителя до полного выявления потери устойчивости образцов.

Результаты натурного испытания на трехточечный изгиб и прочностные характеристики четырех образцов представлены в следующих диаграммах на рис. 6.

Максимальная приложенная нагрузка для всех четырех образцов составляла 14 кН. Согласно диаграмме нагружения первого образца полное разрушение наблюдается в диапазоне 7,25–7,50 кН. Потеря устойчивости образца происходит в диапазоне 4,0–4,5 кН.

Разрушение второго образца сварной конструкции из алюминиевого профиля происходило в диапазоне 6,0–6,25 кН. При этом потеря устойчивости образца наблюдается также в пределах нагрузки 4,0–4,5 кН.

Для испытания третьего образца (Сварной каркас из стального прямоугольно-трубчатого профиля (Fe-Al)) полное разрушения образца наблюдается в пределах нагрузки 12,0–12,2 кН, что указывает на большую прочность в сравне-

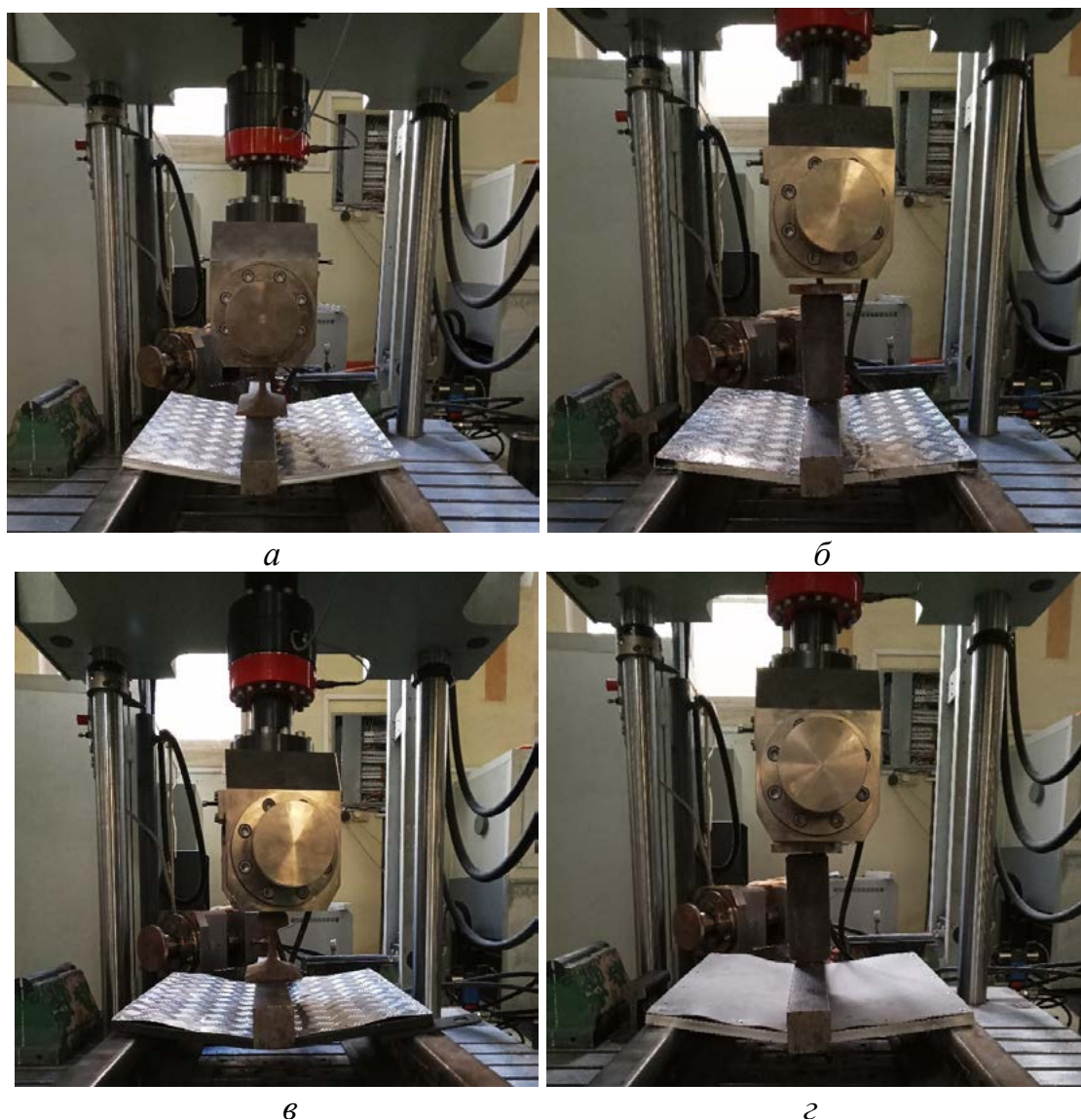


Рис. 5. Испытания образцов на трехточечный изгиб:
а — алюминиевый составной каркас из конструкционного профиля (Al-Al);
б — сварной каркас из алюминиевого прямоугольно-трубчатого профиля (Al-Al);
в — сварной каркас из стального прямоугольно-трубчатого профиля (Fe-Al);
г — сварной каркас из алюминиевого прямоугольно-трубчатого профиля (Al-ПКМ)

нии с предыдущими образцами. Нагрузка потери устойчивости образца — 6,0–6,5 кН.

Как видно на диаграмме нагружения четвертого образца, полное разрушение с полимерным композиционным материалом происходит при нагрузке в пределах 5,75–5,9 кН. Потеря устойчивости образца наблюдается в диапазоне нагрузке 4,0–4,2 кН.

Проведенные расчеты на прочность и натурные испытания образцов по определению меха-

нических свойств предложенных материалов и конструкций показали, что наибольшую прочность имеет третий образец, сварной каркас из стального прямоугольно-трубчатого профиля (Fe-Al). Основным недостатком данного образца является его большая масса, равная 5,30 кг. Хорошие результаты показал алюминиевый составной каркас из конструкционного профиля (Al-Al), имеющий массу 3,30 кг, с максимальной проч-

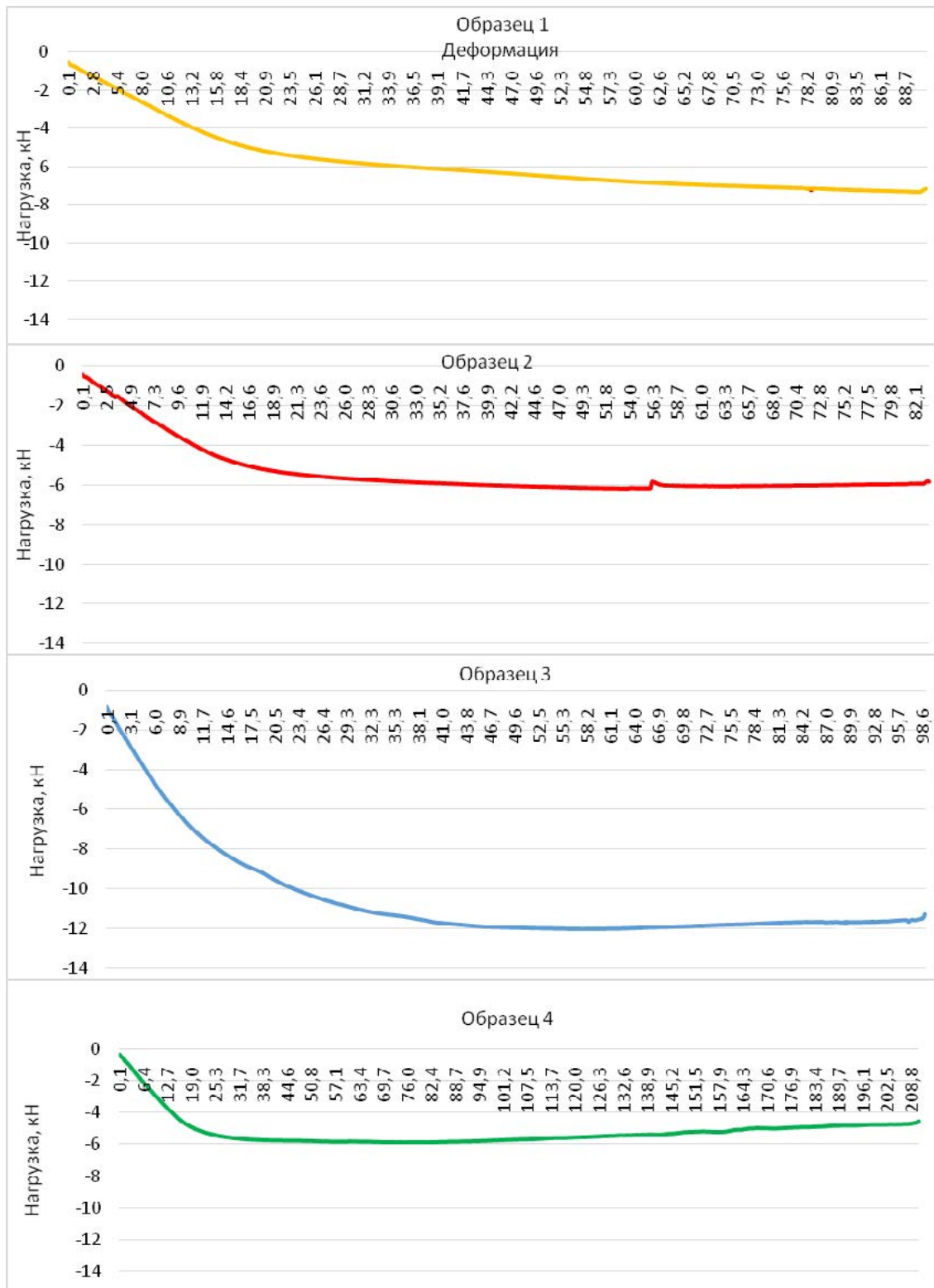


Рис. 6. Диаграмма нагружения образцов при трехточечном изгибе:
образец 1 — алюминиевый составной каркас из конструкционного профиля (Al-Al);
образец 2 — сварной каркас из алюминиевого прямоугольно-трубчатого профиля (Al-Al);
образец 3 — сварной каркас из стального прямоугольно-трубчатого профиля (Fe-Al);
образец 4 — сварной каркас из алюминиевого прямоугольно-трубчатого профиля (Al-ПКМ)

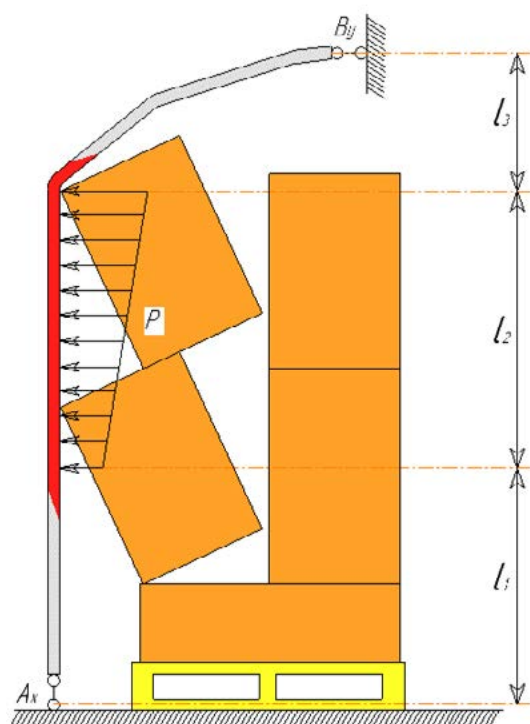


Рис. 7. Расчетная схема раздвижной стены сменного кузова в случаях навала груза на нее при транспортировке

Имя модели: раздвижная дверь

Название исследования: статистический анализ

Тип эюры: статистический анализ узловое напряжение

Шкала деформации: 100

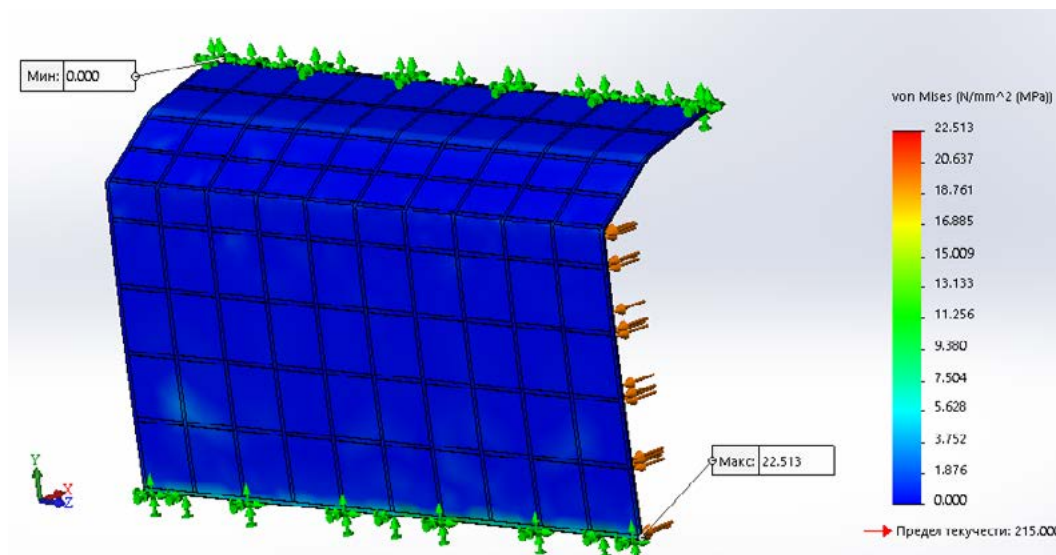


Рис. 8. Распределение эквивалентных узловых напряжений в конструкции раздвижной двери сменного кузова (МПа)

ностью 7,50 кН. Недостатком (образец № 1) этой конструкции является его способ крепления и крепежные элементы.

С учетом результатов испытаний была создана математическая модель раздвижной стены сменного кузова в программе SolidWorks 2016. На рис. 7 представлена расчетная схема раздвижной стены сменного кузова в случаях навала груза на нее при транспортировке.

С помощью метода конечных элементов согласно расчетной схеме был смоделирован навал груза с внутренней стороны раздвижной стены.

В результате расчета получены эпюры распределения узловых напряжений, представленные на рис. 8.

При расчете была приложена нагрузка, равная 10 кН для данной конструкции раздвижной стены из алюминиевого сплава марки 5052-Н34. Анализ расчета эпюры узловых напряжений в конструкции раздвижной стены показывает, что наиболее напряженными зонами в конструкции

ТАБЛИЦА 4. Результаты испытания раздвижной стены

| Приложенная нагрузка, кН | Предел текучести материала, МПа | Максимальное узловое напряжение, МПа | Коэффициент запаса прочности | Узлы Элементы | Материалы стены |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|----------------|-------------------|
| 10 | 215 | 22,5 | 1,0 | 29020 16298 | А1-А1 5052-Н34 |

двери оказалась средняя часть стены, имеющая максимальное напряжение 22,5 МПа. Результаты расчета моделирования раздвижной стены приведены в табл. 4.

Долговечность и надежность конструкции проектируемых сменных и съемных кузовов, их узлов и деталей (элементов) зависят от соответствующих выбранных материалов, технологических процессов (методов) изготовления и от ремонтпригодности несущих элементов. Использование наиболее рациональных конструктивных форм и профилей деталей и узлов сменных и съемных кузовов грузовых вагонов позволяет достичь необходимой прочности при наименьшей собственной массе кузова. Алюминиевый составной каркас из конструкционного профиля (А1-А1), изготовленный методом горячего выдавливания, является наиболее подходящим конструкционным материалом для применения в качестве обшивки раздвижных дверей сменных и съемных кузовов грузовых вагонов.

Библиографический список

1. Бороненко Ю. П. Перспективы внедрения вагонов со съемными кузовами увеличенной грузоподъемности / Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2017. — Т. 14. — Вып. 3. — С. 437–451.
2. Даукша А. С. Съемные кузова — инновационный вариант совершенствования конструкции вагонов / А. С. Даукша // Системы автоматизированного проектирования на транспорте: сб. трудов V Междунар. науч.-практ. конференции. — СПб.: ПГУПС, 2014. — С. 50–52.
3. Соколов А. М. Разработка сочлененного вагона-платформы со съемными кузовами для повышения эффективности перевозок / А. М. Соколов, К. В. Кякк, А. С. Кононенко // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сб. трудов XII Междунар. науч.-технич. конференции. — СПб.: ПГУПС, 2017. — С. 80–83.
4. Бороненко Ю. П. Результаты маркетингового исследования опций «умной» скоростной платформы / Ю. П. Бороненко, О. Д. Покровская, Т. С. Титова, Д. В. Шевченко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 3 — С. 353–376.
5. Даукша А. С., Преимущества и перспективы внедрения съемных кузовов вагонов / А. С. Даукша, Ю. П. Бороненко // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сб. тр. XI Международ. науч.-технич. конф. — СПб.: ПГУПС, 2016. — С. 12–14.
6. Бороненко Ю. П. Анализ технических решений вагона-паллетовоза / Ю. П. Бороненко, О. Д. Покровская, Т. С. Титова и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 1. — С. 95–120.
7. Кононенко А. С. Сочлененные вагоны-платформы со съемными кузовами повысят эффективность перевозок / А. С. Кононенко, А. А. Меркулов, А. Ю. Новоселов и др. // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2018. — № 4. — С. 36–40.
8. Зайнитдинов О. И. Сменный кузов для перевозки тарно-штучных грузов / О. И. Зайнитдинов, А. С. Даукша // Транспорт Российской Федерации. — СПб.: ПГУПС, ООО «Т-ПРЕССА». — 2021. — Вып. 4(95). — С. 47–49.
9. Даукша А. С. Совершенствование вагонов на основе использования съемных кузовов / А. С. Даукша, Ю. П. Бороненко // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сб. тр. X Международ. науч.-технич. конф. — СПб.: ПГУПС, 2015. — С. 45–53.

10. Бороненко Ю. П. Стратегические задачи вагоностроителей и развитии тяжеловесного движения / Ю. П. Бороненко // Транспорт РФ. — 2013. — № 5 — С. 68–74.

Дата поступления: 04.04.2022

Решение о публикации: 24.04.2022

Контактная информация:

ЗАЙНИТДИНОВ Олмос Ирикович — аспирант;
zaynitdinovo@mail.ru

КОМИЧЕНКО Станислав Олегович —
начальник отдела испытаний металлопродукции;
komichenko@gmail.com

Choice of Materials and Constructive Settlements of Sliding Wall Interchangeable Body

O. I. Zaynitdinov¹, S. O. Komichenko²

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

²Corporation “NVC Vagoni”, 2, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Zaynitdinov O. I., Komichenko S. O. Choice of Materials and Constructive Settlements of Sliding Wall Interchangeable Body // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 210–220. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-210-220

Summary

Purpose: Material choice and construction development of sliding wall for interchangeable body with expanding side walls and roof. **Methods:** Development and calculation of interchangeable body sliding wall construction were being fulfilled according to several technical-normative documentations with the help of engineering programs КОМПАС-3Dv18.1 and SOLIDWORKS 2016. Mechanical trials of samples were held on the basis of Petersburg Transport University in Mechanical Laboratory named after Prof. Beleyubskiy N. A. **Results:** interchangeable body slide door construction has been developed. The variants of samples of interchangeable body side wall of various materials and construction are proposed. Sample “on location” trials to define mechanical properties were pursued. The results on experimental and theoretical research to define stress-deformable sample states for interchangeable body sliding side walls are given. **Practical importance:** The developed construction of sliding wall with various material application makes it possible to lower tare mass of new being projected interchangeable and removable bodies with expanding slide walls and roof wherein preserving own strength characteristics.

Keywords: Sliding door, aluminum panel, body element construction, aluminum composite frame, profile pipe, sheathing, mathematical model, mechanical properties.

References

1. Boronenko Yu. P. Perspektivy vnedreniya vagonov so s”emnymi kuzovami uvelichennoy gruzopod”emnosti [Prospects for the introduction of wagons with increased load capacity swap bodies]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the Petersburg University of

Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2017, vol. 14, I. 3, pp. 437–451. (In Russian)

2. Dauksha A. S. S”emnye kuzova – innovatsionnyy variant sovershenstvovaniya konstruktсии vagonov [Demountable bodies - an innovative option for improving the design of cars]. *Sistemy avtomatizirovannogo*

proektirovaniya na transporte [Automated design systems in transport]. St. Petersburg.: PGUPS Publ., 2014, pp. 50–52. (In Russian)

3. Sokolov A. M. Razrabotka sochlenennogo vagona-platformy so s"emnymi kuzovami dlya povysheniya effektivnosti perevozok [Development of an articulated platform car with swap bodies to improve the efficiency of transportation]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty* [Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2017, pp. 80–83. (In Russian)

4. Boronenko Yu. P., Pokrovskaya O. D., Titova T. S., Shevchenko D. V. Rezul'taty marketingovogo issledovaniya optsiy «umnoy» skorostnoy platformy [The results of a marketing study of the options of a “smart” high-speed platform]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, I. 3, pp. 353–376. (In Russian)

5. Dauksha A. S. Preimushchestva i perspektivy vnedreniya s"emnykh kuzovov vagonov [Benefits and prospects for the introduction of swap body cars]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty* [Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2016, pp. 12–14. (In Russian)

6. Boronenko Yu. P., Pokrovskaya O. D., Titova T. S., Tsyganskaya L. V., Beyn D. G., Kondratenko S. V. Analiz tekhnicheskikh resheniy vagona-pallevovoza [Analysis of technical solutions for a pallet car]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Railways]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, I. 1, pp. 95–120. (In Russian)

7. Kononenko A. S. Sochlenennye vagony-platformy so s"emnymi kuzovami povysyat effektivnost' perevozok [Articulated platform cars with swap bodies will increase the efficiency of transportation]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo* [Wagons and wagon business]. 2018, I. 4, pp. 36–40. (In Russian)

8. Zaynitdinov O. I. Smenny kuzov dlya perevozki tarno-shtuchnykh грузов [Swap body for the transportation of packaged goods]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. St. Petersburg: PGUPS Publ., «T-PRESSA» Publ., I. 4 (95), 2021, pp. 47–49. (In Russian)

9. Dauksha A. S. Sovershenstvovanie vagonov na osnove ispol'zovaniya s"emnykh kuzovov [Improvement of cars based on the use of swap bodies]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty* [Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2015, pp. 45–53. (In Russian)

10. Boronenko Yu. P. Strategicheskie zadachi vagonostroiteley i razvitiya tyazhelovesnogo dvizheniya [Strategic tasks of car builders and the development of heavy-haul traffic]. *Transport RF* [Transport RF]. 2013, I. 5, pp. 68–74. (In Russian)

Received: April 04, 2022

Accepted: April 24, 2022

Author's information:

Olmos I. ZAYNITDINOV – Postgraduate Student;
zaynitdinovo@mail.ru

Stanislav O. KOMICHENKO – Head of Metal Productions
Trial Department; komichenko@gmail.com

УДК 629.4.015:625.1.03

Анализ зоны контакта железнодорожного колеса и рельса

С. В. Кротов¹, Д. П. Кононов²

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Кротов С. В., Кононов Д. П. Анализ зоны контакта железнодорожного колеса и рельса // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 221–231. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-221-231

Аннотация

Цель: Исследование напряжений на поверхности контакта при взаимодействии железнодорожного колеса и рельса от нормального давления и касательных усилий при наличии зон сцепления и скольжения разных размеров. **Методы:** Приведены и используются для расчетов формулы для эквивалентных и касательных напряжений для плоской деформации и плоского напряженного состояния. Особое внимание уделено исследованию напряженного состояния в пограничных точках контакта цилиндров, для чего параметры рассчитаны в точках поверхности контакта на границе между зонами скольжения и сцепления.

Результаты: Выполнено исследование распределения эквивалентных напряжений в зоне их максимальных значений, установлена зависимость от коэффициента трения. Показано распределение напряжений на поверхности контакта ведущего цилиндра от нормального давления и от контактных касательных усилий при наличии зон сцепления и проскальзывания для различных соотношений между ними. Полученные результаты выявили рост напряжений на границах участков скольжения и сцепления, влияние отсутствия касательных усилий или наличия полного проскальзывания. **Практическая значимость:** Данные позволяют точнее прогнозировать снижение контактно-усталостной долговечности образцов и могут быть полезны при исследовании появления микротрещин колеса или рельса при их взаимодействии. Физическое моделирование при взаимодействии тел качения, таких как рельс и колесо, которое выполняется при актуальных нагрузках, скоростях взаимодействия, различных коэффициентах трения, при скольжении или сцеплении с определенной достоверностью воссоздает действительные условия взаимодействия колеса и рельса, а результаты помогают прогнозировать надежность пары колесо — рельс на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: Напряженное состояние, эквивалентное напряжение, касательное напряжение, коэффициент трения.

Введение

Известно [1–5], что на поверхности контакта двух цилиндров возникает сложное напряженно-деформированное состояние, требующее тщательного изучения. Это очевидно вследствие того, что при длительном взаимодействии тел при качении с трением возникают всевозможные дефекты — это и трещины и выкрашивания, смещение металла и т. д., которые могут приводить к серьезным последствиям. В частности, говоря о контакте таких тел, мы имеем в виду моделирование взаимодействия пары колесо — рельс. Поэтому существует и значительно развит аналитический аппарат для изучения вопросов, связанных с контактными задачами, но в последнее время на помощь исследователям приходят всевозможные расчетные комплексы, помогающие в моделировании процессов взаимодействия тел качения [6–15].

При компьютерном моделировании учитываются и геометрические, и физические нелинейности материалов тел качения, скорость, усталостные характеристики, можно учесть и динамические параметры.

Очевидно и то, что физическое моделирование при взаимодействии тел качения, таких как рельс и колесо, которое выполняется при актуальных нагрузках, скоростях взаимодействия, различных коэффициентах трения, при скольжении или сцеплении и т. п., весьма информативно. Эти исследовательские процессы с определенной достоверностью воссоздают действительные условия взаимодействия колеса и рельса, а результаты помогают прогнозировать надежность пары колесо — рельс на железнодорожном транспорте.

Напряжения на поверхности контакта

При классическом аналитическом подходе к рассмотрению проблемы взаимодействия в контакте двух тел исследуются составляющие напряженно-деформированного состояния с учетом

геометрии контакта, и это является традиционно важным.

В предыдущих трудах [4, 6, 7, 10] мы уделяли всестороннее внимание рассмотрению напряженно-деформированного состояния при контакте двух тел качения, и поэтому будем пользоваться ранее полученными результатами. На их основе построено распределение напряжений на поверхности контакта ведущего цилиндра от нормального давления P и от контактных касательных усилий при наличии зон сцепления и проскальзывания (для различных соотношений между ними). Поскольку напряжения σ_x^q и τ_{xz}^q в несколько раз меньше максимальных значений напряжения $\sigma_x^p = \sigma_z^p$, то точка с наибольшим эквивалентным напряжением будет располагаться около центра пятна контакта, а именно на границе зон сцепления и проскальзывания, то есть при $x = c$.

В зоне сцепления ($x \geq c$) упругая деформация ведущего колеса сопровождается возникновением нормальных напряжений, подчиненных закону Гука. С учетом этого запишем:

$$\begin{aligned}\sigma_x^q &= E_{\text{пд}} \epsilon_x = E_{\text{пд}} \left(1 - \frac{vx}{2}\right) = \\ &= f \frac{\beta E a}{4} \left(1 + \frac{c}{a}\right) = f P_0 \left(1 + \frac{c}{a}\right).\end{aligned}\quad (1)$$

Касательные напряжения в зоне сцепления определяются формулой:

$$q_0^H = q_0 \frac{a_1}{a} = f P_0 \frac{a - c}{2a},$$

которую можно привести к виду:

$$\tau_{xz}^q = q_{\text{зсц}} = f P_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} - \sqrt{\frac{x}{a} \left(1 + \frac{c}{a}\right) - \frac{x^2}{a^2} - \frac{c}{a}}.\quad (2)$$

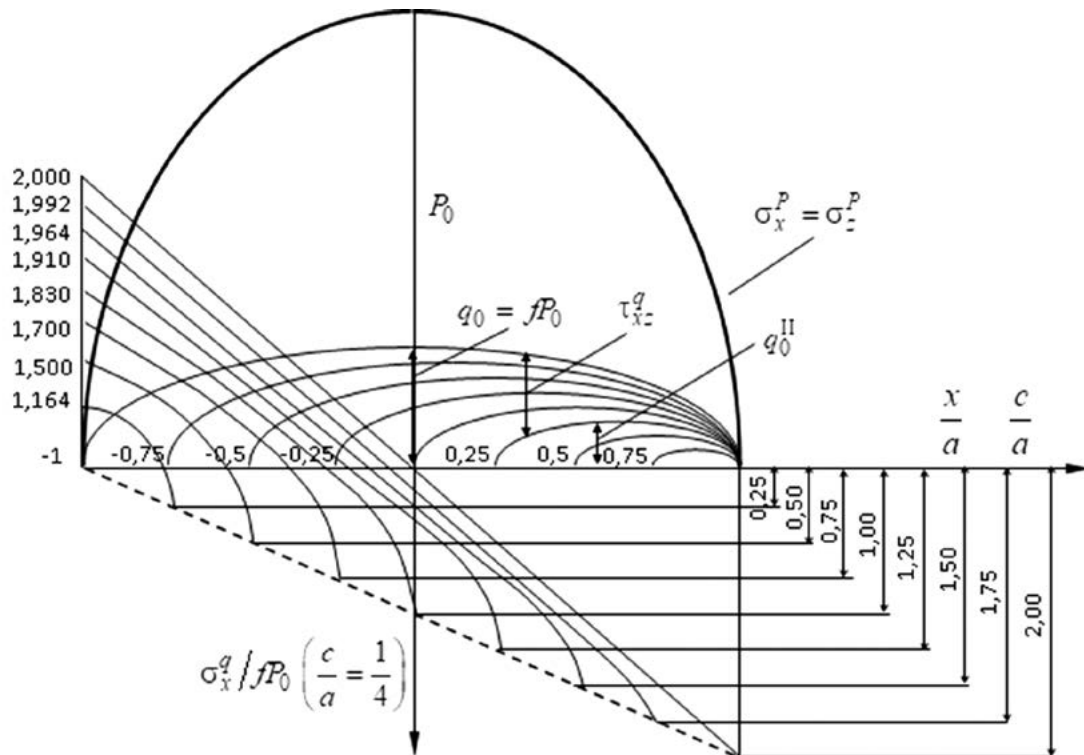


Рис. 1. Напряжения на поверхности контакта ведущего цилиндра от нормального давления и касательных усилий при наличии зон сцепления разной длины

Используя соотношения [2, 3], умножая линейную деформацию от контактных касательных усилий на $E_{плд} = fP_0$, получим формулу для нормальных напряжений зоне скольжения ($x \leq c$):

$$\sigma_x^q = fP_0 \left[-\left(1 + \frac{c}{a}\right) + 2\sqrt{\left(\frac{x}{a}\right)^2 - \frac{x}{a}\left(1 + \frac{c}{a}\right) + \frac{c}{a}} \right]. \quad (3)$$

Полагая в них $x = c$ и вводя обозначение

$$\frac{x = c}{a} = U,$$

получаем для напряжений в пограничной точке такие выражения:

$$\begin{aligned} \sigma_x^q &= -fP_0(1+U); \\ \tau_{xz}^q &= fP_0\sqrt{1-U^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставим их в формулу для эквивалентных напряжений для плоской деформации:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{плд}} &= (1-2\nu) \left(P_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \pm \frac{\sigma_x^q}{2} \right) + \\ &+ \sqrt{\left(\frac{\sigma_x^q}{2}\right)^2 + (\tau_{xz}^q)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для плоского напряженного состояния:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{пнс}} = \left(P_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \pm \frac{\sigma_x^q}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x^q}{2}\right)^2 + (f_{xz}^q)^2}. \quad (6)$$

Будем иметь для пограничной точки:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{плд}}}{P_0} &= (1-2\nu) \left[\sqrt{1-U^2} \pm f \frac{1+U}{2} \right] + \\ &+ \frac{f}{2} \sqrt{(1+U)^2 + 4(1-U^2)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для последующего анализа и вычислений перепишем (7) в таком виде:

$$\frac{2\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{пл}}}{fP_0} = (1-2\nu) \left[\frac{2}{f} \sqrt{1-U^2} \pm (1+U) \right] + \sqrt{(1+U)^2 + 4(1-U^2)} = (1-2\nu)A + B.$$

Слагаемое A в опасной точке $U^x = \frac{f}{\sqrt{4+f^2}}$

достигает своего максимума, равного при $f = 0,15$:

$$A_{\text{max}} = \frac{\sqrt{4+f^2}}{f} \pm 1 = \begin{cases} 14,371 \\ 12,371 \end{cases}$$

Слагаемое B в этой же точке равно $B = 2,266$,

тогда как при $U_0 = \frac{1}{3}$ его значение максимально

$$B_{\text{max}} = 2,309.$$

При малой разнице между этими значениями слагаемого B с небольшой погрешностью можно принять, что максимум эквивалентного напряжения (7) будет в точке:

$$x = c = \pm \frac{af}{\sqrt{4+f^2}} \approx \pm \frac{a}{2}f,$$

то есть приближенно в два раза ближе к центру, чем при полном скольжении. При $f = 0,15$ и $\sigma_x^q < 0$:

$$\frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{пл}}}{P_0} = \frac{0,15}{2} [(1-2 \cdot 0,3) \cdot 14,371 + 2,266] = 0,602;$$

$$\frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{пнс}}}{P_0} = \frac{0,15}{2} [14,371 + 2,266] = 1,248.$$

В случае $\sigma_x^q > 0$ получаем соответственно 0,541 и 1,098. Таким образом, на границе между зонами сцепления и скольжения у ведущего

цилиндра эквивалентного напряжения примерно на 8 % больше, чем при полном проскальзывании. Однако этот вывод справедлив при коэффициенте крипа:

$$\nu_x = \frac{\nu_{\text{пр}}}{2} (1+U^x) = 0,538\nu_{\text{пр}}.$$

Определенной величине коэффициента крипа

ν_x соответствует лишь одно значение $\frac{c}{a} = U$,

принятое нами выше.

Учитывая приближенность определения максимума $\sigma_{\text{ЭКВ}}$, были выполнены его вычисления при $f = 0,15$ непосредственно по формуле (7)

для различных отношений $U = \frac{c}{a}$. Результаты

приведены в табл. 1, а их графическое изображение представлено на рис. 2. При этом две верхние кривые предназначены для плоского напряженного состояния, а две нижние — для плоского деформированного состояния.

Для плоского напряженного состояния в формуле (7) было принято $\nu = 0$. Графики подтверждают правильность приближенного анализа как о величине максимального $\sigma_{\text{ЭКВ}}$, так и о месте его расположения. Вблизи максимума в интервале $\nu_x = (0,4-0,65)\nu_{\text{пр}}$ напряжения изменяются весьма незначительно. Максимум $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ у ведомого цилиндра имеет место при малых отрицательных c/a , то есть при более низких значениях коэффициента крипа. Различие в величине $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ у тонких дисков и длинных цилиндров при качении с проскальзыванием снижается примерно до двух раз, по сравнению с контактом без трения, составляющим 2,5 раза.

С увеличением коэффициента трения f эквивалентное напряжение (7) существенно возрастает. Так, при $f_{\text{пнс}} = 0,3$ максимум $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{пл}} = 0,807P_0$ (для

ТАБЛИЦА 1. Значение $\frac{\sigma_{\text{экв}}}{P_0}$ в точках $x = 0$ на границе между зонами сцепления и скольжения при $f = 0,15$

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U = \frac{x-c}{a}$ | 1 | 0,5 | 0,24 | 0,18 | 0,12 | 0,06 | 0 | -0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,2 | -0,5 | -0,9 |
| $\frac{V_x}{V_{\text{пр}}} = \frac{1+u}{2}$ | 1 | 0,75 | 0,62 | 0,59 | 0,56 | 0,53 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,1 |
| $\frac{\sigma_{\text{экв}}^{\text{пр}}}{P_0} \quad \sigma_x < 0 \quad \frac{\sigma_{\text{экв}}^{\text{пнс}}}{P_0}$ | 0,3 | 0,56 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,2 |
| | 0,3 | 1,15 | 1,237 | 1,24 | 1,25 | 1,25 | 0,24 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,0 | 0,6 |
| $\frac{\sigma_{\text{экв}}^{\text{пр}}}{P_0} \quad \sigma_x^q > 0 \quad \frac{\sigma_{\text{экв}}^{\text{пнс}}}{P_0}$ | 0,3 | 0,47 | 0,52 | 0,53 | 0,53 | 0,54 | 0,54 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 0,24 |
| | 0,3 | 0,93 | 1,05 | 1,07 | 1,08 | 1,09 | 1,09 | 1,9 | 1,9 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 0,49 |

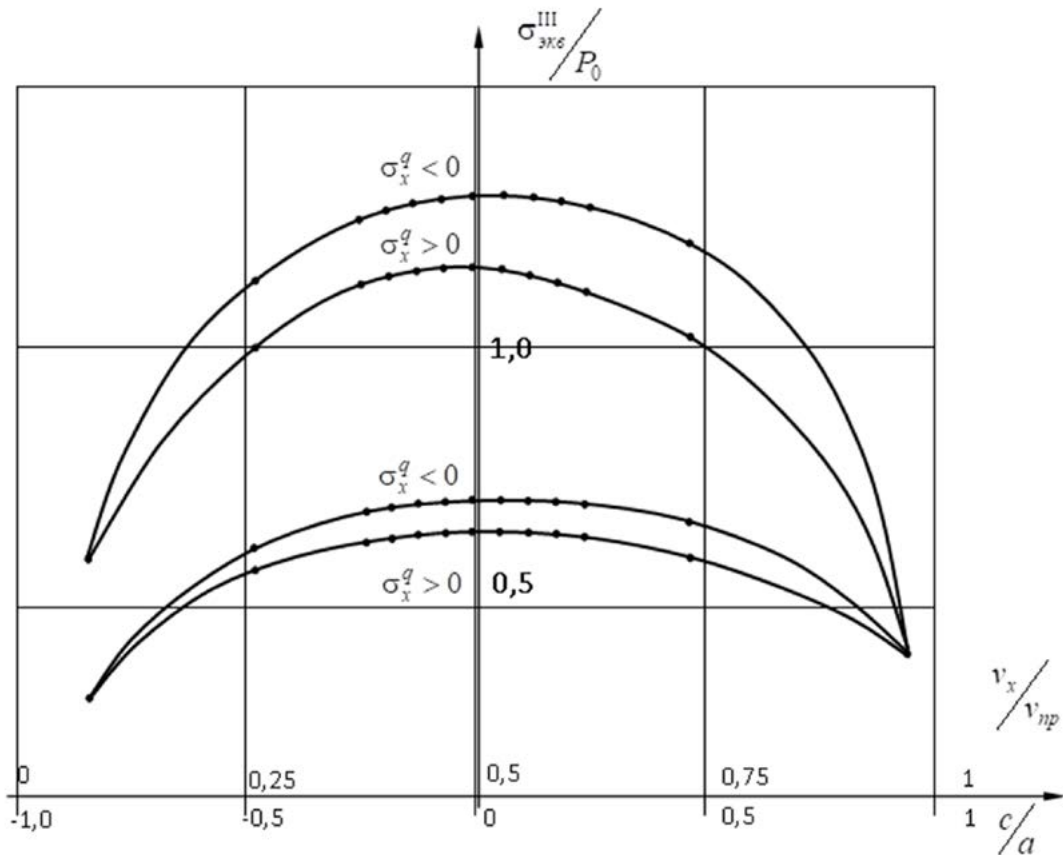


Рис. 2. Значения эквивалентных напряжений в точках $x = c$ поверхности контакта на границе между зонами скольжения и сцепления

плоского напряженного состояния $\sigma_{\text{экв}}^{\text{пнс}} = 1,504P_0$) располагается в точке при $U^x = \frac{c}{a} = 0,1483$, когда $v_x = 0,576v_{\text{пр}}$.

По сравнению с величиной эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв}}^{\text{п}} = 0,4P_0$ для плоской деформации и $\sigma_{\text{экв}}^{\text{п}} = P_0$ для плоского напряженного состояния в контакте без трения увеличение, как видим, произошло в 2 раза. При качении

ТАБЛИЦА 2. Значение $\frac{\sigma_{\text{экв}}}{P_0}$ в центре полоски контакта ($x = 0$) в зависимости от $\frac{V_x}{V_{\text{пр}}}$ при $f = 0,15$

| | | | | | | | | | | | |
|--|--|------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| $U = \frac{c}{a}$ | 1 | 0,5 | 0,24 | 0,12 | 0 | 0 | -0,125 | -0,24 | -0,5 | -0,9 | |
| $\frac{V_x}{V_{\text{пр}}} = \frac{1+u}{2}$ | 1 | 0,75 | 0,63 | 0,56 | 0,53 | 0,5 | 0,4375 | 0,38 | 0,25 | 0,05 | |
| $\frac{\sigma_{\text{экв}}^{\text{пр}}}{P_0} \sigma_x < 0$ | $\frac{\sigma_{\text{экв}}^{\text{пнс}}}{P_0}$ | 0,55 | 0,553 | 0,559 | 0,566 | 0,57 | 0,593 | 0,544 | 0,518 | 0,473 | 0,414 |
| | | 1,15 | 1,156 | 1,171 | 1,186 | 1,194 | 1,243 | 1,183 | 1,152 | 1,096 | 1,018 |
| $\frac{\sigma_{\text{экв}}^{\text{пр}}}{P_0} \sigma_x^q > 0$ | $\frac{\sigma_{\text{экв}}^{\text{пнс}}}{P_0}$ | 0,55 | 0,548 | 0,543 | 0,541 | 0,539 | 0,533 | 0,49 | 0,473 | 0,443 | 0,408 |
| | | 1,15 | 1,144 | 1,132 | 1,121 | 1,116 | 1,093 | 1,081 | 1,038 | 1,020 | 1,003 |

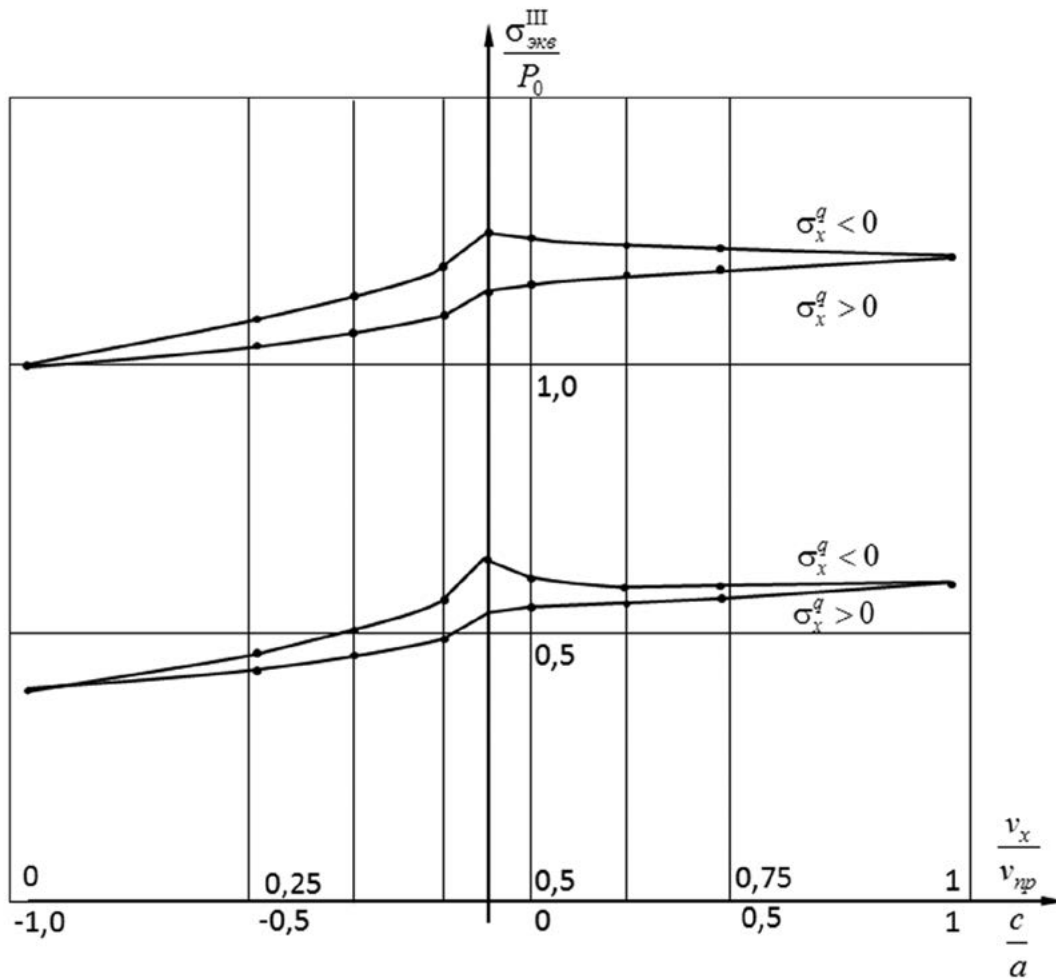


Рис. 3. Значения эквивалентных напряжений в точках $x = 0$ при $f = 0,15$ в середине полоски поверхности контакта

с полным проскальзыванием при этом же $f = 0,3$ ранее было установлено возрастание лишь в 1,79 раза [6–8]. Следовательно, напряженное состояние материала на границе между

зонами сцепления и скольжения является более опасным даже по сравнению с полным проскальзыванием и в два раза опаснее контакта без трения.

ТАБЛИЦА 3. Напряжения (отнесенные к P_0) при плоской деформации, плоском напряженном состоянии и эквивалентные в зависимости от коэффициента трения

| f | 0,15 | 0,20 | 0,25 |
|--|--------|--------|--------|
| $\sigma_{\text{экв}}^{\text{пл}} / P_0$ | 0,4171 | 0,4228 | 0,4285 |
| $\sigma_{\text{экв}}^{\text{пнс}} / P_0$ | 1,0227 | 1,0302 | 1,0378 |
| $\frac{\sigma_{\text{экв}}}{P_0} = \frac{1\sigma_{\text{экв}}^{\text{пл}}}{3P_0} + \frac{2\sigma_{\text{экв}}^{\text{пнс}}}{3P_0}$ | 0,821 | 0,8278 | 0,8347 |

Эквивалентные напряжения в середине полоски контакта ($x = 0$) незначительно отличаются от максимальных $\sigma_{\text{экв}}$ только для таких условий контакта, при которых c/a близко к 0,5. Однако их проще вычислить при разных соотношениях c/a между размерами зон сцепления и проскальзывания, то есть в функции от коэффициента крипа $v_x / v_{\text{пр}}$. Результаты этих вычислений приведены в табл. 2 и изображены кривыми на рис. 3 при $f = 0,15$.

Наибольшими они будут при $v_x = 0,5v_{\text{пр}}$, когда зона сцепления занимает всю переднюю половину полоски контакта. Наименьшая их величина будет при $v_x \rightarrow 0$.

В качестве поясняющего примера приведем вычисление $\sigma_{\text{экв}}^{\text{III}}$ в середине полоски контакта ($x = 0$) дисковых образцов для $c = -0,876a$.

При таком $c/\text{ц.п.к.}$ (центр пятна контакта) располагается в зоне сцепления. Имея в виду, что у ведущего образца напряжения σ_x^q от касательных усилий в зоне сцепления, сжимающие согласно формуле (3), имеем :

$$\sigma_x^q = -fP_0 \left(1 + \frac{c}{a} \right) = -fP_0 (1 - 0,876) = -0,124fP_0;$$

$$\sigma_z^q = 0.$$

Пусть $U = \frac{c}{a}$. Касательное напряжение определим по формуле (4), которая примет вид :

$$\tau_{xz}^q = fP_0 \left(\sqrt{1 - U^2} \right) = 0,06405fP_0,$$

при $x = 0$.

От нормального давления:

$$\sigma_x^p = \sigma_z^p = -P_0.$$

Из-за наличия касательных напряжений суммарные нормальные напряжения $\sigma = \sigma^p + \sigma^q$ уже не будут главными. Последние вычисляются по формулам [1–3] и при $x = 0$ принимают вид:

Для плоской деформации:

$$\sigma_{3,2} = \left(\frac{\sigma_x^q}{2} - P_0 \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x^q}{2} \right)^2 + \left(\tau_{xz}^q \right)^2};$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \nu (\sigma_x + \sigma_z) = 2\nu \left[\frac{\sigma_x^q}{2} - P_0 \right].$$

Для плоского напряженного состояния надо принять $\nu = 0$.

Тогда эквивалентные напряжения:

$$\sigma_{\text{экв}} = (1 - 2\nu) \left(-\frac{\sigma_x^q}{2} + P_0 \right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x^q}{2} \right)^2 + \left(\tau_{xz}^q \right)^2}.$$

Вычисления по этой формуле (для п.н.с. надо принять $\nu = 0$) для трех значений f приведены в нижеследующей табл. 3.

Исследование эквивалентных напряжений в зоне их максимальных значений

Точки (с абсциссой $U_x = \frac{x_x}{a}$) наибольших эквивалентных напряжений близко расположены к центру полоски контакта (для сокращения — к ц.п.к.). По-видимому, и разница между величинами напряжений в этих точках будет невелика не только при $f = 0,15$, но и при других реальных величинах f [11, 12]. Проверим это предположение вычислениями эквивалентных напряжений в ц.п.к. и максимальных значений для некоторых f . Для случая скольжения на всей площадке контакта эквивалентное напряжение определяется формулой [6–8]. Приняв $x = 0$, найдем для ц.п.к.:

$$\frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{пл}}}{P_0} = 1 - 2\nu + f. \quad (8)$$

При наличии зоны сцепления на передней половине площадки контакта эквивалентное напряжение на границе между зонами сцепления и скольжения выражается по формуле (7):

При $\frac{x=c}{a} = U = 0$ будет иметь для ц.п.к.

$$\frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{пл}}}{P_0} = (1 - 2\nu)(1 \pm 0,5f + 1,118f). \quad (9)$$

Эти напряжения существенно зависят от коэффициента трения скольжения f . Вычисленные по этим формулам $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{цпк}}$ для плоской деформации и для плоского напряженного состояния при $\nu = 0$ в формулах (8) и (9) приведены в табл. 4. Там же приведены и максимальные эквивалентные напряжения, вычисленные по формулам [6–8] при скольжении на всей площадке и при наличии зон сцепления и скольжения.

В табл. 5 даны отношения величины эквивалентных напряжений при соответствующем коэффициенте трения $\sigma_{\text{ЭКВ}f}$ к $\sigma_{\text{ЭКВ}0}$ по формулам (10) для ц.п.к. при наличии зон сцепления и скольжения [9, 10].

Заключение

Из приведенных данных следует, что при малых c/a :

ТАБЛИЦА 4. Значение максимальных эквивалентных напряжений $\frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}}{P_0}$ и в центре полосы контакта

| При коэффициенте трения скольжения f | При скольжении на всей площадке | | | | При наличии зон сцепления и скольжения | | | | $\frac{\sigma_{\text{СКСП}}^{\text{ск}} - \sigma_{\text{МАКС}}^{\text{ск}}}{\sigma_{\text{СКСП}}^{\text{ск}}} \cdot 100\%$ | |
|--|---------------------------------|----------|--------|----------|--|----------|--------|----------|--|--------|
| | п.д. | | п.н.в. | | п.д. | | п.н.с. | | п.д. | п.н.с. |
| | max | в ц.п.к. | max | в ц.п.к. | max | в ц.п.к. | max | в ц.п.к. | | |
| 0,1 | 0,502 | 0,500 | 1,105 | 1,100 | 0,533 | 0,532 | 1,164 | 1,162 | 5,8 | 5,1 |
| 0,15 | 0,554 | 0,550 | 1,161 | 1,150 | 0,602 | 0,598 | 1,248 | 1,243 | 8,0 | 7,0 |
| 0,20 | 0,608 | 0,600 | 1,220 | 1,200 | 0,669 | 0,664 | 1,332 | 1,324 | 9,2 | 8,4 |
| 0,30 | 0,716 | 0,700 | 1,344 | 1,300 | 0,807 | 0,795 | 1,504 | 1,485 | 11,3 | 10,6 |

Примечания. При полном отсутствии касательных усилий на площадке контакта эквивалентное направление в ц.п.к. является максимальным и равно:

$$\frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{пл}}}{P_0} = 0,4 \text{ и } \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{пнс}}}{P_0} = 1,0. \quad (10)$$

ТАБЛИЦА 5. Отношения величин эквивалентных напряжений при различных коэффициентах трения

| f | | 0,1 | 0,15 | 0,20 | 0,30 |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| $\left(\frac{\sigma_{\text{экв}f}}{\sigma_{\text{экв}0}}\right)^{\text{цпк}}$ | п.д.с. | 1,33 | 1,495 | 1,660 | 1,99 |
| | п.н.с. | 1,162 | 1,243 | 1,324 | 1,485 |

– напряжения в ц.п.к. меньше максимальных всего лишь на величину около 1,5 %;

– эквивалентные напряжения при наличии зон сцепления и скольжения могут оказаться больше, чем при полном проскальзывании. Так, при

$$\frac{c}{a} = 0,05 / 0,148, \text{ когда } U_x = (0,525 / 0,574)U_{\text{пр}},$$

эта разница составляет, соответственно, (5/11) % [11, 12];

– с увеличением коэффициента трения f напряжения существенно возрастают в сравнении с $\sigma_{\text{экв}}$ по формуле (10) при отсутствии трения.

Библиографический список

1. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению / С. В. Пинегин. — М.: Машиностроение, 1969. — 243 с.

2. Ковальский Б. С. Расчет деталей на местное сжатие / Б.С. Ковальский. — Харьков: ХВКИУ, 1967. — 222 с.

3. Вирабов Р. В. О реализации касательной силы в зоне контакта упругих тел при качении. — Машиноведение. — 1967. — № 2. — С. 93–106.

4. Кротов С. В. Влияние трения на контактно-усталостную долговечность образцов из рельсовой и колесной стали / С. В. Кротов, Д. П. Кононов, А. А. Соболев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. — 2019. — Т. 16. — № 2. — С. 212–219.

5. Krotov S. V. Application of the discriminant analysis at research of bearing ability of the wheel pair of the car / S. V. Krotov, V. P. Krotov // Transport problems. — Poland. — Gliwice. — Vol. 6. — Iss. 1. — 2011. — Pp. 43–49.

6. Кротов С. В. Показатели контактно-усталостной долговечности при взаимодействии колеса с рельсом в кривых участках пути / С. В. Кротов, Д. П. Кононов,

А. А. Соболев // Бюлл. рез. науч. исслед. — СПб.: ПГУПС. — 2019. — № 3. — С. 56–66.

7. Кротов С. В. Контактно-усталостная долговечность рельсовой и колесной сталей / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2018. — Т. 15. — Вып. 1. — С. 54–61.

8. Кононов Д. П. Использование фрактальных характеристик для анализа развития разрушения цельнокатанных колес / Д. П. Кононов, И. А. Иванов, С. В. Урушев, С. В. Кротов // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 3(76). — С. 68–71.

9. Кротов С. В. Основы теории несущей способности пресовых соединений колесных пар железнодорожных вагонов / С. В. Кротов // ФГОУ УМЦ ЖДТ. — М. — 2011. — 152 с.

10. Кротов С. В. Исследование напряженного состояния в колесе вагона / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Бюлл. рез. науч. исслед. — СПб.: ПГУПС. — 2020. — № 3. — С. 26–40.

11. Кротов С. В. Факторный анализ расчета несущей способности колесной пары вагона / С. В. Кротов, А. В. Сладковски // Транспорт Урала. — Екатеринбург. — 2012. — № 2(33). — С. 36–40.

12. Кротов С. В. Факторный анализ несущей способности колесной пары железнодорожного вагона: монография // С. В. Кротов // РГУПС. — Ростов-на-Дону. — 2011. — 137 с.

13. Воробьев А. А. Математическое моделирование параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации вагонов / А. А. Воробьев // Вестн. Ин-та проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — М.: Ин-т проблем естественных монополий, 2016. — № 1(33). — С. 34–41.

14. Воробьев А. А. Контактное взаимодействие колеса и рельса / А. А. Воробьев // Вестн. Иркутск. гос. тех-

нич. ун-та. — Иркутск: ИСТУ, 2009. — № 3(39). — С. 42–47.

15. Орлова А. М. Определение параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации полувагона / А. М. Орлова, А. А. Воробьев, А. В. Саидова, Д. Е. Керенцев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2015. — Вып. № 2(43). — С. 74–84.

Дата поступления: 17.03.2022

Решение о публикации: 27.04.2022

Контактная информация:

КРОТОВ Сергей Викторович — канд. техн. наук, доц.;
svk-19587@yandex.ru

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — д-р техн. наук,
проф.; d_kononov@mail.ru

Analysis of Contact Zone of Railway Wheel and Rail

S. V. Krotov¹, D. P. Kononov²

¹ Rostov State Transport University, 2, Rostov Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

² Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Krotov S. V., Kononov D. P. Analysis of Contact Zone of Railway Wheel and Rail // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 221–231. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-221-231

Summary

Purpose: Investigation of stresses on contact surface during interaction of a railway wheel and rail from normal pressure and tangential forces in the presence of adhesion and sliding zones of different sizes. **Methods:** Formulas for equivalent and tangential stresses for plane deformation and plane stress state are given and used for calculations. Special attention is paid to the study of stress state at contact boundary points of cylinders, which parameters are calculated for at contact surface points at boundary between sliding and adhesion zones. **Results:** The study of the distribution of equivalent stresses in the zone of their maximal values is carried out, the dependence from friction coefficients is established. The distribution of stresses on contact surface of a drive cylinder from normal pressure and from contact tangential forces in the presence of adhesion and slippage zones for different ratios between them is shown. The obtained results revealed the increase in stresses at the boundaries of sliding and adhesion sections, the effect of absence of tangential forces or presence of complete slippage. **Practical importance:** The data make it possible to predict more accurately a decrease in the contact-fatigue durability of samples and can be useful in studying the appearance of microcracks of a wheel or rail during their interaction. Physical modeling of the interaction of rolling elements, such as a rail and a wheel, which is performed at actual work loads, interaction speeds, various friction coefficients, at sliding or adhesion recreates with certain reliability actual conditions of interaction of a wheel and a rail, and the results help to predict the reliability of a wheel-rail pair in railway transport.

Keywords: Stress state, equivalent stress, tangential stress, coefficient of friction.

References

1. Pinegin S. V. *Kontaktная prochnost' i soprotivlenie kacheniyu* [Contact strength and rolling resistance]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. 243 p. (In Russian)

2. Koval'skiy B. S. *Raschet detaley na mestnoe szhatie* [Calculation of parts for local compression]. Khar'kov: KhVkiU Publ., 1967. 222 p. (In Russian)

3. Virabov R. V. O realizatsii kasatel'noy sily v zone kontakta uprugikh tel pri kachenii [On the implementation of the tangential force in the contact zone of elastic bodies during rolling]. *Mashinovedenie* [Mechanical engineering]. 1967, I. 2, pp. 93-106. (In Russian)
4. Krotov S. V. Vliyaniye treniya na kontaktno-ustalostnyuyu dolgovechnost' obraztsov iz rel'sovoy i kolesnoy stali [Influence of friction on the contact-fatigue life of specimens from rail and wheel steel]. *Izv. Peterb. un-ta putey soobshcheniya* [Izv. Petersburg. University of Communications]. 2019, vol. 16, I. 2, pp. 212-219. (In Russian)
5. Krotov S. V., Krotov V. P. Application of the discriminant analysis at research of bearing ability of the wheel pair of the car. *Transport problems. Poland. Gliwice*. 2011, vol. 6, I. 1, pp. 43-49. (In Russian)
6. Krotov S. V. Pokazateli kontaktno-ustalostnoy dolgovechnosti pri vzaimodeystvii koleasa s rel'som v krivykh uchastkakh puti [Indicators of contact-fatigue durability in the interaction of a wheel with a rail in curved sections of the track]. *Byull. rez. nauch. issled.* [Bull. res. scientific research]. St. Petersburg: PGUPS Publ. 2019, I. 3, pp. 56-66. (In Russian)
7. Krotov S. V. Kontaktno-ustalostnaya dolgovechnost' rel'sovoy i kolesnoy staley [Contact fatigue life of rail and wheel steels]. *Izv. Peterb. un-ta putey soobshcheniya* [Izv. Petersburg. University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2018, vol. 15, I. 1, pp. 54-61. (In Russian)
8. Kononov D. P. Ispol'zovanie fraktal'nykh kharakteristik dlya analiza razvitiya razrusheniya tsel'nokatanykh koles [The use of fractal characteristics for the analysis of the development of the destruction of solid-rolled wheels]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2018, I. 3 (76), pp. 68-71. (In Russian)
9. Krotov S. V. Osnovy teorii nesushchey sposobnosti pressovykh soedineniy kolesnykh par zheleznodorozhnykh vagonov [Fundamentals of the theory of the bearing capacity of press joints of wheel pairs of railway cars]. *FGOU UMTs ZhDT* [FGOU UMC ZhDT]. Moscow, 2011. 152 p. (In Russian)
10. Krotov S. V. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya v kolese vagona ["Investigation of the stress state in the car wheel]. *Byull. rez. nauch. issled* [Byull. res. scientific research]. St. Petersburg: PGUPS Publ. 2020, I. 3, pp. 26-40. (In Russian)
11. Krotov S. V. Faktornyy analiz rascheta nesushchey sposobnosti kolesnoy pary vagona [Factor analysis of the calculation of the bearing capacity of the wheelset of the car]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. Ekaterinburg. 2012, I. 2(33), pp. 36-40. (In Russian)
12. Krotov S. V. Faktornyy analiz nesushchey sposobnosti kolesnoy pary zheleznodorozhnogo vagona [Factor analysis of the bearing capacity of the wheelset of a railway car]. *RGUPS* [RGUPS]. Rostov-on-Don, 2011. 137 p. (In Russian)
13. Vorob'ev A. A. Matematicheskoe modelirovaniye parametrov kontakta koleasa s rel'som dlya razlichnykh usloviy ekspluatatsii vagonov [Mathematical modeling of wheel-rail contact parameters for different conditions of railcar operation]. *Vestn. In-ta problem estestvennykh monopoliy: Tekhnika zheleznnykh dorog* [Vestn. In-ta problems of natural monopolies: Technique of railways]. Moscow: In-t problem estestvennykh monopoliy Publ., 2016, I. 1 (33), pp. 34-41. (In Russian)
14. Vorob'ev A. A. Kontaktnoye vzaimodeystviye koleasa i rel'sa [Contact interaction of wheel and rail]. *Vestn. Irkutsk. gos. tekhnich. un-ta* [Vestn. Irkutsk. state tech. university]. Irkutsk: ISTU Publ., 2009, I. 3 (39), pp. 42-47. (In Russian)
15. Orlova A. M. Opredeleniye parametrov kontakta koleasa s rel'som dlya razlichnykh usloviy ekspluatatsii poluvagona [Determination of wheel-rail contact parameters for different operating conditions of a gondola car]. *Izv. Peterb. un-ta putey soobshcheniya* [Izv. Petersburg. University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2015, I. 2 (43), pp. 74-84. (In Russian)

Received: March 17, 2022

Accepted: April 24, 2022

Author's information:

Sergey V. KROTOV — PhD in Engineering, Associate Professor; svk-19587@yandex.ru

Dmitry P. KONONOV — D. Sci. in Engineering, Professor; d_kononov@mail.ru

УДК 625.1+551.5

Совершенствование подготовки результатов инженерно-гидрометеорологических изысканий для проектирования объектов транспортной инфраструктуры

Д. П. Самофалов, С. В. Шкурников, В. А. Голубцов

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

Для цитирования: Самофалов Д. П., Шкурников С. В., Голубцов В. А. Совершенствование подготовки результатов инженерно-гидрометеорологических изысканий для проектирования объектов транспортной инфраструктуры // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 232–241. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-232-241

Аннотация

Цель: Рассматриваются особенности и проблемы, которые необходимо учитывать при подготовке отчетов по инженерно-гидрометеорологическим изысканиям для разработки проектной документации. Научно-техническое сопровождение отчетной документации по инженерным изысканиям для линейных объектов показало потребность, в отдельных случаях, создания климатических моделей и карт распределения исследуемых параметров. Указывается на важность развития института метеорологических наблюдений и исследований, поскольку получаемые данные являются критичными для ряда проектируемых объектов. Приводятся рекомендации, на примере метеорологических параметров, по составлению карт распределения исследуемых параметров и построения графиков изменения их величин вдоль проектируемых линейных объектов. **Методы:** Анализ и сравнение результатов проведения инженерных гидрометеорологических изысканий с оценкой достаточности представленных данных при решении прикладных задач на линейных объектах. **Результаты:** Установлена необходимость увеличения, в ряде случаев, количества задействованных метеорологических станций для возможности создания карт распределения исследуемых параметров. Представлен пример, и выполнено сравнение созданных карт распределения с использованием данных, представленных в отчетной документации, и с дополнительными сведениями. Также установлено, что существующая сеть гидрометеорологических постов на территории Российской Федерации недостаточна для получения результатов необходимой точности, особенно при проектировании линейных объектов, а также объектов, расположенных вдоль трассы проектируемой линии. **Практическая значимость:** Продемонстрирована возможность использования карт распределения гидрометеорологических параметров для получения сведений на участках, удаленных от гидрометеорологических станций. Сделан вывод о необходимости увеличения числа станций наблюдения за исследуемыми параметрами, что снизит неоднозначность в гидрометеорологических расчетах при определении их величин для обоснования проектных решений.

Ключевые слова: Трасса железной дороги, гидрометеорология, моделирование, карта распределения параметров, гидрометеорологические станции.

Введение

Территория Российской Федерации занимает восьмую часть суши и располагается в четырех климатических зонах — от арктической до субтропической. Такое расположение, определенно, сказывается и на природно-климатических явлениях, и осадках, проявляющихся на ее территории.

Изменчивость погодных условий и значительные расстояния приводят к необходимости уделять повышенное внимание вопросу наблюдений за всевозможными явлениями и их характеристиками, что требует, в свою очередь, развития института и совершенствования методов метеорологических наблюдений. Особенно остро этот вопрос проявляется в момент проведения и разработки инженерных изысканий и проектной документации, когда недостаточность исходной информации не позволяет объективно принимать решения по проектируемым объектам и может приводить к необходимости домысливания и проведения интерполяции и экстраполяции при определении тех или иных параметров критичными для строящихся сооружений.

В данной ситуации одной из важнейших проблем является количество и размещение пунктов метеорологических наблюдений по территории Российской Федерации. Эта проблема в настоящее время решается очень медленно, что особо остро проявляется при проектировании объектов, растянутых по длине на многие километры и проходящие по практически безлюдным или малонаселенным территориям. В таких областях метеорологические станции могут отсутствовать совсем либо размещаться настолько далеко друг от друга, что в промежутке могут происходить ощутимые изменения климатических явлений. При этом не стоит забывать, что на эти явления сильнейшим образом может влиять рельеф местности, который должен учитываться при выборе местоположения метеостанций.

Следует учесть, что открытие новых метеостанций хоть и позволяет увеличить достоверность информации о происходящих природно-климатических явлениях и их параметрах в настоящий момент времени, но не дает возможности провести оценку интересующих изменений за определенный исторический период, что в свете климатических изменений [1, 2] весьма важно. В то же время должен пройти достаточно продолжительный временной период, сроком не менее 10–15 лет, чтобы накопленные данные можно было использовать в расчетах при проектировании капитальных устройств и сооружений с установленной вероятностью превышения наблюдаемых параметров.

Целый ряд результатов многолетних наблюдений, выполненных на метеорологических станциях, используется при подготовке отчетов по гидрометеорологическим изысканиям для разработки проектной документации, и от качества и количества этих данных зависят надежность проектируемых зданий и сооружений и их дальнейшая эксплуатация.

Гидрометеорологические изыскания относятся к важным и ответственным работам при разработке проектной документации, строительстве и дальнейшей эксплуатации объектов инфраструктуры, особенно когда проектируются линейные объекты, как, например, железнодорожные линии. Важность гидрометеорологических изысканий в этом случае связана с проектированием большого количества разнообразных объектов железнодорожной инфраструктуры, расположенных вдоль трассы дороги и чувствительных к различным гидрометеорологическим явлениям, поскольку они связаны с обеспечением безопасности и бесперебойности работы транспортной системы [3, 4]. К таким явлениям можно отнести: скорость ветра и его направление, толщина снежного покрова и его характеристики, температура воздуха и почвы на различной глубине, образование гололедно-изморозевых проявлений и другое.

Однако кроме самих явлений важную роль играют качество, полнота и продолжительность наблюдений за этими явлениями и их параметрами, что предопределяет точность и достоверность дальнейших гидрометеорологических расчетов, необходимых для определения или уточнения показателей величин в целях расчетного обоснования проектных решений по объектам.

В ряде случаев, когда проектируемый объект располагается в условиях неопределенности, недостаточной изученности или ограниченности исходных данных рассматриваемых гидрометеорологических явлений, может потребоваться разработка расчетной, имитационной модели природных явлений, которая позволит воссоздать с определенной степенью адекватности реальные условия. Кроме этого, созданная модель допускает возможность вносить изменения в исследуемые параметры явлений, дополнять их либо исключать, учитывать дополнительные факторы, комбинировать. Таким образом, создается возможность проведения эксперимента, в том числе с критическими параметрами для оценки рисков, в результате которого может быть проведена разносторонняя оценка воздействия исследуемых явлений на рассматриваемые инфраструктурные объекты, как по отдельности, так и в целом.

В университете проводится широкий круг исследований, связанных с проблематикой проектирования, в том числе изучаются вопросы влияния различных природных и климатических явлений на принятие решений при сооружении объектов железнодорожной инфраструктуры. Отдельные вопросы из указанной области представлены в статьях [5–10].

Материалы и методы

Немаловажное значение в подготовке гидрометеорологических отчетов имеют выбор метеорологических станций по местоположению и их количество.

При подготовке отчетных материалов по гидрометеорологическим изысканиям и проектной документации для линейных объектов исполнители работ, как показал опыт научно-технического сопровождения проектируемых объектов железнодорожной инфраструктуры, довольно часто ограничиваются минимальным количеством метеорологических станций и, как правило, расположенных в непосредственной близости от проектируемых объектов. Такой подход, особенно в условиях разреженной сети метеостанций, позволяет точно определить расчетные гидрометеорологические параметры только в непосредственной близости от площадок метеостанций. В случае необходимости расчета требуемых метеопараметров для объектов, расположенных достаточно далеко или между метеостанциями (это присуще малонаселенным районам), принимают, как правило, результаты наблюдений по ближайшей метеостанции либо, при наличии выбора, по метеостанции с наибольшими абсолютными значениями исследуемых величин. В таком случае объекты, зависящие от метеопараметров, могут быть запроектированы с недостаточным либо чрезмерным запасом прочности, что в итоге может привести к необоснованным тратам или риску нарушения бесперебойной работы инфраструктуры, а в крайних случаях — к повреждениям или разрушениям.

Учитывая вышесказанное, для более точной оценки гидрометеорологических параметров вдоль линейных объектов либо объектов, расположенных на достаточном удалении от метеостанций, где изменения исследуемых явлений становятся ощутимыми при выполнении расчетов, более целесообразно создавать и использовать карты распределения изучаемых величин.

Карты распределения могут создаваться по тому же принципу, что и топографические карты — с использованием методов построения поверхности, что обеспечит достаточную достоверность считываемых с карт параметров при

проведении расчетов в условиях ограниченности исходных данных.

Однако, как и при создании любой карты, карта распределения изучаемых параметров чувствительна к количеству точек, участвующих в ее построении, и их размещению, в рассматриваемом случае — метеостанциям [11]. От этих двух факторов будет зависеть качество получаемого результата.

Кроме этих факторов, существенное влияние на корректное формирование карты распределения могут оказать топографические и ситуационные условия местности [12].

Орография местности оказывает существенное влияние на гидрометеорологические процессы и может кардинально повлиять на распределение воздушных масс, осадков, температуры. Так, например, наличие высотной гряды может представлять собой преграду либо как минимум влиять на природные явления и приводить к иному распределению исследуемых параметров, в сравнении с другими условиями.

Также стоит вносить поправки при наличии крупных водоемов на рассматриваемой территории, влияние которых определяется площадью водной поверхности и объемом водной массы. Обладая большой тепловой инерцией (особенно незамерзающие водоемы), они выравнивают климат в течение года из-за разности теплового баланса воды и суши, повышая температуру зимой и понижая летом. Возникающий тепловой баланс непосредственно сказывается на циркуляции воздушных масс, снегопереносе, гололедно-изморозевых проявлениях и прочее. Влияние водоемов может ощущаться на расстоянии в десятки, а в отдельных случаях и до сотни километров от береговой линии.

Не последнее место оказывает на изучаемые гидрометеорологические параметры деятельность человека. Особенно это ощущается на сильно заселенной территории и вблизи ее. В первую очередь, как и в случае с водоемами,

меняется тепловой баланс застроенной территории, что сказывается на климатических явлениях и требует дополнительного учета при проведении расчетов для проектирования и эксплуатации.

Приведенные факторы должны учитываться при выборе используемых в проектной работе метеостанций и выбираться с таким расчетом, относительно проектируемого или эксплуатируемого объекта, чтобы их размещение полностью охватывало рассматриваемую территорию со всех сторон и позволяло создать непрерывную поверхность. В случае отсутствия метеорологических станций, учитывающих влияние орографии и водоемов, возможно введение поправочных эмпирических формул и коэффициентов, вносящих изменения в величины исследуемых параметров при создании карт распределения. Формула определения уточненной величины исследуемого параметра в общем виде может быть выражена следующим образом:

$$V_l = v_o \cdot k_l \cdot k_h, \quad (1)$$

где V_l — уточненная величина параметра на определенном удалении от точки измерения его величины;

v_o — исходное значение параметра в точке измерения;

k_l — функция уточняющего коэффициента, учитывающего удаление от источника измерения параметра;

k_h — функция уточняющего коэффициента, учитывающего уровень и интенсивность изменения уровня относительно исходной точки.

Представленная формула может быть использована на участках, где рельеф местности сохраняет стабильность форм и не имеет резких изменений, которые могут ощутимо повлиять на исследуемые гидрометеорологические параметры. В противном случае адекватность получаемых результатов снизится, что приведет к невозможности их использования.

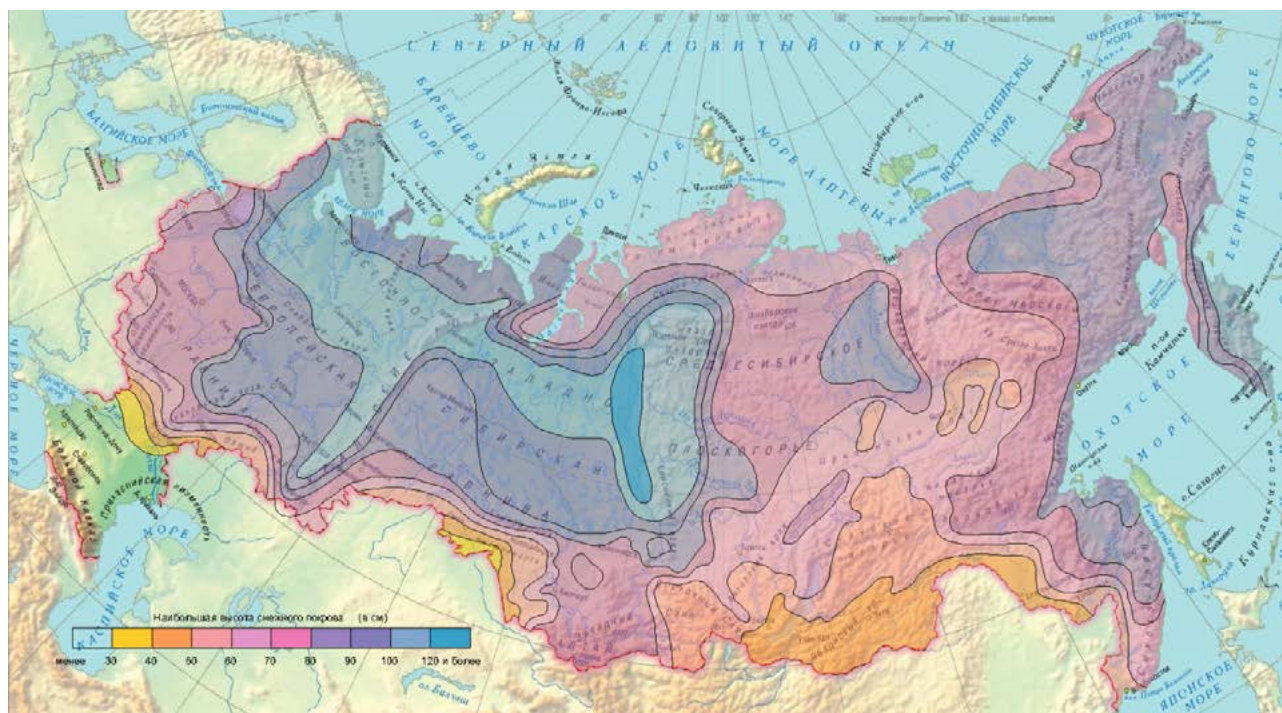


Рис. 1. Схематическая карта наибольшей толщины снежного покрова (в см)

Результаты

Результаты проведенной работы приведены на примере одного из параметров — «наибольшая толщина снежного покрова» как наиболее существенного для проектирования объектов железнодорожной инфраструктуры. Данный параметр влияет на расчет конструктивных элементов отдельных устройств и сооружений, на решения, связанные с предотвращением и защитой от снежных заносов объектов инфраструктуры в период дальнейшей эксплуатации.

Территория Российской Федерации полностью подвержена снеговому отложению. Как видно из рис. 1, составленного на основе нормативно-справочной документации, наибольшая толщина снежного покрова может значительно превышать один метр.

Однако подобные карты-схемы предоставляют укрупненные сведения, которые могут быть использованы для приближенной оценки исследуемых параметров. При разработке проектной документации требуется иной уровень исходной

информации, что приводит к необходимости создания и использования локальных карт-схем в районе проектируемых объектов.

Полученная карта приведена на рис. 2, на котором отображено изменение наибольшей толщины снежного покрова в районе проектируемой линии трассы.

Исходными данными для проводимого исследования послужили материалы наблюдений действующих метеорологических станций, а также архивные данные наблюдений, изложенные в нормативно-справочной литературе*.

На рис. 3 представлено расположение метеорологических станций, данные с которых участвовали при формировании карт распределения

* Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3: Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 3. Карелия, Ленинградская, Новгородская, Псковская, Калининская, Смоленская. — 1988. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3: Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 8. Москва и Московская область. — 1990.

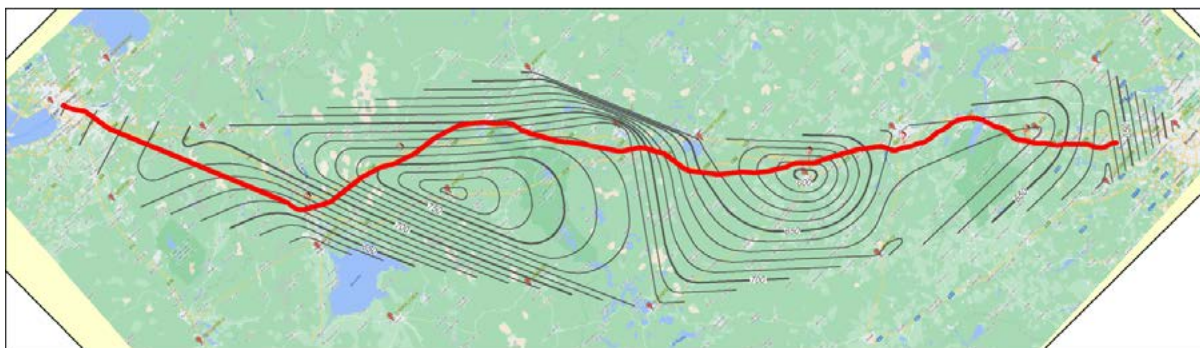


Рис. 2. Карта распределения наибольшей толщины снежного покрова

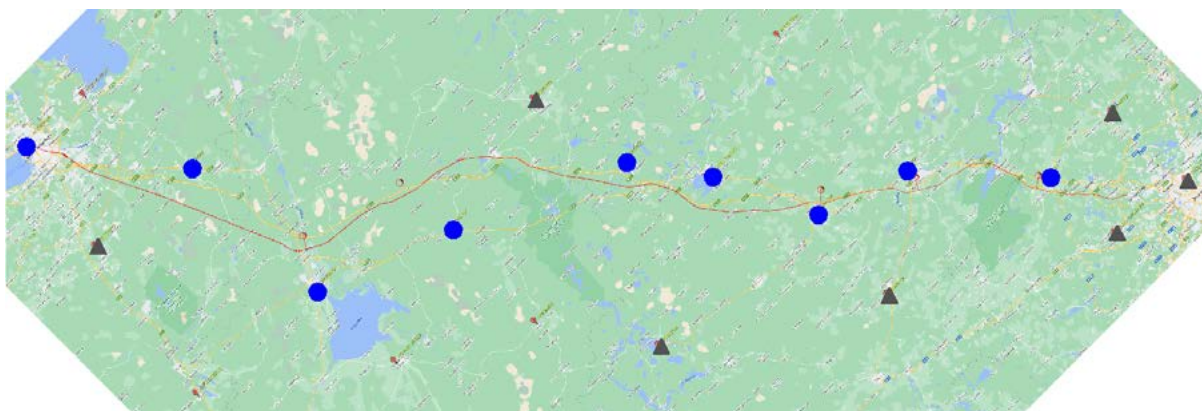


Рис. 3. Расположение метеорологических станций, участвующих в формировании карты распределения



Рис. 4. Карта распределения наибольшей толщины снежного покрова, созданная по первой группе метеостанций

параметров. Одним из таких параметров была наибольшая толщина снежного покрова, представленная на рис. 2.

На рис. 3 метеостанции поделены на две группы: первая (отмечена кружками) — исходные метеорологические станции, материалы наблюдений по которым использовались для

определения расчетных параметров, вторая (треугольники) — добавленные уточняющие метеорологические станции.

На рис. 4 представлена карта распределения наибольшей толщины снежного покрова, которая была создана с использованием первой группы метеорологических станций. Как видно из срав-

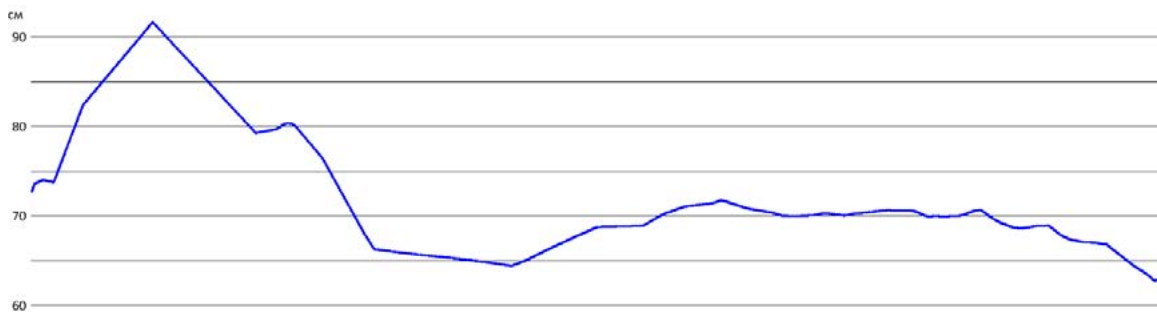


Рис. 5. График изменения наибольшей толщины снежного покрова вдоль трассы



Рис. 6. График наибольшей толщины снежного покрова вдоль трассы, созданный с использованием первой группы метеостанций

нения с картой, приведенной на рис. 2, при создании которой использовались данные наблюдений с обеих групп метеостанций, получившаяся карта распределения не только не охватывает в полной мере территорию прохождения трассы, но и предлагает совершенно отличное распределение наибольшей толщины снежного покрова на всем протяжении, что видно по форме и размещению изолиний.

Использование карт распределения параметров позволяет получить данные по требуемым величинам в любой точке территории охватываемой картой. На рис. 5 представлен график, полученный на базе карты распределения, изображенной на рис. 2, изменения одного из наблюдаемых параметров — наибольшей толщины снежного покрова — вдоль оси рассматриваемой трассы. Зная местоположение интересующего объекта, расположенного на трассе, график на рис. 5

позволит с достаточной точностью определить искомую величину исследуемого параметра.

В то же время, при недостаточном количестве учитываемых в проектной документации метеорологических станций, как отмечалось выше по тексту, качество получаемых результатов может ощутимо снижаться и не обеспечивать достаточной для использования в расчетах точности. На рис. 6 представлен график наибольшей толщины снежного покрова, полученный с использованием карты распределения, при построении которой использовались данные по метеорологическим станциям только первой группы. На рисунке выделены области, где трасса рассматриваемого объекта выходит за границы сформированной карты распределения исследуемого параметра, что не позволяет определить ни его величину, ни динамику изменения в этих пределах, и, как следствие, это скажется на результатах расчетов. При сравнении приведен-

ного на рис. 6 графика с графиком на рис. 5, который был построен на базе карты распределения рассматриваемого параметра с использованием метеостанций обеих групп, заметно существенное отличие как по форме, так и по значениям параметра наибольшей толщины снежного покрова вдоль трассы линейного объекта.

Заключение

Таким образом, по результатам инженерных гидрометеорологических изысканий могут быть составлены карты распределения параметров по всем основным наблюдаемым параметрам и использованы при выполнении расчетов. При выборе используемых в проектной документации метеорологических станций и данных наблюдений по ним необходимо учитывать оргграфические характеристики, водные объекты, а также факт взаимного влияния гидрометеорологических параметров смежных метеостанций на характер их распределения в промежутке между ними. Дополнительно требуют рассмотрения территории, расположенные в границах с сильной застройкой в пределах крупных населенных пунктов, где на гидрометеорологические явления могут оказывать сильное влияние результаты жизнедеятельности человека. Такой подход позволит с достаточной степенью адекватности получать значения параметров исследуемых величин на объектах, удаленных от площадок метеорологических станций и используемых в расчетах. Также стоит отметить, что отдельной проблемой является недостаточная плотность размещения метеорологических станций и пунктов наблюдения, влияющая на качественные показатели результатов обработки исследуемых параметров.

Библиографический список

1. Erevedentsev Yu. P. Climate change on the territory of russia in the late 20th-early 21st centuries / Yu. P. Erevedentsev, A. A. Vasil'ev, B. G. Sherstyukov, K. M. Shantalinskii // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2021. — № 10 — Pp. 14–26. — DOI: 10.52002/0130-2906-2021-10-14-26.
2. Zolina O. G. Current climatic variability of extreme precipitation in russia / O. G. Zolina, O. N. Bulygina // *Fundamental and Applied Climatology*. — 2016. — Vol. 1. — Pp. 84–103. — DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103.
3. Pechatnova E. V. Eprecipitation influence assessment on accidents risk outside built-up areas / E. V. Pechatnova, K. Safronov // *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. — 2020. — № 4(74). — Pp. 512–522. — DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-4-512-522.
4. Gusev N. The method of estimation of the technical conditions of transport facilities used in cold regions after the accidents caused by temperature anomalies / N. Gusev, L. Svatovskaya, A. Kucherenko // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — № 50. — Pp. 309–318. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_32.
5. Solomahin A. The acceleration of hardening of non-autoclaved foam concrete with the mechano-activated binder when constructing in the arctic and cold regions / A. Solomahin, L. Svatovskaya, Y. Kamenev // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — № 50. — Pp. 487–494. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_51.
6. Mustafin M. G. Topographic-geodetic and cartographic support of the arctic zone of the Russian Federation / M. G. Mustafin, V. N. Balandin, M. J. Bryn et al. // *Journal of Mining Institute*. — 2018. — № 232. — Pp. 375–382. — DOI: 10.31897/pmi.2018.4.375.
7. Titova T. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova, A. Elizaryev // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — № 49. — Pp. 473–478. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_49.
8. Bogomolova N. The study of railway embankment deformations in cold regions / N. Bogomolova, M. Bryn, A. Nikitchin, A. Kolos, A. Romanov // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — № 50. — Pp. 223–229. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_24.
9. Голубцов В. А. Особенности проектирования трассы железной дороги в условиях вечной мерзлоты / В. А. Голубцов, Н. С. Бушуев, С. В. Шкурников и др. // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. — 2019. — № 3(63). — С. 135–142. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).135-142.

10. Голубцов В. А. Проблемы проектирования железнодорожных станций в холодных регионах / В. А. Голубцов, В. В. Костенко // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (РИЛТТРАНС-2019): сборник трудов. — 2020. — С. 57–68.

11. Zinkovsky V. N. Considering atmospheric precipitations at agromeliorative calculations / V. N. Zinkovsky, T. S. Zinkovskaya // International Research Journal. — 2018. — № 5(71). — Pp. 130–135. — DOI: 10.23670/IRJ.2018.71.019.

12. Fomin A. A. Changes in agro-climatic conditions within the steppe landscapes of the krasnodar territory

according to ground observations / A. A. Fomin, V. V. Bratkov, S. V. Savinova, D. S. Astanin // International agricultural journal. — 2021. — № 6(64). — DOI: 10.24412/2588-0209-2021-10417.

Дата поступления: 10.05.2022

Решение о публикации: 25.05.2022

Контактная информация:

САМОФАЛОВ Д. П. — канд. техн. наук;

ШКУРНИКОВ Сергей Васильевич —

канд. техн. наук, доцент, 3123810@mail.ru

ГОЛУБЦОВ Владимир Анатольевич — инженер;

kipjd@mail.ru

Preparation Improvement of the Results of Engineering-Hydrometeorological Research for Transport Infrastructure Facility Projection

D. P. Samofalov, S. V. Shkurnikov, V. A. Golubtsov

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

For citation: Samofalov D. P., Shkurnikov S. V., Golubtsov V. A. Preparation Improvement of the Results of Engineering-Hydrometeorological Research for Transport Infrastructure Facility Projection // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 323–341. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-232-241

Summary

Purpose: Peculiarities and problems that should be considered, when preparing reports on engineering-hydrometeorological research, for project documentation development. Scientific-technical support of reporting documentation on engineering research for linear objects showed the need in some cases to create climate models and maps of being studied parameters distribution. The importance of the development of meteorological observation/research institution is pointed out because being obtained data are critical for being projected facility row. Recommendations, on the example of meteorological parameters, on design of distribution maps for being investigated parameters and on drawing graphs for these parameters value change along being projected linear objects. **Methods:** Analysis and comparison of the results on engineering hydrometeorological research, given assessment of sufficiency of the presented data, while solving applied tasks on linear objects. **Results:** Need to increase in some cases the number of involved meteorological stations for the possibility to create distribution maps for being studied parameters was established. An example is presented and the comparison of distribution maps, created using data from reporting documentation, with those created from additional information was made. It was also found that existing network of hydrometeorological stations on the territory of the Russian Federation is insufficient to obtain results of necessary accuracy, especially, when designing linear objects as well as objects located along the route of being projected line. **Practical importance:** The possibility of using maps of hydrometeorological parameters distribution for to obtain data in areas, being remote from hydrometeorological stations, has been demonstrated. It is concluded that it's necessary to increase the number of observation stations for being studied parameters that will reduce the ambiguity in hydrometeorological calculations when determining the parameter values for to justify projection decisions.

Keywords: Railway route, hydrometeorology, modeling, parameter distribution map, hydrometeorological stations.

References

1. Erevedentsev Yu. P., Vasil'ev A. A., Sherstyukov B. G., Shantalinskii K. M. Climate change on the territory of Russia in the late 20th-early 21st centuries. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology]. 2021, I. 10, pp. 14-26. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-10-14-26. (In Russian)
2. Zolina O. G., Bulygina O. N. Current climatic variability of extreme precipitation in Russia. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* [Fundamental and applied climatology]. 2016, vol. 1, pp. 84-103. DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103. (In Russian)
3. Pechatnova E. V., Safronov K. E. Precipitation influence assessment on accidents risk outside built-up areas. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University]. 2020, I. 4 (74), pp. 512-522. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-4-512-522. (In Russian)
4. Gusev N., Svatovskaya L., Kucherenko A. The method of estimation of the technical conditions of transport facilities used in cold regions after the accidents caused by temperature anomalies. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, I. 50, pp. 309-318. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_32
5. Solomahin A., Svatovskaya L., Kamenev Y. The acceleration of hardening of non-autoclaved foam concrete with the mechano-activated binder when constructing in the arctic and cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, I. 50, pp. 487-494. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_51
6. Mustafin M. G., Balandin V. N., Bryn M. J., Matveev A. J., Menshikov I. V., Firsov Y. G. Topographic-geodetic and cartographic support of the arctic zone of the Russian Federation. *Journal of Mining Institute*. 2018, I. 232, pp. 375-382. DOI: 10.31897/pmi.2018.4.375
7. Titova T., Akhtyamov R., Nasyrova E., Elizaryev A. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, I. 49, pp. 473-478. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_49
8. Bogomolova N., Bryn M., Nikitchin A., Kolos A., Romanov, A. The study of railway embankment deformations in cold regions. (2020) *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, I. 50, pp. 223-229. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_24
9. Golubtsov V. A., Bushuev N. S., Shkurnikov S. V., Gerasimov V. A., Morozova O. S. Osobennosti proektirovaniya trassy zheleznoy dorogi v usloviyakh vechnoy merzloty [Design features of the railway route in permafrost conditions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2019, I. 3 (63), pp. 135-142. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).135-142. (In Russian)
10. Golubtsov V. A., Kostenko V. V. Problemy proektirovaniya zheleznodorozhnykh stantsiy v kholodnykh regionakh [Problems of designing railway stations in cold regions]. *Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh (RILTTRANS-2019)* [Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems (RILTTRANS-2019)]. 2020, pp. 57-68. (In Russian)
11. Zinkovsky V. N., Zinkovskaya T. S. Considering atmospheric precipitations at agromeliorative calculations. *MEZH DUNARODNYY NAUCHNO-ISSLEDOVATEL'SKIY ZhURNAL* [INTERNATIONAL SCIENTIFIC RESEARCH JOURNAL]. 2018, I. 5 (71), pp. 130-135. DOI: 10.23670/IRJ.2018.71.019. (In Russian)
12. Fomin A. A., Bratkov V. V., Savinova S. V., Astanin D. S. Changes in agro-climatic conditions within the steppe landscapes of the Krasnodar territory according to ground observations. *International Agricultural Journal*. 2021, I. 6 (64). DOI: 10.24412/2588-0209-2021-10417

Received: May 10, 2022

Accepted: May 25, 2022

Author's information:

D. P. SAMOFALOV — PhD in Engineering;

Sergey V. SHKURNIKOV — PhD in Engineering,

Associate Professor, Head of Railway Research and

Development Department; e-mail: 3123810@mail.ru;

Vladimir A. GOLUBTSOV — Engineer; kipjd@mail.ru

УДК 621.313

Влияние термомеханической нагрузки на старение изоляции тяговых электродвигателей тепловозов

М. А. Шрайбер

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

Для цитирования: Шрайбер М. А. Влияние термомеханической нагрузки на старение изоляции тяговых электродвигателей тепловозов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 242–248. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-242-248

Аннотация

Цель: Рассмотреть задачу повышения надежности тяговых электрических машин. Выполнить оценку влияния термомеханических напряжений на срок службы изоляционного материала тяговых электродвигателей. **Методы:** Основным методом исследования и расчета температурных полей выбран метод конечных элементов, выполненный в программном пакете SolidWorks 2005. **Результаты:** Результаты показывают, что термомеханические напряжения играют значительную роль во время динамического термического старения системы изоляции обмотки статора. При динамическом изменении температуры изоляционная система испытывает повторяющиеся термомеханические нагрузки, поскольку коэффициенты теплового расширения изоляционных материалов и медных проводников различны. **Практическая значимость:** Выявлена необходимость дальнейшего изучения фактического теплового состояния электрических машин, которая позволит повысить точность определения температуры, предупредить возможный перегрев в эксплуатации, тем самым продлив ресурс тяговых двигателей, и снизить вероятность внезапных отказов. Разработанные методы определения теплового состояния электрических машин рекомендуются к практическому использованию.

Ключевые слова: Тяговый электродвигатель локомотива, тепловые процессы электрических машин.

Введение

До недавнего времени для ТЭД основным фактором, связанным с ухудшением состояния изоляции обмотки, считалось термическое окисление изоляционных материалов. Теперь выяснилось, что тепловая перегрузка вызывает также механическое напряжение в обмотках ТЭД, что

со временем может привести к усталости и ухудшению их характеристик.

Само по себе термомеханическое напряжение не является новым предметом изучения. Можно найти несколько исследований, сообщающих о механическом напряжении термического происхождения. Деформация паяных соединений в

результате напряжения, вызванного несоответствием коэффициентов теплового расширения, рассмотрена в [1]. Согласно ему, несоответствие коэффициента теплового расширения может вызвать механическое напряжение в электронных узлах не только из-за циклического изменения температуры во время нормальной работы, но также из-за высоких температур, возникающих во время изготовления, транспортировки и хранения.

В [2] авторы проанализировали термические напряжения в двухфазных композитах как численно, так и аналитически. Моделирование повреждений и отказов модулей IGBT-транзисторов с учетом электрических, термических и механических напряжений было изучено в [3, 4]. Было обнаружено, что граница раздела связующий провод — подложка является наиболее уязвимой, поскольку больше всего подвержена термическому механическому напряжению. Из этого следует, что термомеханические напряжения широко изучались применительно к корпусам силовой электроники, слоистым и композитным материалам, а для тяговых электрических машин было обнаружено крайне мало публикаций [5].

Термомеханическое старение изоляции ТЭД

Изоляция тяговых электрических машин тепловоза — это композитный материал, состоящий из нескольких составляющих, которые сохраняют свои индивидуальные свойства, в отличие от материалов с однородной смесью, таких как сплавы. Они неоднородны (обычно двухфазные) и содержат один непрерывный материал (чаще всего стеклоткань), который пропитан наполнителем. Наполнители бывают разных видов — пропиточные лаки или компаунды для повышения электрической и механической прочности, а также защиты обмоток ТЭД тепловоза от воздействия окружающей среды, например влаги и пыли.

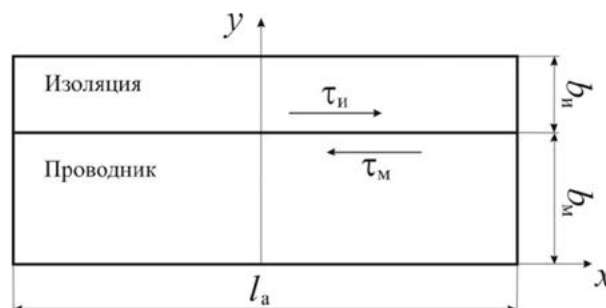


Рис. 1. Расчетная схема напряженного состояния на границе изоляции и медного проводника

Поскольку потеря энергии неизбежна во время работы ТЭД, температура обмотки повышается при увеличении нагрузки и снижается при ее уменьшении [6]. При изменении температуры электрическая изоляция подвергается не только термическому воздействию, но и термомеханическому напряжению, которое вызывается разными коэффициентами теплового расширения меди проводников и изоляционного материала. Механические напряжения, особенно касательные напряжения, возникающие на границах раздела между медным проводником и изоляционным материалом, вызывают появление внутренних трещин и его расслоение (рис. 1).

Расслоение вызывает образование воздушных полостей, которые ухудшают передачу теплоты от медного проводника к сердечнику статора, делая обмотки более восприимчивыми к перегреву. Впоследствии, когда материал изоляции не может выдержать определенный уровень тепловой или механической нагрузки, ТЭД выходит из строя.

Как упоминалось выше, термомеханическое напряжение вызывается разностью коэффициентов теплового расширения связанных слоев. Как показано на рис. 1, возникающее касательное напряжение в середине паза при $l_a/2$ равно нулю. Напряжение постепенно увеличивается по длине медного проводника и достигает своего максимума на свободном конце активной части обмотки при выходе из паза. Результирующее касательное напряжение в соединительном слое

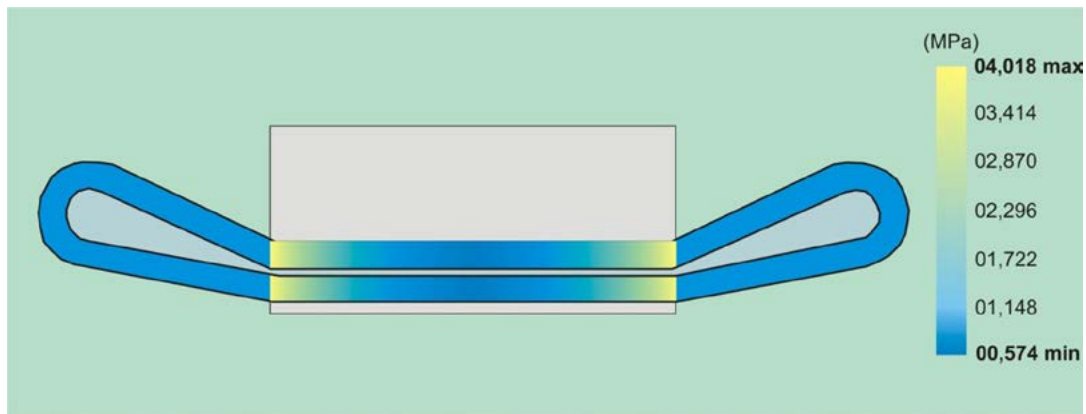


Рис. 2. Результат моделирования касательных напряжений в изоляции обмотки асинхронного ТЭД

из-за изменения температуры ΔT может быть выражено как [7]:

$$\tau = \frac{(\alpha_{и} - \alpha_{м})G_{и}\Delta T \sin h(\beta x)}{\beta b_{и} \cos h(\beta l_a / 2)}; \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{G_{и}}{b_{и}}} \left(\frac{1}{E_{м} b_{м}} \right), \quad (2)$$

где $E_{м}$ — модуль упругости медного проводника обмотки статора, Па; $G_{и}$ — модуль сдвига материала изоляции, Па; $\alpha_{и}$, $\alpha_{м}$ — коэффициенты теплового расширения материала изоляции и медного проводника обмотки статора соответственно, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; l_a — длина активной части обмотки статора, м; $b_{и}$, $b_{м}$ — толщина изоляции и медного проводника обмотки статора соответственно, м.

Согласно [7], приведенное касательное напряжение достигает максимума в каждом из концов активной длины обмотки статора при $l_a/2$, что выражается следующим образом:

$$\tau_{\max} = \frac{(\alpha_{и} - \alpha_{м})G_{и}\Delta T \operatorname{tg} h(\beta l_a / 2)}{\beta b_{и}}. \quad (3)$$

Обычно достаточно предположить, что $\operatorname{tg} h(\beta l_a) \approx 1$, таким образом, максимальное

напряжение сдвига τ_{\max} возникает на конце склеенных слоев, при этом оно не зависит от общей длины l_a , как выражено в [7]:

$$\tau_{\max} = \frac{(\alpha_{и} - \alpha_{м})G_{и}\Delta T}{\beta b_{и}}. \quad (4)$$

Анализ термомеханического касательного напряжения в материале изоляции статорной обмотки ТЭД при $\Delta T = 100 \text{ } ^{\circ}\text{N}$ проводился методом конечных элементов в программном комплексе SolidWorks. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

На рис. 3 показана зависимость изменения касательного напряжения в материале изоляции вдоль паза, построенная по результатам моделирования и расчета по уравнению (4).

Как и следовало ожидать, максимальное касательное напряжение возникает на конце активной части обмотки и составляет 3,83 мПа. Кроме того, следует отметить, что уравнение (4) дает очень точную оценку (минимальная погрешность моделирования и аналитического расчета не превышает 1,5 %) касательного напряжения в материале изоляции.

Из данных моделирования и расчета видно, что максимальные касательные напряжения намного меньше, чем предел прочности материала на рас-

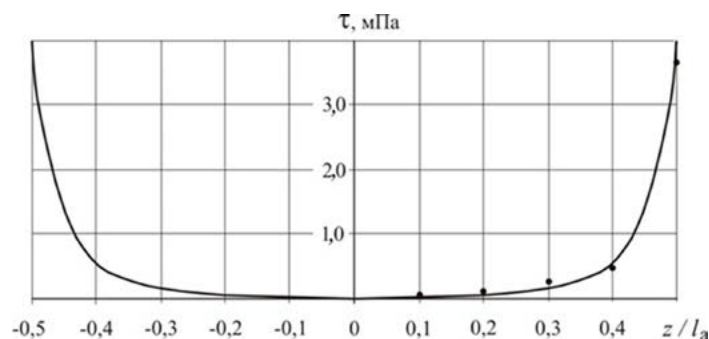


Рис. 3. Распределение касательных напряжений по длине паза асинхронного ТЭД:

● — данные расчета, — — результаты моделирования в среде SolidWorks

тяжение и предел текучести. Однако материал изоляции подвергается многократной загрузке и разгрузке, вызывает усталость. Даже в области упругой деформации локальная деформация накапливается и в конечном итоге вызывает усталостное разрушение материала изоляции после достаточного количества циклов. Следует отметить, что понятие «усталость» обычно связывают с металлами или их сплавами, но она может возникать во всех материалах, способных к пластической деформации. Сюда входят полимеры и композиционные материалы.

Усталостное разрушение может быть определено как процесс, при котором происходят прогрессирующие, локальные и постоянные микроструктурные изменения в материале изоляции ТЭД тепловозов, когда она подвергается воздействию усилий, вызывающих знакопеременные напряжения и деформации в некоторой точке или нескольких точках. Эти микроструктурные изменения могут завершиться образованием трещин и их последующим ростом до размеров, вызывающих окончательное разрушение материала изоляции после определенного количества циклов напряжений или деформаций.

Прилагательное «прогрессивный» подразумевает, что процесс утомления материала изоляции ТЭД происходит в течение определенного периода времени нагрузки или эксплуатации. Воз-

никновение усталостного разрушения материала изоляции ТЭД часто происходит очень внезапно, без внешнего предупреждения. Однако вовлеченные механизмы разрушения изоляции ТЭД могли скрытно работать с самого начала времени эксплуатации локомотива.

Прилагательное «локализованный» подразумевает, что процесс усталостного разрушения происходит преимущественно в определенных локальных областях материала изоляции ТЭД и неоднородно по всему ее объему. Эти уязвимые области могут иметь высокие локальные концентрации деформаций и напряжений, вызванные резкими изменениями геометрии или несовершенством материала изоляции ТЭД.

Фраза «постоянные микроструктурные изменения» подчеркивает центральную роль циклических пластических деформаций в возникновении необратимых изменений в структуре изоляции ТЭД. Многочисленными исследованиями установлено, что усталость в каждом случае является результатом циклической пластической деформации [8]. Небольшая пластическая деформация, примененная только один раз, не вызывает каких-либо существенных изменений в структуре материала изоляции ТЭД, но многократное повторение очень малых пластических деформаций приводит к кумулятивному повреждению, заканчивающемуся усталостным ее разрушением.

Представленная конечно-элементная модель обеспечивает оценку термомеханического напряжения при определенных динамических тепловых условиях процесса работы материала изоляции. Кроме того, с помощью данной модели получена значимость сопутствующего термомеханического старения материала изоляции. Для точной оценки срока службы в отношении термомеханического старения изоляционного материала требуются дополнительные исследования по определению его характеристик.

Согласно модели Дакина [9], время исправного функционирования L является функцией температуры T :

$$L = A \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (5)$$

где A и B — постоянные коэффициенты, которые определяются с помощью экспериментальных исследований.

Однако данная модель подходит для термомеханического старения материала изоляции при постоянной температуре, в то время как для динамической тепловой нагрузки, например в тяговых двигателях локомотивов, представленную модель необходимо модифицировать, поскольку температура меняется со временем. Предполагая, что скорость старения материала изоляции обратно пропорциональна сроку службы, а доля потерь в течение срока службы может быть выражена как функция температуры. Таким образом, когда температура зависит от времени, $T(t)$ для одного теплового цикла (L_{fc}) может быть вычислена с помощью выражения:

$$L_{fc} = \int_0^{\Delta t_c} \frac{1}{L_0} \exp\left[-B\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T(t)}\right)\right] dt, \quad (6)$$

где L_0 — срок службы материала изоляции при эталонной температуре T_0 , ч; t_c — период времени одного теплового цикла, ч.

Выводы

В настоящей работе выполнен расчет и моделирование процесса динамического нагружения изоляции ТЭД тепловозов. Для более точной оценки термомеханических напряжений в изоляционном материале по длине активной части обмотки выполнено моделирование касательных напряжений на границе между материалом изоляции и медным проводником. Циклические процессы в данной области приводят к расслоению материала изоляции, что, в свою очередь, ухудшает процесс передачи теплоты от медного проводника к сердечнику статора. Сравнивая данные моделирования и численно рассчитанные результаты, можно сделать вывод, что термомеханическое старение играет важную роль в динамическом термическом процессе работы тяговых электрических машин тепловозов и оказывает существенное влияние на их срок службы.

Библиографический список

1. Pan T.-Y. Thermal cycling induced plastic deformation in solder joints — Part II: Accumulated deformation in through hole joints / T.-Y. Pan // IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol. — 1991. — № 14. — Pp. 824–832.
2. Li W. Thermal-mechanical failure and life analysis on CBGA package used for great scale FPGA chip / W. Li, X. Zhang // Proceedings of the International Conference on Electronic Packaging Technology High Density Packaging. — Beijing, China, 10–13 August 2009.
3. Yuan Q. Failure mode verification of power IGBT under different thermal stress application conditions in power cycling test environment / Q. Yuan, R. Endoh, T. Ima // Proceedings of the International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC). — Mie, Japan, 17–21 April 2018. — Pp. 367–370.
4. Pedersen K. B. Dynamic modeling method of electrothermo-mechanical degradation in IGBT modules / K. B. Pedersen, K. Pedersen // IEEE Trans. Power Electron. — 2016. — № 31. — Pp. 975–986.
5. Грищенко А. В. Термомеханические напряжения в изоляции тяговых электрических машин тепловозов /

А. В. Грищенко, М. А. Шрайбер // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов в двух томах. — СПб. — 2021. — С. 107–109.

6. Грищенко А. В. Экспериментальные исследования теплового состояния коллектора ТЭД / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Ф. Ю. Базилевский, М. А. Шрайбер // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век: сборник материалов VI Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС А. В. Плакса. — 2018. — С. 124–129.

7. Chen W. Thermal stress in bonded joints / W. Chen, C. Nelson // IBM Journal of Research and Development. — 1979. — Vol. 23. — № 2. — Pp. 179–188.

8. Voitto I. J. Kokko. Ageing Due to Thermal Cycling by Start and Stop Cycles in Lifetime Estimation of Hydroelectric Generator Stator Windings / Voitto I. J. Kokko // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). — 2011.

9. Dakin T. W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon / T. W. Dakin // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. — 1998. — Vol. 67. — № 1. — Pp. 113–122.

Дата поступления: 15.03.2022

Решение о публикации: 05.05.2022

Контактная информация:

ШРАЙБЕР Марина Александровна — канд. техн. наук, доц.; goshapti4ka@yandex.ru

Influence of Thermomechanical Workload on the Aging of Insulation of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives

M. A. Shreiber

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

For citation: Shraiber M. A. Influence of Thermomechanical Workload on the Aging of Insulation of Traction Motors of Diesel Locomotives // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 242–248. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-242-248

Summary

Purpose: To consider the problem of increasing the reliability of traction electric machines. To assess the effect of thermomechanical stresses on the service lifetime of insulating material of traction electric motors. **Methods:** Finite element method, implemented in SolidWorks 2005 software package, was chosen as the main method for studying and calculating temperature fields. **Results:** The results show that thermomechanical stresses play a significant role during dynamic thermal aging of stator winding insulation system. With dynamic temperature changes, an insulation system experiences repeated thermomechanical stresses since the coefficients of thermal expansion of insulating materials and copper conductors are different. **Practical importance:** The need for further study of the actual thermal state of electrical machines has been identified which will allow to a rise temperature definition accuracy, to give a warning for possible overheating in operation by that extending traction motor lifetime and reducing sudden failure likelihood. The developed methods for determining electrical machine thermal state are recommended for practical use.

Keywords: Locomotive traction motor, thermal processes of electrical machines.

References

1. Pan T.-Y. Thermal cycling induced plastic deformation in solder joints. Part II: Accumulated deformation in through hole joints. IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol. 1991, 14, pp. 824–832.
2. Li W., Zhang X. Thermal-mechanical failure and life analysis on CBGA package used for great scale FPGA chip. In Proceedings of the International Conference on Electronic Packaging Technology High Density Packaging, Beijing, China, August 10–13, 2009.
3. Yuan Q., Endoh R., Ima T., Kajita Y., Luo Y. Failure mode verification of power IGBT under different thermal stress application conditions in power cycling test environment. In Proceedings of the International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), Mie, Japan, April 17–21, 2018, pp. 367–370.
4. Pedersen K. B., Pedersen K. Dynamic modeling method of electro-thermo-mechanical degradation in IGBT modules. IEEE Trans. Power Electron. 2016, 31, pp. 975–986.
5. Grishchenko A. V., Shrayber M. A. Termomekhanicheskie napryazheniya v izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin teplovozov [Thermomechanical stresses in the insulation of traction electric machines of diesel locomotives]. *III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum* [III Betancourt International Engineering Forum]. St. Petersburg, 2021, pp. 107-109. (In Russian)
6. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Bazilevskiy F. Yu., Shrayber M. A. Eksperimental'nye issledovaniya teplovogo sostoyaniya kollektora TED [Experimental studies of the thermal state of the TED collector]. *Lokomotivy. Elektricheskoy transport. XXI vek. Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya doktora tekhnicheskikh nauk, professora kafedry "Elektricheskaya tyaga" PGUPS A.V. Plaksa* [Locomotives. Electric transport. XXI Century. Collection of materials of the VI International Scientific and Technical Conference. dedicated to the 90th anniversary of the birth of Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Electric Traction" PGUPS A.V. Crybaby]. 2018, pp. 124-129. (In Russian)
7. Chen W., Nelson C., Thermal stress in bonded joints, IBM Journal of Research and Development. 1979, vol. 23, I. 2, pp. 179-188.
8. Voitto I. J. Kokko, Ageing Due to Thermal Cycling by Start and Stop Cycles in Lifetime Estimation of Hydroelectric Generator Stator Windings, IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011.
9. Dakin T. W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1998, vol. 67, I. 1, pp. 113-122.

Received: March 15, 2022

Accepted: May 05, 2022

Author's information:

Marina A. SCHREIBER – PhD in Engineering, Associate Professor; goshapti4ka@yandex.ru



УДК 629.4.027.2(045)

Оценка максимальных сил, действующих на боковые скользун тележек грузовых вагонов

Г. И. Гаджиметов

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», 140402, Московская область, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

Для цитирования: Гаджиметов Г. И. Оценка максимальных сил, действующих на боковые скользун тележек грузовых вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 249–258. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-249-258

Аннотация

Цель: При проектировании тележки грузового вагона необходимо оценить прочность ее несущих элементов при воздействии сил, ожидаемых в эксплуатации. Величина этих сил зависит от ее конструкции и параметров. Одним из элементов тележки, для которого необходимо оценивать прочность, является боковой скользун. Кроме того, проверке на прочность подлежит и место его размещения на надрессорной балке. Существующий подход оценки прочности бокового скользуна и места его размещения, установленный в нормативном документе, не позволяет рассчитывать силу нагружения в зависимости от конструкции и параметров тележки. В связи с этим необходимо обосновать формулу, позволяющую учесть конструктивные особенности и параметры тележки при определении максимальной вертикальной нагрузки на боковой скользун при оценке его прочности. **Методы:** Предельным состоянием, определяющим максимальное нагружение бокового скользуна, является случай опрокидывания вагона вокруг рельса при действии боковых сил на вагон. Анализируются аналитические выражения, используемые при расчете коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания вагона. **Результаты:** В статье рассматриваются документы, где изложены методики расчета максимальных сил, действующих на боковой скользун тележки грузового вагона, и научные работы, где описываются случаи разрушения боковых скользун, причиной которых могут быть возникающие в эксплуатации высокие по уровню силы между боковым скользуном и ответной частью кузова. В эксплуатации максимальная сила, действующая на боковой скользун, реализуется от перевалки кузова при боковых нагрузках, возникающая от давления ветра, непогашенного ускорения и др. Проведенная работа дала возможность вывести формулу, позволяющую определить максимальную величину вертикальной силы, действующей на скользун, в зависимости от параметров и конструкции тележки. **Практическая значимость:** Сила, рассчитанная в соответствии с этой формулой, позволяет оценивать прочность элементов бокового скользуна и мест его установки на несущих конструкциях в зависимости от параметров и конструкции тележки.

Ключевые слова: Скоростной вагон, грузовой вагон, тележка, скользун, прочность, сила, нагрузка.

Введение

При проектировании железнодорожного подвижного состава и его ответственных составных частей необходимо обеспечивать минимальные требования безопасности, установленные в [1]. Исходя из положений данного документа, при эксплуатации объекта должна обеспечиваться механическая безопасность, что обуславливает необходимость обеспечения прочности и отсутствия пластических деформаций при предельных режимах нагружения и воздействиях.

Для оценки обеспечения прочности на стадии разработки производится расчетная и экспериментальная проверка несущей способности конструкций тележки грузового вагона от действия редких предельных нагрузок, возникающих в эксплуатации. Оценка производится сравнением напряженного состояния несущих конструкций при воздействии на них вертикальных, горизонтальных и кососимметричных нагрузок, рассчитанных по требованиям [2] с допускаемыми напряжениями. Согласно [2] дополнительно требуется оценить прочность составных частей бокового скользуна и места для его размещения на надрессорной балке при воздействии вертикальной силы 370 кН и соответствующей продольной силы трения. В стандарте величина этой силы не зависит от параметров тележки, которые определяют ее несущую способность. Таким образом, при проверке на прочность бокового скользуна этот подход не позволяет учитывать зависимость максимальной вертикальной нагрузки, действующей на него, от следующих параметров тележки:

- максимальной расчетной статической нагрузки от колесной пары на рельсы;
- расстояния между центрами расположения боковых скользунов на надрессорной балке;
- высоты рабочей поверхности скользуна над уровнем головок рельсов.

В связи с этим является актуальным определение влияния перечисленных параметров тележки

на силу, действующую на боковой скользун. Также актуальность задачи подтверждается проводимыми работами по разработке тележек, рассчитанных на конструкционную скорость 140 км/ч, конструкция и параметры которых могут отличаться от эксплуатируемых трехэлементных тележек, соответствующих требованиям [3].

Анализ актуальных методов и исследований по определению максимальных сил, действующих на боковой скользун

При расчете на прочность боковых скользунов должны учитываться конструктивные особенности опирания кузова вагона на тележку. Боковые скользуны могут воспринимать действующие силы полностью, как в тележках пассажирских вагонов, или часть веса кузова вагона при использовании скользунов постоянного контакта, ограниченную условиями [3]. При применении в тележках скользунов зазорного типа вертикальная статическая нагрузка от веса кузова передается полностью на подпятник тележки. Кроме того, боковые скользуны воспринимают силы, возникающие при перевалке кузова от непогашенного ускорения, боковых ветровых нагрузок и других сил, способствующих смещению центра тяжести кузова относительно тележки, т. е. боковой скользун с одной стороны вагона нагружается дополнительными силами при соответствующем разгрузении с другой стороны.

В [4] описаны имевшиеся в эксплуатации случаи деформации и смятия колпаков скользунов типовой тележки модели 18-100 (нагрузка от колесной пары на рельсы 23,5 тс), что может быть следствием появления между скользунном и ответной частью кузова силы свыше 260 кН и напряжений, достигающих или превышающих предел текучести материала.

В [5] не предусмотрена методика расчета максимальных сил, действующих на боковой скользун, для определения его прочности.

В статье [6] приведены результаты теоретических исследований по определению максимальных сил, действующих на скользящие, для разных моделей грузовых вагонов, различающихся осевой нагрузкой, базой вагона и высотой центра масс кузова. При этом максимальная сила на боковой скользящий (374 кН) получена для цистерны от центробежных и динамических сил при движении в кривом участке пути при максимальной допускаемой скорости по непогашенному ускорению, у которой максимальная расчетная статическая нагрузка от колесной пары на рельсы составляет 25 тс (245 кН) и самый высокий уровень центра масс кузова. Приблизительный расчет, выполненный по приведенным в статье параметрам вагона, показал, что коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания $K_{\text{усо}}$ при действии боковых сил на кузов, способствующих появлению нагрузки на боковой скользящий 374 кН, равен 0,8. Полученное значение $K_{\text{усо}}$ ниже нормы, установленной в [2], т. е. в эксплуатации не возникнут силы, действующие на боковой скользящий, больше 374 кН, так как возникает условие, способствующее опрокидыванию вагона. Разработанная по этим требованиям конструкция будет иметь запас по статической прочности, что соответствует подходам по обеспечению безопасности. Вместе с тем при выполнении указанной работы не были учтены боковые силы от действия ветровой нагрузки на кузов и тележки вагона, а также поперечные составляющие продольной силы. При этом был сделан вывод о том, что значение силы, действующей на боковой скользящий, пропорционально моменту сил, вызывающих боковой наклон кузова с опорой на скользящий.

Для определения максимальной нагрузки на боковой скользящий F_c , кН, в [7] предлагается использовать следующую формулу:

$$F_c = \frac{F_{\text{ц}} \cdot h_{\text{ц}} + F_{\text{в}} \cdot h_{\text{в}}}{m \cdot b}, \quad (1)$$

где $F_{\text{ц}}$ и $F_{\text{в}}$ — боковые силы, действующие на кузов вагона от центробежных и ветровых нагрузок, кН;

$h_{\text{ц}}$ и $h_{\text{в}}$ — вертикальные расстояния от мест приложения силы F_c до уровня приложения боковых сил $F_{\text{ц}}$ и $F_{\text{в}}$, м;

m — число параллельно нагруженных скользящих, расположенных с одной стороны вагона;

b — половина расстояния между центрами скользящих в тележке, м.

При определении нагрузки на боковой скользящий по формуле (1) дополнительно должны быть учтены угловое и боковое смещение центра тяжести кузова при деформации рессорного подвешивания. Из формулы (1) понятно, что дополнительная нагрузка на боковой скользящий возникает при перевалке кузова от действия боковых сил.

На основании анализа актуальных методов и исследований по определению максимальных сил на боковой скользящий можно сделать вывод о том, что, поскольку тележки грузовых вагонов проектируют с учетом возможности их использования в вагонах различных типов, оценку прочности ее скользящих, а также мест их установки на несущих элементах тележек необходимо производить при действии более широкого спектра максимальных сил, возможных в эксплуатации. Данному условию удовлетворяет случай действия совокупности боковых сил на вагон, при котором $K_{\text{усо}}$ вагона не выше 1.

Исследование проведем в квазистатической постановке от действия боковых сил, участвующих в опрокидывании вагона при прохождении кривых участков пути.

Результаты исследования

Коэффициент $K_{\text{усо}}$ представляет собой отношение вертикальной статической нагрузки $P_{\text{ст}}$, кН, к динамической вертикальной силе $P_{\text{дин}}$, кН, от

колеса на рельс, вызванной действием боковых сил, и определяется по формуле (2) [2]:

$$K_{\text{усо}} = \frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{дин}}} \geq [K_{\text{усо}}], \quad (2)$$

где $[K_{\text{усо}}]$ — допускаемый коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания.

Допускаемые значения $K_{\text{усо}}$ по [2] приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Нормативные значения $K_{\text{усо}}$ для разных случаев опрокидывания

| Случай опрокидывания | $K_{\text{усо}}$, не менее |
|----------------------|-----------------------------|
| Наружу кривой | 1,30 |
| Внутри кривой | 1,15 |

Из табл. 1 видно, что допускаемые значения при расчете $K_{\text{усо}}$ принимаются существенно выше 1, для того чтобы иметь запас устойчивости при действии дополнительных динамических нагрузок, возникающих при колебаниях, и не допускать значительной обезгрузки колес одной стороны вагона.

Как было отмечено, граничным условием максимальной загрузки скользун от боковых нагрузок кузова, очевидно, является случай, при котором $K_{\text{усо}} \leq 1$. Таким образом, в данном исследовании $K_{\text{усо}}$ принят равным или меньше 1.

Оценку устойчивости вагона от опрокидывания проводят для случаев опрокидывания наружу и внутрь кривого участка пути. Методика расчета $K_{\text{усо}}$ приведена в [2].

Проанализируем формулы для расчета $P_{\text{ст}}$ и $P_{\text{дин}}$ с целью оценки влияния их составляющих на максимальные силы, действующие на боковой скользун.

Вертикальная сила $P_{\text{ст}}$, действующая от колеса на рельс, определяется по формуле:

$$P_{\text{ст}} = \frac{G_{\text{в}} - 2 \cdot P_{\text{N}}^{\text{B}}}{2 \cdot n}, \quad (3)$$

где $G_{\text{в}}$ — сила тяжести вагона, кН;
 P_{N}^{B} — вертикальная составляющая продольной силы, действующей на вагон через автосцепку, кН;
 n — количество колесных пар в вагоне.

Динамическая вертикальная сила $P_{\text{дин}}$, учитывающая опрокидывающие моменты от непогашенного ускорения, ветровой нагрузки и поперечную составляющую продольных квазистатических сил, определяется следующим образом:

$$P_{\text{дин}} = \frac{\sum M}{n \cdot 2S} = \frac{F_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}} + F_{\text{т}} \cdot h_{\text{т}} + F_{\text{вк}} \cdot h_{\text{вк}}}{n \cdot 2S} + \frac{2F_{\text{вт}} \cdot h_{\text{вт}} + 2P_{\text{N}}^{\text{п}} \cdot h_{\text{а}} + G_{\text{к}} \cdot \Delta_{\text{к}} + G_{\text{т}} \cdot \Delta_{\text{т}}}{n \cdot 2S}, \quad (4)$$

где $\sum M$ — сумма моментов, способствующих опрокидыванию вагона вокруг одного рельса, при движении по кривому участку железнодорожного пути, кН · м;

$2S$ — расстояние между кругами катания колес в колесной паре, принимаемое равным 1,580 или 1,592 м, для случаев опрокидывания наружу или внутрь кривой соответственно;

$F_{\text{к}}, F_{\text{т}}$ — боковые силы, действующие на кузов и тележку и зависящие от поперечных составляющих сил тяжести, возникающих вследствие возвышения наружного рельса, кН;

$h_{\text{к}}, h_{\text{т}}$ — высота от уровня головок рельсов до центров тяжести кузова и тележки, м;

$F_{\text{вк}}, F_{\text{вт}}$ — силы бокового давления ветра на кузов и тележку, кН;

$h_{\text{вк}}, h_{\text{вт}}$ — высота от уровня головок рельсов до геометрических центров боковых проекций кузова и тележки, м;

$P_{\text{N}}^{\text{п}}$ — поперечная составляющая продольной силы, действующая на экипаж через автосцепку, кН;

$h_{\text{а}}$ — высота от уровня головок рельсов до продольной оси автосцепок, м;

$G_{\text{к}}, G_{\text{т}}$ — вес кузова и тележки, кН;

Δ_T — суммарное смещение центра тяжести тележки в поперечной плоскости от ее продольной оси относительно осей колесных пар за счет зазоров в буксах, челюстях, м;
 Δ_K — суммарное смещение центра тяжести кузова в поперечной плоскости от его продольной оси, м.

На рис. 1 представлена схема сил, способствующих опрокидыванию вагона вокруг рельса при его движении по кривому участку железнодорожного пути. Вследствие малости угла α наклона пути к горизонту (из-за возвышения наружного рельса h_p) принимают $\cos \alpha \approx 1$ (это означает, что боковые силы направлены перпендикулярно вертикальной оси вагона).

Выполним расчет $K_{усо}$ для условного вагона-платформы с тележками типовой модели 18-100, параметры которого приведены в табл. 2. При составлении таблицы приняты следующие условия. Длина универсальной платформы — 14,62 м по [8]. Площадью боковой проекции кузова для расчета силы давления ветра на кузов, по рекомендации [7], является боковая проекция груза, погруженного с полным использованием высоты габарита подвижного состава, которая составляет 5,3 м [9]. Для этого случая расстояние от уровня головок рельсов до геометрического центра боковой поверхности кузова можно принять равным 3 м. Высота от уровня головок рельсов до центра масс кузова принята 2,74 м, что позволяет выполнить рекомендацию по общей высоте центров тяжести

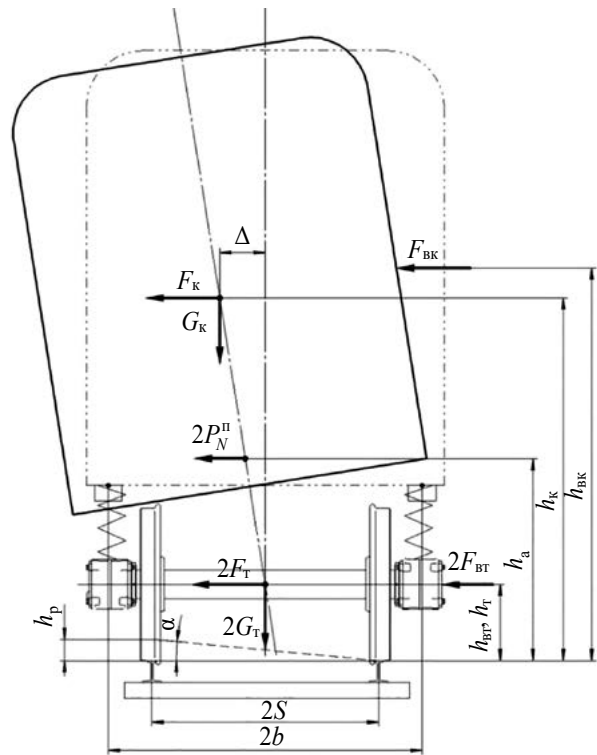


Рис. 1. Силы, действующие на вагон при его движении по кривому участку пути

масс груженых (брутто) грузовых вагонов — не более 2,5 м [5]. Ветровая нагрузка, действующая на груз, принимается равной до 2 кПа по [10]. Значения остальных параметров для выполнения расчета приняты в соответствии с [2, 5, 8].

При значениях параметров вагона и внешних условий воздействия на вагон из табл. 2 $K_{усо}$ для случая опрокидывания наружу кривой приблизительно составляет 1, т. е. достигнуто условие, при котором на вагон действует максимально воз-

ТАБЛИЦА 2. Параметры вагона и внешних условий для определения $K_{усо}$

| Параметр | Значение |
|--|----------|
| Сила тяжести вагона, кН | 922 |
| Расстояние от уровня головок рельсов до центра масс кузова, м | 2,74 |
| Площадь поверхности кузова вагона, м ² | 60 |
| Расстояние от уровня головок рельсов до геометрического центра боковой поверхности кузова, м | 3 |
| Давление ветра на вагон при расчете опрокидывания, кПа | ≤2 |
| Длина вагона по осям сцепления автосцепок, м | 14,62 |

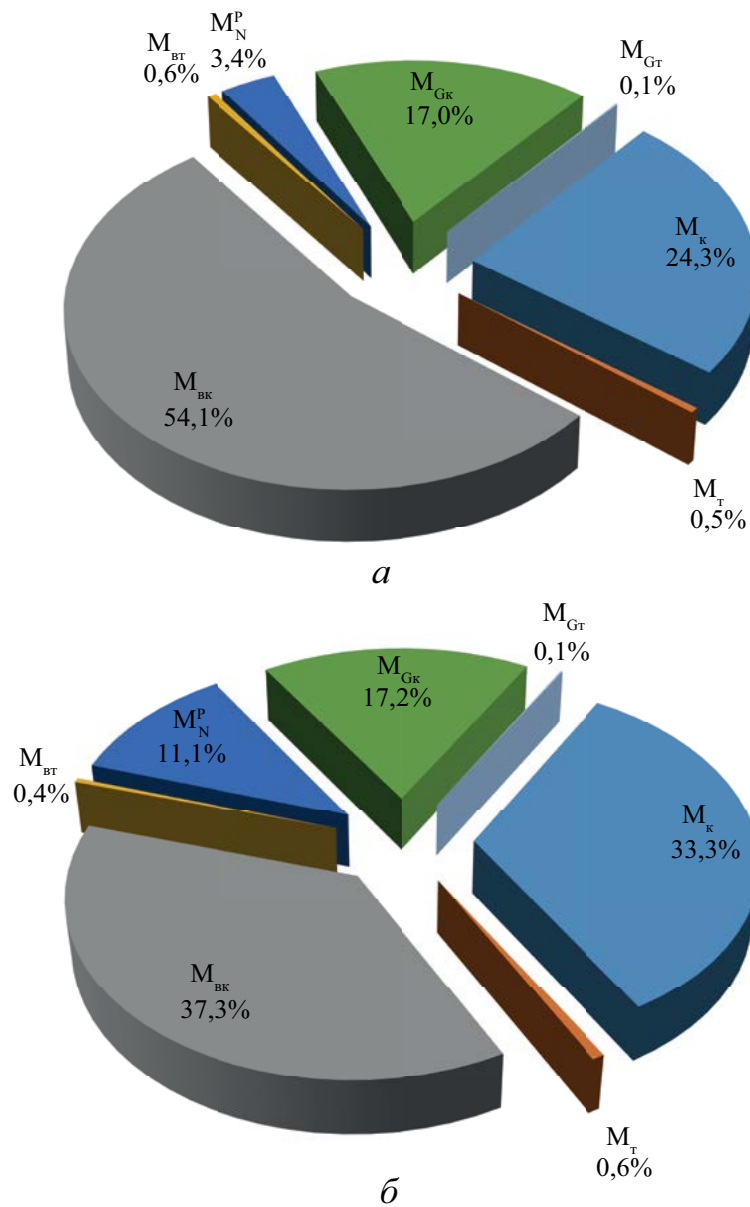


Рис. 2. Вклады опрокидывающих моментов, действующих на вагон, для случаев опрокидывания:
a — наружу кривой; *б* — внутрь кривой

можный опрокидывающий момент по условию устойчивости вагона от опрокидывания вокруг рельса. На рис. 2 представлены вклады от каждого момента, способствующие опрокидыванию вагона в кривой вокруг одного рельса. Моменты определялись по формуле (4).

Стоит отметить, что для случая опрокидывания вагона внутрь кривой моменты приведены

при боковом давлении от ветра 1,3 кПа, так как при этом значения непогашенного ускорения и продольной силы, для которых рассчитывается $K_{усо}$, выше, чем для случая опрокидывания вагона наружу кривой.

Из анализа данных, приведенных на рис. 2, можно сделать вывод, что опрокидывающий момент в основном возникает от действия непо-

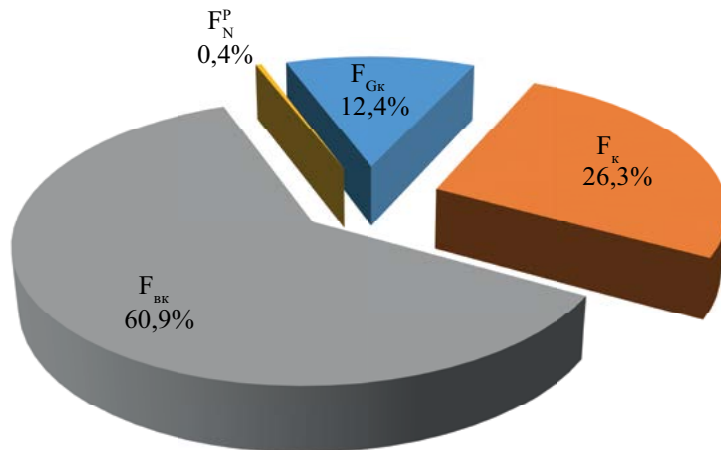


Рис. 3. Вклады от боковых нагрузок на кузов вагона, способствующие нагружению бокового скользунa

гашенного ускорения и ветровой нагрузки на боковую проекцию кузова. На рис. 3 приведены вклады от боковых нагрузок на кузов вагона, способствующие нагружению бокового скользунa для случая опрокидывания наружу кривой. Этот случай приводит к возникновению максимальной силы на боковой скользун, которому в основном способствует ветровая нагрузка на боковую проекцию кузова, имеющая самое большое расстояние от уровня головок рельсов до центра приложения силы. Силы, действующие на боковой скользун и возникающие от боковых нагрузок на кузов вагона по отдельности, рассчитывались по формуле (1).

На основании формул (2)–(4) условие, при котором на скользун воздействуют максимальные силы, можно записать в следующем виде:

$$\frac{G_B}{2 \cdot n} = \frac{F \cdot h}{n \cdot 2S}, \quad (5)$$

где F — боковая сила, действующая на кузов вагона, кН;

h — расстояние от уровня головок рельсов до центра приложения боковой силы к ку-

зову вагона, м, принимается равным 3 м, так как основной опрокидывающий момент возникает от ветровой нагрузки на боковую проекцию кузова.

В формуле (5) приняты следующие допущения:

- основной опрокидывающий момент возникает от ветровой нагрузки до 2 кПа на боковую проекцию кузова (рис. 2);

- расстояние от уровня головок рельсов до геометрического центра боковой поверхности кузова и максимально возможное расстояние от уровня головок рельсов до центра масс кузова могут быть равны при определенных условиях;

- не учитывается вертикальная составляющая продольной силы, действующей на вагон через автосцепку P_N^B , так как это приводит к снижению максимальной силы, действующей на боковой скользун.

Силу тяжести вагона G_B , зная максимальную расчетную статическую нагрузку от колесной пары на рельсы P_o и количество n колесных пар в вагоне, можно определить по формуле:

$$G_B = P_o n. \quad (6)$$

ТАБЛИЦА 3. Максимальные расчетные нагрузки на боковые скользящие тележки в сравнении с нормативной и зафиксированной в эксплуатации

| Тележка грузового вагона | P_o , кН (тс) | b , м | h_c , м | Количество колесных пар в вагоне, n | Нагрузка на боковой скользящий, кН | | |
|--------------------------|-----------------|---------|-----------|---------------------------------------|------------------------------------|------------|----------------|
| | | | | | по [2] | по [4] | по формуле (7) |
| Тип 3 по [3] | 245,0 (25,0) | 0,762 | 0,880 | 4 | 370 | — | 359,0 |
| Тип 2 по [3] | 230,5 (23,5) | | 0,870 | | | ≥ 260 | 339,3 |
| Тип 1 по [3] | 196,0 (20,0) | | 0,880 | | | — | 287,2 |
| Модель 18-6731 | | 1,018 | 0,862 | 6 | — | — | 325,2 |

На основании формул (5) и (6) формула (1) для определения максимальной нагрузки на боковой скользящий F_c примет следующий вид:

$$F_c = \frac{P_o \cdot n \cdot S \cdot (h - h_c)}{m \cdot b \cdot h}, \quad (7)$$

где S — половина расстояния между кругами катания колес в колесной паре, м, принимают равным 0,79 м;

h_c — расстояние от уровня головок рельсов до рабочей поверхности скользящего при максимальной расчетной статической нагрузке от колесной пары на рельсы, м.

В соответствии с формулой (7) выполним расчеты по определению максимальной нагрузки на боковые скользящие тележки типов 1–3 по [3]. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

В табл. 3 для тележек типов 1–3 расстояние h_c складывалось из расстояния от уровня головок рельсов до опорной поверхности подпятника тележки в груженом вагоне (0,74 м) и расстояния от опорной поверхности подпятника до рабочей поверхности скользящего по [3].

Коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания, рассчитанный по формуле (2) при действии боковых сил на кузов, способствующих появлению расчетных нагрузок на скользящий по табл. 3, ориентировочно будет в диапазоне 0,8–1,0 в зависимости от конструкции тележек. Таким образом, конструкции бокового скользящего и места его установки на несущих элементах тележки, прочность которых обеспечивается

от действия сил, рассчитанных по формуле (7), будут иметь запас по статической прочности. Это соответствует подходам по обеспечению безопасности.

Выводы

Максимальная боковая сила, действующая на вагон, ограничивается случаем опрокидывания его вокруг рельса.

На боковые скользящие тележки действуют силы, возникающие от действия боковых сил и нагрузок на кузов вагона.

Формула (7) позволяет учесть конструктивные особенности и определить максимальную вертикальную нагрузку на боковой скользящий в зависимости от параметров тележки. При оценке прочности элементов бокового скользящего и мест его установки это позволит предупредить появление остаточных деформаций и разрушений несущих конструкций тележки в эксплуатации.

Библиографический список

1. О безопасности железнодорожного подвижного состава: технический регламент Таможенного союза: ТР ТС 001/2011. — 117 с.
2. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. — М.: Стандартинформ, 2020. — 58 с.
3. ГОСТ 9246—2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2014. — 29 с.

4. Вериго М. Ф. Причины роста интенсивности бокового износа рельсов и гребней колес / М. Ф. Вериго // ЦП ВНТО железнодорожников и транспортных строителей. — М.: Транспорт, 1992. — 46 с.
 5. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). — М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. — 319 с.
 6. Бороненко Ю. П. Оценка динамических сил, действующих на боковые скользуны постоянного контакта для тележек грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. В. Саидова // Техника железных дорог. — 2012. — № 1. — С. 26–30.
 7. Шадур Л. А. Вагоны. Конструкция, теория и расчет / Л. А. Шадур, И. И. Челенков, Л. Н. Никольский и др.; под ред. Л. А. Шадура. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1980. — 439 с.
 8. Грузовые вагоны колеи 1520 мм железных дорог СССР: альбом-справочник. — М.: Транспорт, 1989. — 176 с.
 9. ГОСТ 9238—2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. — М.: Стандартинформ, 2014. — 173 с.
 10. Боландова Ю. К. Методы оценки устойчивости от опрокидывания контейнеров при перевозке на специализированных железнодорожных платформах: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Ю. К. Боландова; Российский университет транспорта. — М., 2021. — 24 с.
- Дата поступления: 14.05.2022
Решение о публикации: 30.05.2022
- Контактная информация:**
ГАДЖИМЕТОВ Гаджимет Исамединович — руководитель испытательного центра; gadzhimetovgi@vnikti.com

Evaluation of Maximal Forces Impacting on Side Slippers of Freight Wagon Cart

G. I. Gadzhimetov

Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock (VNIKTI) JSC, 410, Oktyabr'skoy Revolucii St., Kolomna, Moscow region, 140402, Russian Federation

For citation: Gadzhimetov G. I. Evaluation of Maximal Forces Impacting on Side Slippers of Freight Wagon Cart // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 249–258. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-249-258

Summary

Purpose: When freight wagon cart engineering it's necessary to assess its load-bearing elements on strength at the impact of forces expected during exploitation. These force value depends on cart design and parameters. One of cart elements, which for it's necessary to evaluate a strength, is a side slipper. Moreover, its placement position on bolster is ought to be evaluated on a strength also. Existing approach of strength evaluation for a side slipper and its placement position, that is set in documentation, doesn't allow to calculate load force depending on the cart design and parameters. In this regard, it's needed to substantiate a formula allowing to take into account cart design specificities and parameters at the definition of maximal vertical load on a side slipper at its strength evaluation. **Methods:** Limit state, defining side slipper maximal load, is the case of wagon rollover over a rail at the effect of side forces upon a wagon. Analysis of analytical expressions used at the calculation of stability margin coefficient against wagon rollover. **Results:** The article analyses the documents, where the methods for the calculation of maximal forces effecting a side slipper of a freight wagon cart are

expounded, and the scientific works, where the cases of side slipper destruction are described, which reason for can be occurring in exploitation high by their level forces between a side slipper and carriage body counterpart. In exploitation, maximal force, impacting on a side slipper, is embodied from the body fell-over at side loads that appears from wind pressure, outstanding acceleration and others. The pursued job has given an opportunity to deduce the formula allowing to state maximal value of vertical force, effecting a slipper, depending on the parameters and design of a cart. **Practical importance:** The force, calculated in accordance with this formula, allows to assess the strength of side slipper elements and of slipper placement positions at load-bearing constructions depending on cart parameters and design.

Keywords: Speed wagon, freight wagon, cart, slipper, strength, force, load.

References

1. *O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza: TR TS 001/2011* [On the safety of railway rolling stock: technical regulations of the Customs Union: TR TS 001/2011]. 117 p. (In Russian)
2. *GOST 33211—2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST 33211—2014. Freight wagons. Requirements for strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2020. 58 p. (In Russian)
3. *GOST 9246—2013. Telezhki dvukhosnye trekhelementnye gruzovykh vagonov zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST 9246—2013. Two-axle three-piece bogies for freight cars of 1520 mm gauge railways. General specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 29 p. (In Russian)
4. Verigo M. F. Prichiny rosta intensivnosti bokovogo iznosa rel'sov i grebney koles [Causes of the increase in the intensity of lateral wear of rails and wheel flanges]. *TsP VNTO zheleznodorozhnikov i transportnykh stroiteley* [TsP VNTO railway workers and transport builders]. Moscow: Transport Publ., 1992. 46 p. (In Russian)
5. *Normy rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Calculation and Design Norms for 1520 mm Gauge Railway Cars of the Ministry of Railways (non-self-propelled)]. Moscow: GosNII-VNIIZhT Publ., 1996. 319 p. (In Russian)
6. Boronenko Yu. P., Orlova A. M., Rudakova E. A., Saidova A. V. Otsenka dinamicheskikh sil, deystvuyushchikh na bokovye skol'zuniy postoyannogo kontakta dlya telezhek gruzovykh vagonov zheleznykh dorog kolei 1520 mm [Evaluation of dynamic forces acting on side bearings of constant contact for bogies of freight cars of 1520 mm gauge railways]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Railway engineering]. 2012, I. 1, pp. 26–30. (In Russian)
7. Shadur L. A., Chelenkov I. I., Nikol'skiy L. N., Nikol'skiy E. N., Koturanov V. N., Proskurnev P. G., Kazanskiy G. A., Spivakovskiy A. L., Devyatkov V. F. *Vagony. Konstruktsiya, teoriya i raschet* [Wagons. Construction, theory and calculation]. Moscow: Transport Publ., 1980. 439 p. (In Russian)
8. *Gruzovye vagonny kolei 1520 mm zheleznykh dorog SSSR* [Freight wagons of 1520 mm gauge railways of the USSR]. Moscow: Transport, 1989. 176 p. (In Russian)
9. *GOST 9238-2013. Gabarity zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i priblizheniya stroeniy* [GOST 9238—2013. Dimensions of railway rolling stock and the proximity of buildings]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 173 p. (In Russian)
10. Bolandova Yu. K. Metody otsenki ustoychivosti ot oprokidyvaniya konteynerov pri perezovke na spetsializirovannykh zheleznodorozhnykh platformakh. Kand. Diss [Methods for assessing the stability against overturning of containers during transportation on specialized railway platforms. Cand. Diss]. *Rossiyskiy universitet transporta* [Russian University of Transport]. Moscow, 2021. 24 p. (In Russian)

Received: May 14, 2022

Accepted: May 30, 2022

Author's information:

Gadzhimet I. GADZHIMETOV — Head of Testing Center; gadzhimetovgi@vnikti.com

УДК 629.4.01

Перспективы развития сети высокоскоростных железных дорог в мире на ближайшее десятилетие

А. А. Гринемайер, И. Б. Аникин, Р. Е. Парфененко, М. Ю. Изварин

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

Для цитирования: *Гринемайер А. А., Аникин И. Б., Парфененко Р. Е., Изварин М. Ю.* Перспективы развития сети высокоскоростных железных дорог в мире на ближайшее десятилетие // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 259–265. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-259-265

Аннотация

Цель: Выявить основные концепции развития высокоскоростных магистралей в мире, выделить лидирующие страны в области сооружения сети высокоскоростных железных дорог, отследить динамику развития строительства высокоскоростных железных дорог, сравнить доли высокоскоростных железных дорог по отдельным континентам и странам, определить место России в области высокоскоростного транспорта, обозначить перспективы отдельных стран и континентов для сооружения новых высокоскоростных линий и применения новых технологий при их постройке в ближайшее десятилетие. **Методы:** Сравнение масштабов строительства выделенных высокоскоростных линий по отдельным странам, графический анализ динамики роста высокоскоростной сети в пяти наиболее развитых по данному вопросу странах. **Результаты:** Выделены лидирующие страны в области сооружения выделенной сети высокоскоростного транспорта, приведены актуальные значения объемов существующей высокоскоростной сети в различных частях света и некоторых странах, приведена классификация пассажирских поездов России в зависимости от скорости движения, выделены особенности организации высокоскоростного сообщения в нашей стране, приведены планы по сооружению новых высокоскоростных линий в Китае, России и остальных странах, приведены статистические данные протяженности высокоскоростных железных дорог в странах мира и по отдельным частям света, приведена динамика строительства высокоскоростной сети в Китае, Японии и лидирующих по данному вопросу странах Европы. **Практическая значимость:** Данная статья может послужить основой для ознакомления с актуальным положением дел по части существующих сетей высокоскоростного железнодорожного транспорта, здесь выделены основные страны, чей опыт можно перенимать при создании сети высокоскоростных магистралей в России, опираясь на приведенные графические материалы, возможно оценить реальные перспективы по объему строительства высокоскоростной сети в современное время.

Ключевые слова: Высокоскоростные железные дороги, перспективы высокоскоростного транспорта, темпы строительства железных дорог, протяженность высокоскоростных железных дорог, лидеры высокоскоростного движения.

Введение

Революционно быстрое развитие сети высокоскоростных железных дорог, или магистралей (ВСМ), в первое и второе десятилетия XXI в. внесло существенное изменение в глобальную транспортную систему мира и изменило в сторону увеличения долю железных дорог в пассажирских перевозках, потеснив авиацию и авто-транспорт. Начав развитие с Японии в 60-х гг. [1], сеть быстро дополнилась Европейскими направлениями, однако в настоящее время решающую роль, несомненно, играет Китай [2, 3]. В то же время программа развития высокоскоростного движения в США, представленная еще Бараком Обамой, похоже, потерпела крах.

Статистику развития высокоскоростных линий, инфраструктуры и подвижного состава ведут несколько международных ассоциаций. Прежде всего это Международный союз железных дорог (МСЖД) [4], Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД), Организация международного сотрудничества и развития (ОЭСР), Международное энергетическое агентство (МЭА) и Ассоциация американских железных дорог (ААЖД). Если первые две организации сосредоточены на анализе технических планов и новых железнодорожных технологий, то ОЭСР представляет статистику и экономические показатели, связанные с высокоскоростным движением, а МЭА — все, связанное с энергопотреблением. ААЖД большей частью проводит анализ планов развития ВСМ в США и других странах Северной Америки, ведет статистику и разрабатывает нормативные документы совместно с Федеральной железнодорожной администрацией (ФЖА) США.

Категории железнодорожного транспорта в зависимости от скорости движения

МСЖД ежегодно обновляет статистические данные, в которых анализируются протяженность действующих и строящихся ВСМ в мире, а

также планы их развития в бюллетене High Speed Lines In The World [4].

МСЖД определяет транспорт, способный развить скорость свыше 160 км/ч, как скоростной, свыше 250 км/ч как высокоскоростной. В России в настоящее время принята несколько иная, «полуофициальная» классификация. Так как к пассажирским поездам, обращающимся со скоростями от 120 до 140 км/ч, требуется применять особые условия содержания колесных пар, такие поезда иногда классифицируются как «полускоростные», до 160 км/ч и от 160 до 200 км/ч как «скоростные», до 250 км/ч включительно — «высокоскоростные» [5].

В России и СНГ к данным категориям относится следующий подвижной состав [6]:

Пассажирские поезда на традиционном пути ($V_{\max} \leq 120$ км/ч): тепловозы ТЭП 60 (в СНГ), ТЭП 70, все электровозы ЧС, все электровозы серии ЭП, любые электро- и дизель-поезда (ЭТ2, ЭД4М, ДТ1 и аналоги).

Пассажирские поезда на традиционном пути с особыми условиями содержания колесных пар ($V_{\max} \leq 140$ км/ч): тепловозы ТЭП70БС, все электровозы ЧС2Т, ЧС6, ЧС200, ЧС7, ЧС4, ЧС4Т, ЧС8, ЭП2К, ЭП20.

Скоростные поезда на традиционном пути со скоростью движения до 160 км/час ($V_{\max} \leq 160$ км/ч): тепловозы ТЭП 70, электровозы серии ЧС6, ЧС200, ЧС7, ЭП2К, ЭП20, электропоезда ЭС1, ЭС2, ЭС2ГП, ЭГЭ2Тв.

Скоростные поезда на специально оборудованном пути в смешанном движении со скоростью движения до 200 км/час ($V_{\max} \leq 200$ км/ч): ЧС200, ЭП20.

Высокоскоростные поезда на специально подготовленном пути, смешанное движение ($V_{\max} \leq 250$ км/ч): ЭВС1, ЭВС2 (Velaro RUS) [7, 8].

Высокоскоростные поезда на выделенном пути ($V_{\max} > 250$ км/ч): в РФ и СНГ в настоящее время такие участки отсутствуют.

Статистика по сети высокоскоростных железных дорог

Последний High Speed Lines In The World датирован 2022 г. В соответствии с полученными из него данными большинство новых линий строится и проектируется в КНР.

Так, на конец 2021 г. всего в мире имелось 59 129 км высокоскоростных линий в эксплуатации, 22 562 км находятся в состоянии строительства, еще 19 781 км запланированы к постройке. На долгосрочную перспективу запланировано еще 33 005 км. Если эти планы будут реализованы, то через 10–15 лет общая эксплуатационная длина ВСМ составит в мире 131 803 км, т. е. более чем 3 раза обогнет земной шар.

Из ныне действующих участков большинство приходится на Азиатско-Тихоокеанский регион — 42 217 км и Европу — 11 819 км (рис. 1). В странах Ближнего востока уже име-

ется 1173 км линий ВСМ, но 3079 км строится и еще почти 4 тыс. км запланировано в рамках краткосрочной и долгосрочной перспектив. Вызывает удивление другое — на всю Северную Америку имеется всего 735 км действующих линий (в США) и строится 563. Не радует и Россия — имеется всего один действующий участок со смешанным движением и скоростями до 250 км/ч — Санкт-Петербург — Москва. В бюллетене МСЖД имеется еще одна ссылка — запланирована к постройке выделенная ВСМ Санкт-Петербург — Москва — Нижний Новгород со скоростью до 350 км/ч протяженностью 1080 км, однако уже сейчас ясно, что реализация проекта до 2024 г. маловероятна.

Из всего Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) наибольшими темпами ВСМ возводятся в 2 странах — Японии и Китае (рис. 2), причем Китай существенно обгоняет Японию.

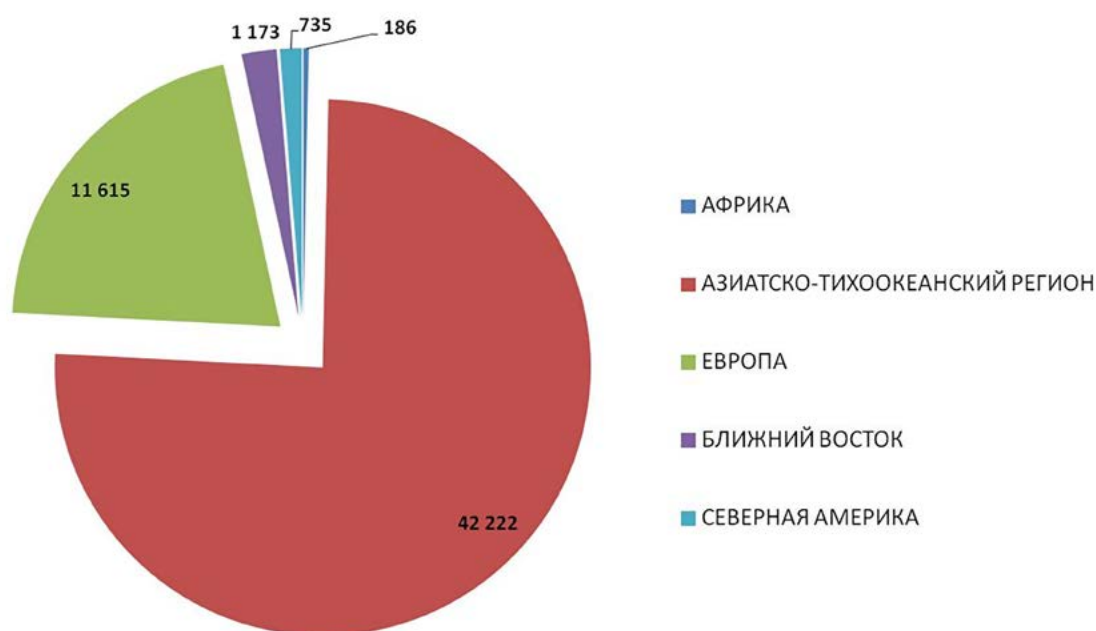


Рис. 1. Протяженность эксплуатируемых ВСМ в странах мира, км

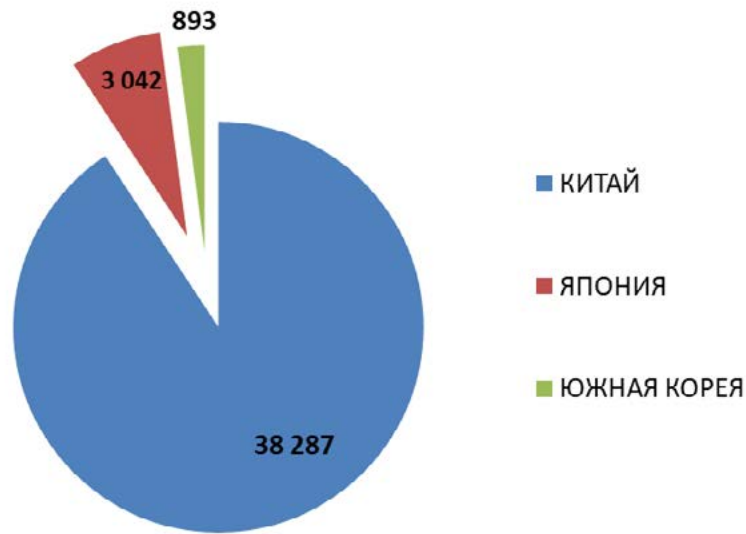


Рис. 2. Доля Китая в протяженности ВСМ Азиатско-Тихоокеанского региона на 2020–2021 гг., км

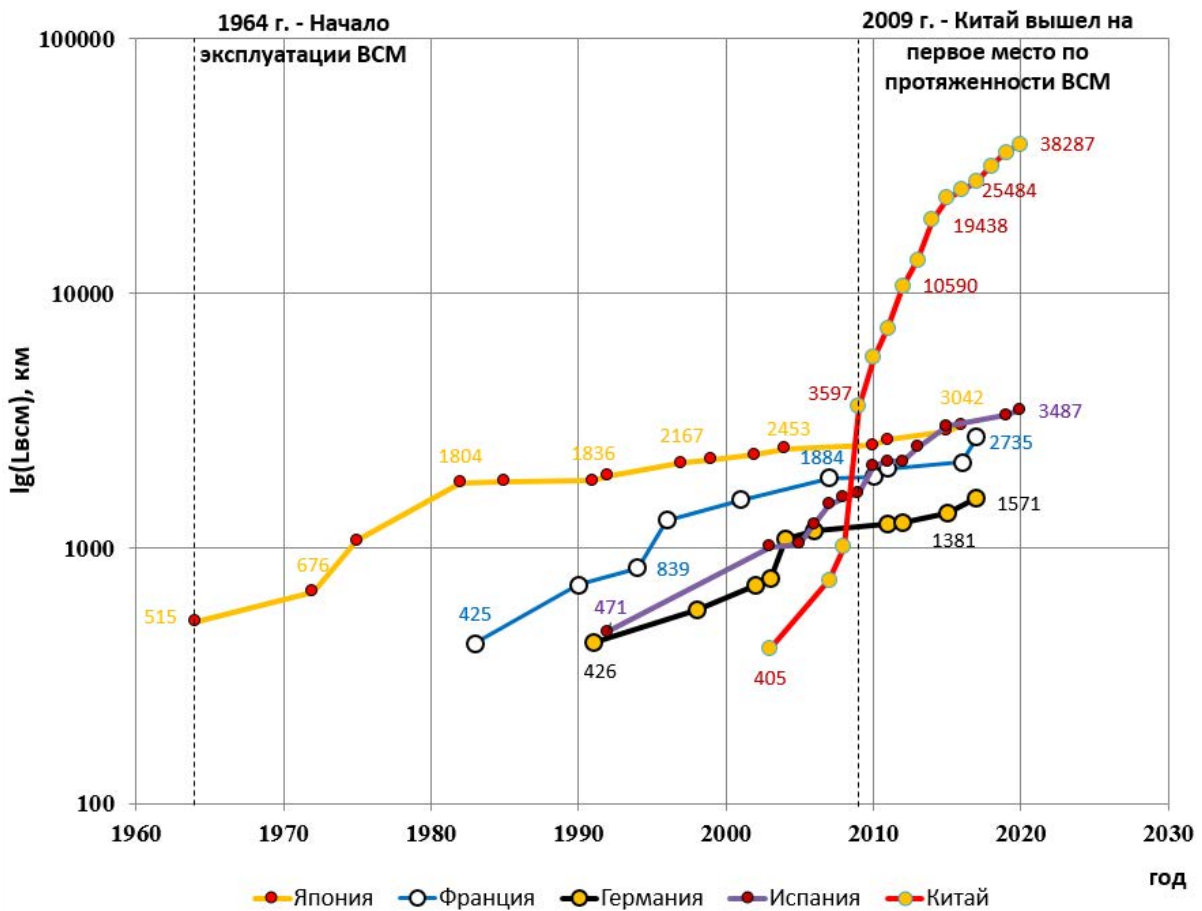


Рис. 3. Рост протяженности ВСМ в различных странах

Динамика развития мировой сети высокоскоростного транспорта

Если посмотреть график развития ВСМ в Китае (рис. 3), то видно, что развитие ВСМ началось значительно позже, чем в Японии и Европе, — с 2003 г. Для удобства представления вертикальная ось рис. 3 выражена в логарифмическом масштабе.

Уже в 2009 г. Китай вышел в лидеры по протяженности линий ВСМ, а с 2016 г. в стране строится в среднем по 3268 км в год (рис. 3).

В настоящее время протяженность ВСМ в КНР превышает протяженность всех таких линий в других странах, вместе взятых, и продолжает расти [9].

Технические параметры существующих линий

Относительно технических характеристик новых линий можно сказать, что рост максимальной скорости замедлился и составляет максимум для всех линий 350 км/ч, за исключением Японии, где запланировано строительство двух линий: Синагава — Нагойя и Нагойя — Осака на скорость 505 км/ч, которые предполагается ввести в эксплуатацию после 2027 г., однако на данных участках предполагается использование технологии магнитной левитации.

На большинстве выделенных высокоскоростных железных дорог Европы действует ограничение скорости 300 км/ч (Германия, Франция, Италия). Реконструированные участки для движения скоростных поездов по обычным линиям, как правило, допускают максимум 200–230 км/ч, поскольку эксплуатация в этом случае совмещается с поездами менее скоростных категорий. Скорость движения 350 км/ч в коммерческой эксплуатации на данный момент достигнута в Китае, а также в Испании на маршруте Мадрид — Барселона.

В России максимальная скорость ограничена на уровне 200–250 км/ч.

Стоит также отметить 31-километровую линию на магнитном подвесе в Шанхае, где поезда немецкой технологии Transrapid достигают в эксплуатации скорости 431 км/ч [10], хотя факт того, что данная линия остается единственной в Китае с 2004 г. говорит о том, что ближайшее будущее высокоскоростного транспорта пока остается за традиционными рельсовыми поездами.

Перспективы создания новых линий

На данный момент проще всего оценивать перспективы расширения высокоскоростной сети Китая, поскольку их темпы сооружения остаются стабильными на протяжении 14 лет, поэтому в ближайшее десятилетие можно ожидать появление еще порядка 25–30 тыс. км выделенных высокоскоростных магистралей. В Европе сооружение ведется более скачкообразно, поэтому для оценки их перспектив приведем данные об объемах строящихся линий (таблица) на основании информации из [11].

В России наиболее реальным для осуществления можно считать планы по строительству новой высокоскоростной линии Санкт-Петербург — Москва длиной 680 км, однако точные сроки реализации данного проекта неизвестны и оценить их крайне трудно ввиду сегодняшнего внешнеполитического и экономического положения.

Перспективы расширения высокоскоростной сети железных дорог

| Страна | Построено ВСМ, км | Строится/планируется, км |
|----------|-------------------|--------------------------|
| Китай | 38 287 | > 10 000 |
| Испания | 3487 | 1293 |
| Япония | 3042 | 402 |
| Франция | 2735 | — |
| Германия | 1571 | 147 |
| Италия | 921 | — |

Заключение

Таким образом, в настоящее время безоговорочным лидером в области создания инфраструктуры для высокоскоростного транспорта является Китай, поскольку объемы сети данного вида транспорта растут непрерывно и во много раз превышают темпы всех остальных стран вместе взятых. Страны Европы и Япония также могут похвастаться наличием собственной инфраструктуры и в то же время имеют свои наработки как в техническом, так и коммерческом плане. В России же, как и в США, на данный момент нет выделенных линий для высокоскоростного транспорта и наилучшей перспективой для развития в данной области является строительство первой ВСМ Санкт-Петербург — Москва, что и должно стать основной задачей на ближайшее десятилетие.

Библиографический список

1. Кантор И. И. *Высокоскоростные железнодорожные магистрали: трасса, подвижной состав, магнитный подвес: учебное пособие для вузов ж.-д. трансп.* / И. И. Кантор. — М.: Маршрут, 2004. — 51 с.
2. Папазян А. *Все о высокоскоростных поездах TGV* / А. Папазян. — М.: УМЦ ЖДТ, 2010.
3. Киселев И. П. *Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс* / И. П. Киселев. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. — Т. 1–2. — 371 с.
4. Бюллетень МСЖД «High Speed Lines In The World». — UIC.org. — 2021. — 14 с.
5. *Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации.* — 2022.
6. Абрамов Е. Р. *Электроподвижной состав Отечественных железных дорог* / Е. Р. Абрамов (ред.). — 2015. — 561 с.
7. Ширяев А. В. *Высокоскоростные поезда «Сапсан» В1 и В2: учебное пособие.* А. В. Ширяев. — М.: ОАО «Российские железные дороги», 2013. — 522 с.
8. Гапанович В. А. *Технические особенности высокоскоростного поезда Velaro RUS* / В. А. Гапанович // *Техника железных дорог.* — 2009. — № 5. — С. 8–20.
9. *Опыт строительства и эксплуатации ВСМ в Китае* // *Железные дороги мира.* — 2020. — № 8. — С. 36–46.
10. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. *Магнитолеви- тационная транспортная технология* / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев; под ред. В. А. Гапановича. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 476 с.
11. АО «Скоростные магистрали». — URL: www.hsrail.ru.

Дата поступления: 01.05.2022

Решение о публикации: 29.05.2022

Контактная информация:

ГРИНЕМАЙЕР Анна Андреевна —
anya5378@gmail.com

АНИКИН Илья Борисович — anikinilya@mail.ru

ПАРФЕНЕНКО Роман Евгеньевич — студент;
roman.ski.rock.1999@gmail.com

ИЗВАРИН Михаил Юльевич — канд. техн. наук, доц.;

misha3568723@yandex.ru

Development Perspectives of High-Speed Railway Network in the World in the Next Decade

A. A. Greenmayer, I. B. Anikin, R. E. Parfenenko, M. Yu. Izvarin

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

For citation: Greenmayer A. A., Anikin I. B., Parfenenko R. E., Izvarin M. Yu. Development Perspectives of High-Speed Railway Network in the World in Next Decade // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 259–265. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-259-265

Summary

Purpose: To find main conceptions of the development of high-speed lines in the world, to outline leading countries in the sphere of high-speed railway network construction, to track high-speed railway network construction dynamics, to compare the shares of high-speed railways by individual continents and countries, to define Russia's place in the sphere of high-speed transport, to outline individual country and continent perspectives for new high-speed line construction and new technology application during construction of the lines in the next decade. **Methods:** Comparison of construction scales for the outlined high-speed lines by individual countries, graphical analysis of high-speed network growth dynamics in five the most developed by this matter countries. **Results:** Leading countries in the sphere of high-speed transport network construction are distinguished, relevant values for volumes of existing high-speed network in the world different parts and some countries are presented, a classification of Russia passenger trains depending on the motion speed is given, specificities of organization of high-speed communication in our country are outlined, plans for new high-speed line construction in China, Russia and other countries are expounded, statistical data on high-speed railway spread in the world countries and by individual continents are presented, high-speed network construction dynamics in China, Japan and leading by this matter Europe countries is shown. **Practical significance:** The given article can serve as a basis for an acquaintance with a relevant status on the matter of existing high-speed railway transport networks, major countries are outlined herein which experience can be taken while creation of high-speed lines in Russia and being based on demonstrated graphical materials, it's eventual to evaluate real perspectives by the volume of construction of high-speed network nowadays.

Keywords: High-speed railways, high-speed transport perspectives, railway construction paces, high-speed railway spread, high-speed motion leaders.

References

1. Kantor I. I. *Vysokoskorostnye zhelezodorozhnye magistrali: trassa, podvizhnyy sostav, magnitnyy podves* [High-speed railway lines: route, rolling stock, magnetic suspension]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 51 p. (in Russian)
2. Andre Papazyan. *Vse o vysokoskorostnykh poezdakh TGV* [All about TGV high speed trains]. Moscow, UMTs ZhDT Publ., 2010. (In Russian)
3. Kiselev I. P. *Vysokoskorostnoy zhelezodorozhnyy transport. Obshchiy kurs* [High speed rail transport. General course]. *FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zhelezodorozhnom transporte»* [FGBOU "Training and methodological center for education in railway transport"]. Moscow, 2014. 371 p. (In Russian)
4. *Byulleten' MSZhD «High Speed Lines In The World»* [Bulletin UIC "High Speed Lines In The World"]. 2021. 14 p. (In Russian)
5. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii* [Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation]. 2022. (In Russian)
6. Abramov E. R. *Elektropodvizhnyy sostav Otechestvennykh zheleznykh dorog* [Electric rolling stock of Domestic Railways]. 2015. 561 p. (In Russian)
7. Shiryayev A. V. *Vysokoskorostnye poezda «Sapsan» V1 i V2* [High-speed trains "Sapsan" V1 and V2]. Moscow: «Rossiyskie zheleznye dorogi» Publ., 2013. 522 p. (In Russian)
8. Gapanovich V. A. *Tekhnicheskie osobennosti vysokoskorostnogo poezda Velaro RUS* [Technical features of the Velaro RUS high-speed train]. *Tekhnika zhedeznykh dorog* [Railway Engineering]. 2009, I. 5, pp. 8-20. (In Russian)
9. *Opyt stroitel'stva i ekspluatatsii VSM v Kitae* [Experience in the construction and operation of high-speed lines in China]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. 2020, I. 8, pp. 36-46. (In Russian)
10. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magnetic levitation transport technology]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2014. 476 p. (In Russian)
11. AO «Skorostnye magistrali». Available at: www.hsrail.ru. (In Russian)

Received: May 01, 2022

Accepted: May 29, 2022

Author's information:

Anna A. GREENMAYER — anya5378@gmail.com
Ilya B. ANIKIN — anikinilya@mail.ru
Roman E. PARFENENKO — Student;
roman.ski.rock.1999@gmail.com
Mikhail Yu. IZVARIN — PhD in Engineering;
misha3568723@yandex.ru

УДК 007.52

Комплексный алгоритм процессов контроля и управления телекоммуникационной сетью Carrier Ethernet с применением механизмов ОАМ

А. К. Канаев, Э. В. Логин, И. С. Гришанов

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

Для цитирования: Канаев А. К., Логин Э. В., Гришанов И. С. Комплексный алгоритм процессов контроля и управления телекоммуникационной сетью Carrier Ethernet с применением механизмов ОАМ // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 266–275. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-266-275

Аннотация

Цель: Анализ, классификация множества механизмов в методологии ОАМ (Operations, administration and management), разработка алгоритмической модели предложенной классификации с учетом особенностей управления телекоммуникационной сетью, функционирующей по технологии Carrier Ethernet, что позволит усовершенствовать программно-технологический комплекс подсистем и повысить оперативность управления телекоммуникационной сетью. **Методы:** Положения теории систем и управления, методы имитационного моделирования и построения алгоритмических структур. **Результаты:** Получена классификация множества механизмов ОАМ, что позволит адекватно целям и задачам управления телекоммуникационной сетью включать в цикл контроля и управления сетевыми устройствами телекоммуникационных сетей на основе технологии Carrier Ethernet уникальные процессы и механизмы методологии ОАМ; разработан комплексный алгоритм процессов ОАМ для управления сетевыми устройствами Carrier Ethernet, что позволит проводить имитационное моделирование и оценку функционирования отдельных подпроцессов и всего алгоритма. **Практическая значимость:** Расширение перечня процессов, реализуемых в ОАМ телекоммуникационных сетях на основе технологии Carrier Ethernet, позволит достигать требуемый уровень оперативности управления, а также проводить ряд исследований, в частности имитационное моделирование систем управления с включением в модель объекта управления, функционирующего в соответствии со стандартизированными механизмами ОАМ. Возможность получения результатов в среде имитационного моделирования AnyLogic позволит использовать их как самостоятельную программу удаленной настройки сетевых устройств на технологическом уровне систем управления телекоммуникационными сетями.

Ключевые слова: Ethernet, Carrier Ethernet, Ethernet операторского класса, ОАМ, механизмы и стандарты ОАМ.

Введение

Технология, обеспечивающая передачу данных между устройствами компьютерных и промышленных сетей, — Ethernet — стала одной из самых распространенных технологий локальных вычислительных сетей в середине 90-х гг., вытеснив устаревшие технологии Token Ring, Arcnet и др. Принцип работы этой технологии следующий: все данные, передаваемые одним узлом, одновременно принимаются и всеми остальными узлами. Благодаря использованию коммутаторов при подключении, кадры, отправленные одним узлом, доходят лишь до адресата.

Однако использование Ethernet на сетях операторского класса невозможно, так как решения на базе классических Ethernet сервисов имеют ряд недостатков [1]:

1) недостаточная реализация или же полное отсутствие QoS (качество обслуживания — QoS — способность сети обеспечить необходимый сервис заданному трафику в определенных технологических рамках);

2) невозможность использовать на опорных сетях операторского класса методы восстановления, имеющие большое время сходимости;

3) недостаточная реализация или же полное отсутствие управления Ethernet трафиком.

Перед участниками Metro Ethernet Forum (MEF) [1, 2], консорциума, объединяющего более 210 операторов связи и технологических компаний из 43 стран, встала задача устранения перечисленных выше недостатков, сохранив экономичность и простоту классического Ethernet. Технология Ethernet операторского класса получила название Carrier Ethernet (CE) и представила собой набор необходимых стандартизированных сервисов операторского класса.

В отличие от обычного Ethernet Local Area Network (LAN), в CE регламентированы пять основных атрибутов:

1. Масштабируемость. Все виды услуг должны иметь возможность масштабирования по скорости, а сами сети связи должны иметь возможность увеличения узлов и входящих в него устройств. При этом решения должны покрывать сети разного уровня.

2. Стандартизированные сервисы (способы предоставления услуг): эмулируемое виртуальное выделенное соединение точка — точка через сеть связи CE (E-Line); эмулируемое пользовательское LAN соединение через сеть связи CE (E-LAN); эмулирование передачи мультикастингового трафика (E-Tree).

3. Управление сервисами предусматривает на уровне управления сетью (NMS) реализацию алгоритмов на основе стандартизированных механизмов, мониторинг, диагностику состояния сети связи, эксплуатацию, администрирование и обслуживание (организационный уровень управления) применительно к любой системе управления сетью связи CE.

4. Надежность операторского класса определена процессами мониторинга, обнаружения, диагностики и исправления ошибок без участия ЛПР, соответствие требованиям качества и доступности и обеспечение минимального времени восстановления сервиса.

5. Высокий уровень QoS по части повышения качества предоставления сервисов, упрощенный сценарий управления сетью и значительное снижение капитальных и операционных затрат.

Концепция Carrier Ethernet, обеспечивающая надежность, масштабируемость, заданное качество обслуживания и легкую управляемость, необходима для качественного предоставления таких сервисов, как доступ в Интернет, передача данных, Internet Protocol Television, Voice over IP и организация транспортной архитектуры для сетей беспроводного доступа.

Механизмы ОАМ в Carrier Ethernet

Управление сервисами было недоступно в классической технологии Ethernet. Сети синхронной цифровой иерархии (Synchronous Digital Hierarchy — SONET/SDH) отличались передовой реализацией процессов, связанных с эксплуатацией, администрированием и обслуживанием любой системы управления (ОАМ) [3–5].

Функции централизованного управления сетью, применения стандартизированных алгоритмов и своевременного предоставления сервисов были перенесены с SDH на Carrier Ethernet.

Для решения задач ОАМ применяются четыре функциональные группы механизмов, комплексная реализация которых в перспективной системе управления телекоммуникационными сетями (СУ ТКС) [6] позволит достигать требуемые показатели надежности и оперативности, эффективно управлять сетевыми процессами и взаимодействием нескольких сетей:

- Fault Management (управление неисправностями) — обнаружение, диагностика, локализация неисправностей и оповещение о проблемах;
- Performance Monitoring, Delay and loss measurements — проактивное определение нарушений параметров работы в нескольких взаимосвязанных сетях;
- Performance Management — управление производительностью;
- Configuration Management — управление конфигурациями.

В данной работе рассматриваются механизмы ОАМ, необходимые для управления неисправностями и мониторинга производительности на уровне Ethernet. Они представлены в таблице.

Обеспечение требуемой устойчивости функционирования ТКС невозможно без решения ключевых задач управления неисправностями и контроля состояний ТКС, что позволит соответствовать требуемым показателям оперативности управления сетями связи. Для решения

таких задач в СУ ТКС был разработан уникальный алгоритм контроля и управления состоянием ТКС с включением в него процессов, агрегирующих в себе ограниченный набор механизмов ОАМ [7–11]. В данной работе предлагается расширить функционал этих процессов за счет добавления механизмов ОАМ. В частности, дополняющими механизмами являются запросы на типовые параметры сетевых устройств Carrier Ethernet и параметры передаваемых пакетов внутри администрирующего домена (MD — maintenance domain), механизмы, инициирующие экспериментальные и тестовые запросы с последующей диагностикой устройств (MEP) в рамках MD, а также серия механизмов для обеспечения контроля и диагностики качества работы.

Описание процессов ОАМ в комплексном алгоритме контроля и управления состоянием ТКС на основе технологии CE

Выбор режима работы ОАМ является главным отличием данного алгоритма от прошлой его версии. В соответствии с двумя возможными режимами работы формируется один из двух типов запроса. Экспериментальный режим ОАМ (Exp) предусматривает реализацию данного алгоритма в формате сбора выборок по каждому механизму, которые, в свою очередь, имеют параметры случайных распределений, установленных по результатам прошлого запуска экспериментального режима ОАМ. В блоке 7 устанавливается источник запроса (СУ или MD). В случае запроса СУ производится реализация процесса периодического контроля состояния MD (группа блоков с 8 по 17). Запросы от MD [6], как правило, сигнализируют некоторое аварийное состояние — сигнал индикации аварии (Alarm Indication Signal — AIS) (блок 18), после чего ряд механизмов (блоки с 19 по 25) настраивают соответствующий MD для непрерывной передачи данных, извещая соседние MD посредством рассылки

Механизмы ОАМ в Carrier Ethernet

| Категория | Механизм | Сокращение | Описание | Стандарты |
|--|---|--|--|----------------------------------|
| Функции ОАМ по устранению неисправностей [Fault Management] | Проверка целостности сети Ethernet [Continuity Check function] | ETH-CC | Функция осуществляет проверку целостности сети Ethernet (ETH-CC) и используется для упреждающих действий ОАМ: для обнаружения потери соединения (LOC) между любой парой МЕР внутри МЕГ | IEEE 802.1ag MEF 38 MEF 31 |
| | Проверка Ethernet по шлейфу [Loopback function] | ETH-LB | Используется для проверки наличия соединения МЕР с МIP или равноправной(ыми) МЕР (одноадресная/многоадресная) | IEEE 802.1ag Y.1731 |
| | Трассировка линий Ethernet [Link Trace function] | ETH-LT | Функция трассировки линий Ethernet (ETH-LT) — это выполняемая по запросу функция ОАМ, которая может использоваться для определения соседних взаимосвязей между МЕР/МЕР (MIP), локализации неисправностей | IEEE 802.1ag |
| | Сигнал индикации аварии Ethernet [Alarm Indication Signal function] | ETH-AIS | Отключает сигнал аварии, передаваемый после обнаружения неисправности на (под)уровне сервера | Y.1731 MEF 38 MEF 31 |
| | Индикация ошибок на удаленном конце Ethernet [Remote Defect Indication function] | ETH-RDI | Данная функция может использоваться точкой МЕР, для того чтобы сообщить равноправным ей точкам МЕР о состоянии неисправности | IEEE 802.1ag MEF 31 |
| | Блокированный сигнал Ethernet [Lock signal function] | ETH-LCK | Используется для сообщения об административном блокировании точки МЕР (под)уровня сервера и последующего прерывания передачи трафика в направлении МЕР, которая ждет этот трафик | MEF 38 |
| | Испытательный сигнал Ethernet [Test function] | ETH-Test | Используется для выполнения одностороннего диагностического тестирования по запросу на работающей или неисправной сети. Процедура тестирования содержит проверку ширины полосы пропускания, измерение количества потерянных кадров, нахождения битовых ошибок и т. д. | MEF 38 |
| | Автоматическое защитное переключение Ethernet [Automatic Protection Switching function] | ETH-APS | Используется для управления операциями защитного переключения в целях повышения надежности | Y.1731 |
| | Экспериментальные функции ОАМ для Ethernet [Experimental OAM function] | ETH-EXP | Используются для экспериментальной работы ОАМ, которая может временно осуществляться в пределах административного домена | Y.1731 |
| | Функции ОАМ, определяемые поставщиком [Vendor-Specific OAM function] | ETH-VSP | Используются для обеспечения осуществления функциональных возможностей ОАМ, определяемых поставщиком, которые могут быть реализованы поставщиком на всей линейке выпускаемого им оборудования | Y.1731 |
| | Функция ошибка сигнала клиента Ethernet [Client Signal Fail function] | ETH-CSF | Используется МЕР для распространения сообщений ETH-CSF равноправным МЕР об обнаружении неисправности или ошибки сигнала клиента Ethernet, когда сам клиент не поддерживает необходимые механизмы обнаружения неисправности или ошибки, или распространения сообщений о ней | 802.1ag |
| | Уведомление о полосе пропускания Ethernet [Bandwidth Notification function] | ETH-BN | Кадры с информацией ETH-BN передаются на клиентском уровне МЕГ из МЕР сервера при обнаружении условий ухудшения полосы пропускания | Y.1731 802.1ag |
| Функция Ethernet ожидаемая ошибка [Expected Defect function] | ETH-ED | Используется точкой МЕР для подачи своим равноправным МЕР сигнала о том, что ожидается прерывание передачи кадров (без прерывания кадров данных), и, соответственно, последующие сообщения о потере соединения, поступающие в равноправные МЕР, следует игнорировать. Кадры с информацией ETH-ED содержат идентификатор МЕР и ожидаемую продолжительность прерывания | 802.2 | |

| Категория | Механизм | Сокращение | Описание | Стандарты |
|---|--|------------|---|-------------------|
| Функции ОАМ для контроля качества работы [Performance Monitoring] | Измерение числа потерянных кадров [Loss Measurement function] | ETH-LM | Используется для сбора значений счетчика входящих и выходящих служебных кадров, когда счетчики подсчитывают число кадров данных, переданных и принятых между парой точек МЕР | Y.1731 |
| | Измерение времени задержки кадра [Delay Measurement function] | ETH-DM | Функция измерения задержки кадра (ETH-DM) может использоваться при выполнении функций ОАМ по запросу или упреждающих функций ОАМ для измерения и изменения задержки кадра. Измерения и изменения задержки кадра выполняются во время сеанса упреждающего измерения и/или интервала диагностики | Y.1731 |
| | Измерение пропускной способности | | Измерение пропускной способности при помощи передачи кадров с возрастающей скоростью (вплоть до теоретического максимума), отображения процента принятых кадров и определения скорости, на которой начинается отбрасывание кадров | Y.1731 802.3ah |
| | Измерение синтетических потерь [Synthetic Loss Measurement function] | ETH-SLM | Измерение синтетических потерь — это механизм измерения потери кадров с использованием синтетических кадров, а не трафика данных. Соответственно, рассчитывается количество отправленных и принятых и количество потерянных синтетических кадров. Это можно рассматривать как статистическую выборку и использовать для аппроксимации коэффициента потери кадров для трафика данных. Функция ETH-SLM собирает счетчики, чтобы вести счет переданных и полученных синтетических кадров между несколькими МЕР | Y.1731 |

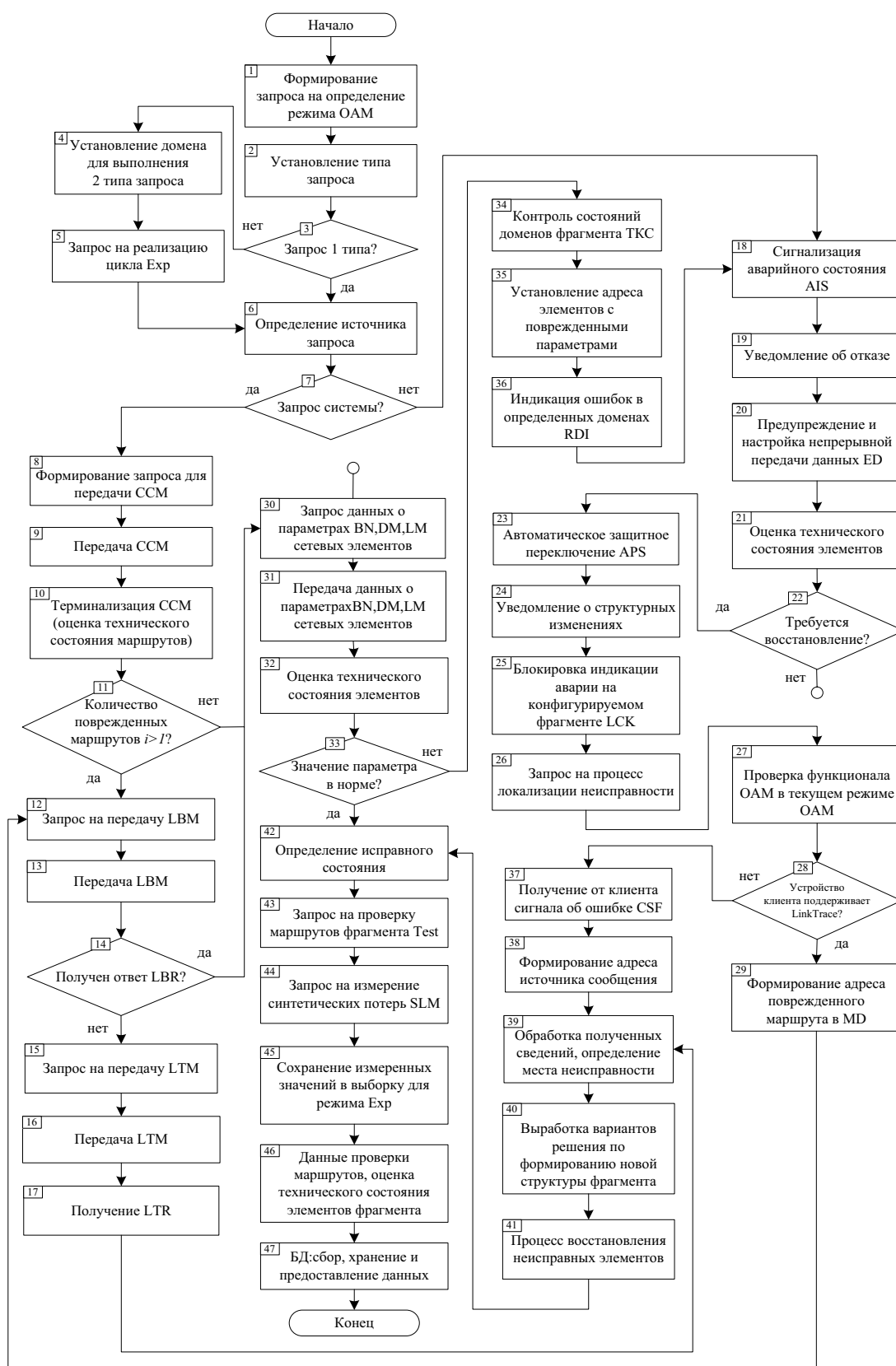
Примечание. MD (maintenance domain) — администрирующий домен; МЕР/МІР — maintenance association end point/maintenance domain intermediate pointоконечная/промежуточная точка группы объектов обслуживания (домена); МЕР (maintenance entity group) — группа объектов обслуживания.

предупреждений (ED) о том, что некоторый неисправный МІР/МЕР отправляет поврежденные кадры, происходит защитное переключение (APS — Automatic Protection Switching), и после установления MD и серии MD, подверженных реконфигурации, блокируют индикацию аварии на нем/них. Последнее необходимо для того, чтобы не перегрузить трафик сообщениями об авариях в связанных MD. Далее с целью восстановления работы поврежденных устройств необходимо локализовать место повреждения. Для этого может быть два сценария в зависимости от программного функционала устройств: в случае если устройства MD не содержат необходимый функционал ОАМ для локализации неисправности (механизм проверки функций ОАМ по комплектации установленных программ произво-

дителя-поставщика (VSP)), устройство самостоятельно сигнализирует об ошибке сигнала клиента с помощью извещения CSF. В кадр этого сообщения встроен адрес отправителя МІР/МЕР.

Далее следуют процессы изменения структуры фрагмента ТКС и восстановления неисправного/ных устройств ТКС. После всего цикла управления текущий фрагмент проходит тестовую проверку связности Test и измерение синтетических потерь (Synthetic Loss Message — SLM), результаты которой сохраняются в режим работы ОАМ — Exp.

Перечисленные сценарии алгоритма одинаково включают в себя подпроцесс измерения параметров сетевых элементов. В данный подпроцесс можно включить как параметры, характеризующие передачу данных в рамках встроенных



Комплексный алгоритм процессов контроля и управления состоянием сетевых устройств в СУ ТКС

механизмов ОАМ (например, механизм уведомления о полосе пропускания между MD сервера и MD клиента (BN), измерения задержек (DM), измерения числа потерянных кадров (LM)), так и собственные параметры сетевых устройств ТКС. Набор измеряемых параметров настраивается программным способом, собирается, хранится и извлекается в глобальной базе данных СУ ТКС, где также может быть адаптирован по параметрам для режима Exр.

Алгоритм, представленный на рисунке, имеет условные блоки начала и конца, поскольку предусматривают непрерывное функционирование ТКС и непрерывный процесс управления ее процессами. Модернизация комплекса механизмов ОАМ, участвующих в процессах контроля и управления состоянием ТКС, позволит увеличить оперативность управления и восстановления работоспособного состояния за счет своевременной диагностики устройств, извещения об изменении параметров устройств, изменения маршрута или конфигурации фрагмента ТКС, а также возможности экспериментального режима работы процессов для сбора эксплуатационных данных и формирования функций распределения на их основе.

Особенность алгоритма заключается в независимости отдельных его сценариев друг от друга, обеспечивая тем самым гибкость управления и более высокую степень адаптации СУ к изменениям состояния как отдельных элементов ТКС, так и всей сети связи. Все это позволит перспективной СУ обеспечивать требуемые значения устойчивости функционирования ТКС.

Заключение

В работе предложена расширенная классификация механизмов ОАМ для технологии Carrier Ethernet, что позволяет актуализировать ранее полученные результаты в области функционирования ТКС и моделирования отдельных процессов контроля и управления на основе механиз-

мов ОАМ. Полученная алгоритмическая модель позволяет концептуально связать механизмы и процессы, реализующие отдельные задачи управления, и алгоритмы контроля и управления состоянием ТКС. Комплексный вид алгоритма позволяет моделировать входящие в него процессы функционирования ТКС как в непрерывном режиме, так и с выделением отдельных подпроцессов для детализации полученных результатов.

Экспериментальный режим работы механизмов ОАМ в алгоритмической модели функционирования ОАМ в ТКС реализован как отдельный контур механизмов, позволяющий параллельно и непрерывно собирать статистическую информацию по каждому подпроцессу, соответствуя требованиям по адекватности исходных данных моделирования реальному объекту управления. При этом собранная информация после реализации одной итерации контура попадает в подсистему хранения и обработки информации, где вносит актуальные обновления для подсистемы прогнозирования и оценки текущего и исторического состояния ТКС. Такой уникальный режим функционирования ОАМ позволит получать актуализированные результаты по реализации процессов управления ТКС.

Библиографический список

1. Компания Телеком Нетворкс. World Wide Packets Решения Carrier Ethernet. — 2008. — С. 4–10.
2. Идлис А. CISCO. Эволюция транспортной инфраструктуры оператора связи: Cisco Carrier Packet Transport / А. Идлис. — Презентация Cisco Expo, 2011.
3. Патенко В. CISCO. Обзор Ethernet OAM / В. Патенко. — Презентация Cisco Expo, 2008.
4. Международный союз электросвязи. МСЭ-Т G.8013/Y.1731. Функции и механизмы эксплуатации, управления и технического обслуживания (OAM) для сетей на базе Ethernet — 2015. — С. 1–2. С 7. С. 10–36.
5. Галкин А. М. Технология Ethernet (к 35-летию изобретения) / А. М. Галкин, Д. М. Сепиашвили, Г. Г. Яновский // Вестник связи. — 2008. — № 8. — С. 49–57.

6. Логин Э. В. Перспективная телекоммуникационная сеть следующего поколения на основе технологии Carrier Ethernet / Э. В. Логин, А. К. Канаев // Бюллетень результатов научных исследований. — 2014. — Вып. 4(13). — С. 69–76.

7. Логин Э. В. Технология Carrier Ethernet для построения транспортных сетей / Э. В. Логин, А. К. Канаев // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей IV Международной конференции СПбГУТ, 3–4 марта 2015 г. — Т. 2. — С. 1065–1069. — URL: www.sut.ru/doci/nauka/4.apino.2015.sut.2.pdf.

8. Логин Э. В. Анализ функций ОАМ в технологии Carrier Ethernet / Э. В. Логин, А. К. Канаев // Труды 71-й Международной научно-технической конференции, посв. Дню радио. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. — С. 241–242.

9. Логин Э. В. Формирование алгоритма управления отказами в телекоммуникационной сети связи, построенной по технологии Carrier Ethernet / Э. В. Логин, А. К. Канаев // Сборник материалов секции «Информационные технологии на транспорте» XV Международной конференции «Региональная информатика-2016». — СПб.: ПГУПС, 2016 — С. 95–100.

10. Логин Э. В. Механизмы оценки состояния устройств в сетях с технологией Carrier Ethernet /

Э. В. Логин, А. К. Канаев // Труды 72-й межвузовской научно-технической конференция СПбНТОРЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио: сборник трудов. Секция: «Телекоммуникации на железнодорожном транспорте» (труды конференции 27–29 апреля 2017 г.). — СПб., 2017. — С. 240–241.

11. Логин Э. В. Сценарий управления неисправностями в сетях с технологией Carrier Ethernet с помощью механизмов ОАМ / Э. В. Логин, А. К. Канаев // Труды 72-й межвузовской научно-технической конференции СПбНТОРЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио: сборник трудов. Секция: «Телекоммуникации на железнодорожном транспорте» (труды конференции 27–29 апреля 2017 г.). — СПб., 2017. — С. 243–244.

Дата поступления: 09.05.2022

Решение о публикации: 24.05.2022

Контактная информация:

КАНАЕВ Андрей Константинович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрическая связь»;

kanaev@pgups.ru

ЛОГИН Элина Валерьевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрическая связь»; elinabeneta@yandex.ru

ГРИШАНОВ Илья Сергеевич — студент;

ilia911119@gmail.com

Complex Algorithm for Control and Management Processes of Carrier Ethernet Telecommunication Network Using OAM Mechanisms

A. K. Kanaev, E. V. Login, I. S. Grishanov

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

For citation: Kanaev A. K., Login E. V., Grishanov I. S. Complex Algorithm for Control and Management Processes of Carrier Ethernet Telecommunication Network Using OAM Mechanisms // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 266–275. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-266-275

Summary

Purpose: Analysis, classification of a variety of mechanisms in OAM (Operations, Administration and Management) methodology, development of an algorithmic model of the proposed classification taking into account the features of managing telecommunication network, which functions with Carrier Ethernet technology, that will allow to improve software-technology complex of subsystems and axrise the efficiency of telecommunication network management. **Methods:** System/control theory provisions, simulation modeling and algorithmic structure design methods. **Results:** Classification of a variety of OAM mechanisms has been obtained which will enable adequately upon goals and tasks of telecommunication network management the inclusion of unique processes and mechanisms of OAM methodology into the control/management of devices of telecommunication network, based on Carrier Ethernet technology; comprehensive algorithm of OAM processes for managing Carrier Ethernet network devices has been developed that will allow to hold simulation modeling and evaluation of individual subprocesses and entire algorithm functioning. **Practical significance:** Expansion of the list of processes implemented in OAM telecommunication networks, that're based on Carrier Ethernet technology, will allow achieving the required level of management efficiency as well as conducting a number of studies, in particular, simulation modeling of control systems with inclusion into a model of being controlled object, functioning in accordance with standardized OAM mechanisms. Possibility to obtain results in AnyLogic simulation modeling environment will allow to use them as an independent program for remote setting at technological level, accordingly telecommunication network management systems, of network devices.

Keywords: Ethernet, Carrier Ethernet, carrier-class Ethernet, OAM, OAM mechanisms and standards.

References

1. *Kompaniya Telekom Networks. World Wide Packets Resheniya Carrier Ethernet* [Telecom Networks Company. World Wide Packets Solutions Carrier Ethernet]. 2008, pp. 4-10. (In Russian)
2. CISCO. *Evolyutsiya transportnoy infrastruktury operatora svyazi: Cisco Carrier Packet Transport/Andrey Idlis. – Prezentatsiya Cisco Expo* [CISCO. The evolution of the transport infrastructure of a telecom operator: Cisco Carrier Packet Transport]. 2011. (In Russian)
3. CISCO. *Obzor Ethernet OAM/Patenko Vladislav. – Prezentatsiya Cisco Expo* [CISCO. Overview of Ethernet OAM]. 2008. (In Russian)
4. *Mezhdunarodnyy soyuz elektrosvyazi. MSE-T G.8013/Y.1731. Funktsii i mekhanizmy ekspluatatsii, upravleniya i tekhnicheskogo obsluzhivaniya (OAM) dlya setey na baze Ethernet* [International Telecommunication Union. ITU-T G.8013/Y.1731. Functions and mechanisms of operation, management and maintenance (OAM) for networks based on Ethernet]. 2015, pp. 10-36. (In Russian)

5. Galkin A. M., Sepiashvshi D. M., Yanovskiy G. G. Tekhnologiya Ethernet (k 35- letiyu izobreteniya) [Ethernet technology (to the 35th anniversary of the invention)]. *Vestnik svyazi* [Messenger of communication]. 2008, I. 8, pp. 49-57. (In Russian)
6. Login E. V., Kanaev A. K. Perspektivnaya telekommunikatsionnaya set' sleduyushchego pokoleniya na osnove tekhnologii Carrier Ethernet [Future-proof next generation telecommunications network based on Carrier Ethernet technology]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. I. 4 (13), 2014, pp. 69-76. (In Russian)
7. Login E. V., Kanaev A. K. *Tekhnologiya Carrier Ethernet dlya postroeniya transportnykh setey. Sbornik nauchnykh statey IV mezhdunarodnoy konferentsii SPbGUT «Aktual'nye problemy infotelekomunikatsiy v nauke i obrazovanii» 3-4 marta 2015* [Ethernet technology for building transport networks. Collection of scientific articles IV international conference SPbSUT "Actual problems of infotelecommunications in science and education" March 3-4, 2015]. 2015, vol. 2, pp. 1065-1069. Available at: www.sut.ru/doci/nauka/4.apino.2015.sut.2.pdf. (In Russian)
8. Login E. V., Kanaev A. K. Analiz funktsiy OAM v tekhnologii Carrier Ethernet [Analysis of OAM functions in Carrier Ethernet technology]. *Trudy 71-oy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posv. Dnyu radio* [Proceedings of the 71st International Scientific and Technical Conference, dedicated. Radio Day]. St. Petersburg: SPbGETU «LETI» Publ., 2016, pp. 241-242. (In Russian)
9. Login E. V., Kanaev A. K. Formirovanie algoritma upravleniya otkazami v telekommunikatsionnoy seti svyazi, postroennoy po tekhnologii Carrier Ethernet [Formation of a failure management algorithm in a telecommunications network built using Carrier Ethernet technology]. *Sbornik materialov seksii «Informatsionnye tekhnologii na transporte» XV mezhdunarodnoy konferentsii «Regional'naya informatika-2016»* [Collection of materials of the section "Information Technologies in Transport" of the XV International Conference "Regional Informatics-2016"]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2016, pp. 95-100. (In Russian)
10. Login E. V., Kanaev A. K. Mekhanizmy otsenki sostoyaniya ustroystv v setyakh s tekhnologiyey Carrier Ethernet [Mechanisms for assessing the state of devices in networks with Carrier Ethernet technology]. *Trudy 72-oy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsiya SPbNTORES im. A.S. Popova, posvyashchennoy Dnyu radio: sbornik trudov Sektsiya: «Telekommunikatsii na zheleznodorozhnom transporte», (trudy konferentsii 27-29.04.2017)* [Proceedings of the 72nd interuniversity scientific and technical conference of SPbNTORES named after. A.S. Popov, dedicated to Radio Day: collection of works Section: "Telecommunications in railway transport", (conference proceedings 27-29.04.2017)]. St. Petersburg: 2017, pp. 240-241. (In Russian)
11. Login E. V., Kanaev A. K. Stsenariy upravleniya neispravnostyami v setyakh s tekhnologiyey Carrier Ethernet s pomoshch'yu mekhanizmov OAM [Fault management scenario in networks with Carrier Ethernet technology using OAM mechanisms]. *Trudy 72-oy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsiya SPbNTORES im. A.S. Popova, posvyashchennoy Dnyu radio: sbornik trudov Sektsiya: «Telekommunikatsii na zheleznodorozhnom transporte», (trudy konferentsii 27-29.04.2017)* [Proceedings of the 72nd interuniversity scientific and technical conference of SPbNTORES named after. A.S. Popov, dedicated to the Day of Radio: collection of works Section: "Telecommunications in railway transport", (conference proceedings 27-29.04.2017)]. St. Petersburg: 2017, pp. 243-244. (In Russian)

Received: May 9, 2022

Accepted: May 24, 2022

Author's information:

Andrey K. KANAEV — D. Sci. in Engineering, Professor of "Electrical Communication" Department; kanaev@pgups.ru

Elina V. LOGIN — PhD in Engineering, Associate Professor of "Electrical Communication" Department; elinabeneta@yandex.ru

Ilya S. GRISHANOV — Student; ilia911119@gmail.com

УДК 656.212.5.073

Пути повышения эффективности логистического обеспечения деятельности международной транспортной системы «Агроэкспресс» на основе инструментария однокритериальной оптимизации

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 логистического обеспечения деятельности международной транспортной системы «Агроэкспресс» на основе инструментария однокритериальной оптимизации // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 276–285. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-276-285

Аннотация

Цель: Разработать варианты технологии обеспечения необходимого уровня грузопотока для поездов «Агроэкспресс» и предложение математической модели для этих целей. **Методы:** Системного анализа, математической оптимизации операций и линейное программирование. **Результаты:** Проанализированы процессы работы по обеспечению сельскохозяйственными грузами рассматриваемого поезда. Разработана математическая модель обеспечения сельхозпродукцией поездов «Агроэкспресс» в Узбекистане. **Практическая значимость:** Предложенная модель создает благоприятные условия для увеличения внешнеторговых грузопотоков России и Узбекистана. С помощью модели имеется возможность совершенствовать технологию работы по обеспечению грузопотока в достаточном количестве «Агроэкспресса» по критерию минимальных затрат.

Ключевые слова: Грузовая перевозка, агроэкспресс, транспортно-логистический центр, грузопоток, холодильный терминал, скоропортящийся груз.

Введение

Обеспечение населения регионов с трудными климатическими условиями, где невозможно выращивать свежие овощи и фрукты, качественным продовольствием всегда является востребованным вопросом. В южных регионах массово производится сельскохозяйственная продукция, особенно много ее производят в Узбекистане. В республике производится ежегодно более 20 млн тонн плодоовощной продукции, из этого

числа не более 500 тыс. тонн экспортируется в разные страны [1]. Учитывая старение и отсутствие допуска для обращения в международном сообщении рефрижераторного подвижного состава Узбекской железной дорогой, последнее время скоропортящиеся грузы перевозятся в основном на автомобильном транспорте [2]. При этом перевозка с использованием железнодорожного транспорта считается более экологичной и экономичной относительно автомобильного транспорта.

Использование специализированного подвижного состава позволит гарантировать сохранность даже самых чувствительных к транспортировке грузов. А начало курсирования экспресс-поездов, специализированных для перевозки агропродукции, дает возможность массово перевозить грузы и увеличивать взаимный экспорт товаров страны с минимумом транспортных затрат. АО «РЖД Логистика», АО «Российский экспортный центр» России и агрологистический оператор Узбекистана ООО «Uzagrologistics Center» договорились о сотрудничестве в области развития доставки агропродукции с запуском регулярных поездов «Агроэкспресс» [3]. Согласно соглашению, стороны будут осуществлять совместную разработку бизнес-предложений по доставке сельскохозяйственной и промышленной продукции, направленную на увеличение взаимного экспорта транспортных услуг и развитие комплексных логистических сервисов. Стороны договорились перевозить грузы агропромышленных предприятий в ускоренных рефрижераторных контейнерных поездах в экспортно-импортных сообщениях. Агроэкспресс начал курсировать в начале ноября 2021 г. в тестовом режиме между станциями «Селятино» (Москва, Российская Федерация) и «Чукурсай», «Сергели» (Ташкент, Республика Узбекистан), а также предусмотрена возможность расширения проекта «Агроэкспресс» на другие направления [4]. Станция «Селятино» расположена в юго-западной части Москвы в Киевском направлении. Станции «Чукурсай» и «Сергели» находятся в промышленном районе железнодорожного узла Ташкента. Сортировочная станция «Чукурсай» расположена на северо-западе, а участковая станция «Сергели» расположена на юго-восточной части этого узла. На всех этих станциях имеются холодильные терминалы современного типа для хранения скоропортящихся грузов.

Для регулярного курсирования сервиса «Агроэкспресс» между Россией и Узбекистаном

имеется большой потенциал. Последние годы товарооборот между Узбекистаном и Россией увеличивается. В 2020 г. он вырос, по сравнению с 2019 г., на 15,7 %, до 5,88 млрд долл. США, что может говорить о росте экономической активности, несмотря на пандемию. На ближайшие годы руководители стран договорились достичь показателя в 10 млрд долл. США [3, 4]. Организация эффективной непрерывной логистической цепи из России в Узбекистан и обратно будет способствовать увеличению этого показателя. Основная номенклатура товаров, планируемая для перевозки этим маршрутом, из России: подсолнечные масла, различный ассортимент машин и техники, кондитерские изделия, сахар, мясо, рыба и морепродукты и т. д. Узбекистан экспортирует свежие овощи и фрукты, качественный хлопок, текстильные готовые и полуготовые изделия. Экспорт товаров из России в Узбекистан примерно в 3 раза больше, чем в обратном направлении [5]. Это означает что, в обратном направлении, возможно, будет наблюдаться нехватка грузопотока для этого поезда. Поэтому для своевременного наполнения грузопотоком этого маршрута требуется предусмотреть ряд мероприятий. Требуется разработка технологии доставки и обеспечения достаточными грузопотоками поездов агроэкспресса с учетом перерабатывающей способности грузовых терминалов. Рассмотрим схему доставки продукции на обозначенном ранее направлении (рис. 1).

На рис. 1 изображены направления грузопотоков относительно расположения станций формирования «Агроэкспресса». Как правило, агроэкспресс загружен 40–42 рефрижераторными контейнерами. Если считать статическую нагрузку 40 футового контейнера равной 25 тоннам, тогда для обеспечения грузами разовой отправки этого поезда потребуется около 1000–1050 тонн продукции. Но, учитывая тот факт, что производство большинства фермерских хозяйств в среднем не превышает 30 тонн в год разной

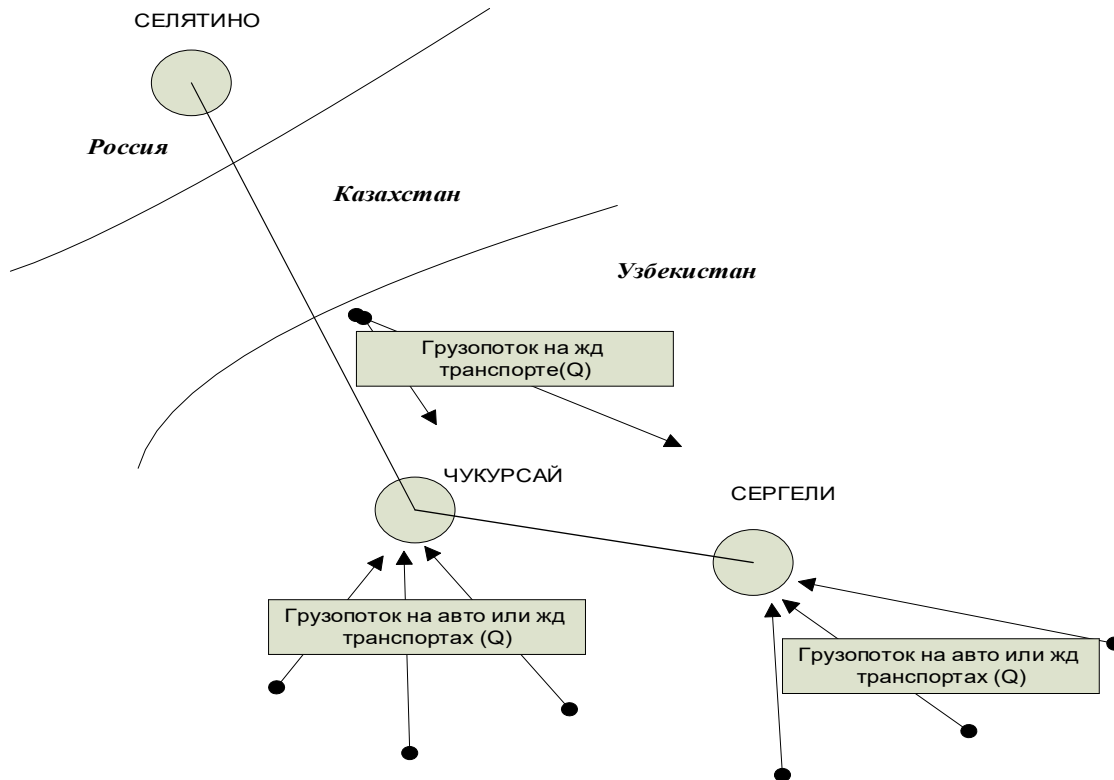


Рис. 1. Схемы формирования грузопотоков для переработки на станциях «Сергели» и «Чукурсай»

номенклатуры, созревающих в разные сезоны года, грузопотоки перевозятся не только железнодорожным, но и автомобильным транспортом. Решение проблемы, связанной с качественной доставкой сельскохозяйственной продукции, требует изучения наиболее рациональных вариантов доставки от поля или холодильника до станции погрузки и далее до конечного клиента [6].

Целью работы является разработка вариантов технологии обеспечения необходимого уровня грузопотока для поездов «Агроэкспресс».

Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи:

- провести анализ существующих целесообразных вариантов доставки рассматриваемых грузов до станций «Чукурсай» и «Сергели»;
- провести оценку необходимой величины грузопотока;
- разработать варианты технологии обеспечения поездов «Агроэкспресс»;

– разработать математическую модель по обеспечению грузами поезда.

Научной новизной работы является математическая модель обеспечения агроэкспресса свежими плодоовощами.

Обзор научно-исследовательских работ

Первое решение поставленной задачи оптимизации разработал в 1938 г. советский математик и экономист Л. В. Канторович. Он первым обнаружил, что многие экономические оптимизационные задачи можно решить математической формулировкой и точным количественным решением. Далее, в 1949 г., американский математик Дж. Данциг ввел термин «линейное программирование» в науку. Потом эта методика была распространена на другие виды задач оптимизации, появилось «нелинейное программирование» в 1951 г., которое предложили Кун и Таккер. В 1958 г. Гомори предложил «целочисленное программирование».

Существует еще ряд направлений оптимизации, отличающихся тем, что в их основу положен не конкретный класс задач, а принципы подхода к их решению, например динамическое программирование, разработанное Р. Беллманом в 1957 г. Это общий метод, оптимизация с использованием многошаговой стратегии. А в 1967 г. Даффин, Питерсон и Зенер разработали метод оптимизации, основанный на приведении целевой функции к сепарабельному виду, а также булево программирование, основанное на применении булевой алгебры к задачам дискретного программирования [7].

Вопросам совершенствования математической оптимизации и линейного программирования в сфере железнодорожного грузового транспорта посвящены работы многих ученых [8–11 и др.]. Например, автор [8] разработал методы и различные способы решения транспортных задач линейного программирования.

Сотрудниками и учеными ПГУПС было разработано и подготовлено немало работ по изучению данного вопроса. Например, автор [9] при разработке экономико-математических моделей оптимального управления вагонопотоками использовал методы линейного программирования. В [10] автором выполнены работы на основе многокритериальной оптимизации рационального распределения вагонопотоков на железнодорожном транспорте с применением метода линейного программирования.

В [11] авторами предложены решения задач управления вагонными парками с учетом многих критериев. Был предложен вариант решения задачи с минимизацией по двум критериям: суммарной стоимости и времени при перемещении вагонов.

В ходе проделанного анализа научных работ видно, что в научных работах рассмотрены актуальные вопросы оптимизационных задач с использованием метода линейного программирования. Однако при решении задач по оптимизации

процесса работы поездов «Агроэкспресс» в настоящее время методы линейного программирования используются недостаточно.

Математическая модель рассматриваемой задачи

На рис. 2 изображены основные транспортно-логистические центры (далее — ТЛЦ), которые находятся в центрах региона. Но в настоящее время ТЛЦ с необходимым холодильным оборудованием имеются только в Ташкентском регионе. Поэтому в тестовом режиме «Агроэкспресс» начал курсировать между «Селятино» (Москва) и «Чукурсай», «Сергели» (Ташкент).

При разработке математической модели были приняты во внимание следующие параметры:

A — общее количество ТЛЦ для консолидации сельхозпродукции $A = 1, 2, \dots, l$;

B — множество ТЛЦ, находящихся на главном ходу рейса поезда до Нукуса и в обратном направлении $B = 1, 2, \dots, p$;

C — все ТЛЦ на главном ходу, имеющие в себе холодильный склад $C = 1, 2, \dots, m$;

D — множество фермеров на изучаемой территории $D = 1, 2, \dots, k$;

Множества, взаимно расположены следующим образом: $C \subset B \subset A$.

Q_t — общее количество груза, перевозимого поездом «Агроэкспресс» на t -й маршруте в течение года;

n — количество фитинговых платформ в составе этого поезда;

q_{nt} — статическая нагрузка n -го вагона в составе t -го маршрута.

Здесь $Q_t = q_{nt} \cdot n$.

Далее целесообразно рассмотреть три варианта изучаемой задачи по завозу свежих овощей и фруктов к «Агроэкспрессу». Во всех трех вариантах наиболее рациональный вариант выбирается по критерию минимальных затрат доставки груза от поля фермера до станции погрузки.

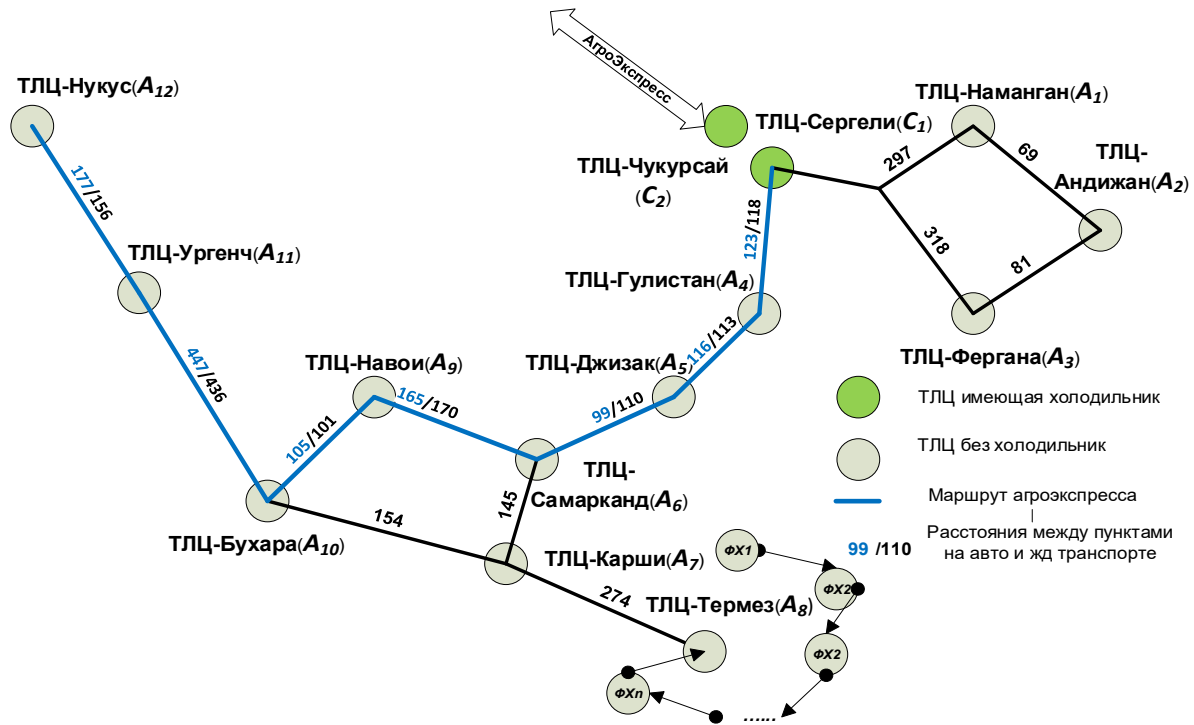


Рис. 2. Схемы расположения ТЛЦ по Узбекистану

1. В первом варианте рассматривается накопление грузов в Ташкенте. В этом случае все свежие овощи и фрукты с фермерских полей собираются автомобильным транспортом и доставляются в ТЛЦ «Сергели» или «Чукурсай», где есть холодильный склад.

Для решения этого варианта задачи необходимо определить минимальные затраты при поставке грузов. Здесь приведенные затраты состоят из двух элементов: затраты, связанные с перемещением свежих овощей и фруктов на автомобильном транспорте от поля фермеров до ТЛЦ, и затраты, связанные с переработкой грузов.

x_{DC} — количество груза, отправляемое от фермера D на ТЛЦ C ; x_C — суммарное количество груза, поступающее на ТЛЦ C ; c_{DC} — себестоимость перевозки грузов автомобильным транспортом от фермера D на ТЛЦ C ; $c_C(x_C)$ — приведенная стоимость переработки 1 т груза на ТЛЦ C . Следовательно, математический вид целевой функции имеет следующий вид:

$$F = \sum_{D=1}^k \sum_{C=1}^m x_{DC} c_{DC} + \sum_{C=1}^m x_C c_C(x_C) \rightarrow \min.$$

При следующих ограничениях:

$$\begin{cases} x_{DC} \geq 0, x_C \geq 0, \\ \sum_{D=1}^k x_{DC} = \sum_{C=1}^m x_C, \\ x_C \leq Q_0, \\ \sum_{C=1}^m x_C \leq Q_l. \end{cases}$$

2. Второй вариант связан с курсированием поезда из Ташкента до Нукуса и в обратном направлении для сбора грузов. В этом случае «Агроэкспресс» следует до станции «Нукус», отцепляя порожние фитинговые платформы с контейнерами в соответствующих ТЛЦ. Здесь рассматриваемая задача разделяется на две: первая — это маршрут через ТЛЦ Навои, вторая — это маршрут через ТЛЦ Карши. При следовании

через ТЛЦ Навои грузы, собираемые вокруг ТЛЦ Карши и Термез, доставляются автотранспортом в ТЛЦ Самарканд и ТЛЦ Бухара. Весь собираемый урожай через ТЛЦ Андижан, ТЛЦ Фергана и ТЛЦ Наманган доставляется в ТЛЦ Ташкент. В этом случае целевая функция может быть представлена в следующем виде:

$$F = \sum_{D=1}^k \sum_{B=1}^p x_{DB} c_{DB} + \sum_{B=1}^p \sum_{C=1}^m x_{BC} c_{BC} + \sum_{B=1}^p x_B c_B(x_B) \rightarrow \min.$$

При следующих ограничениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} C \subset B \\ x_{DB} \geq 0, x_{BC} \geq 0, x_B \geq 0, \\ \sum_{D=1}^k x_{DB} = \sum_{B=1}^p x_B, \\ x_B \leq Q_0 \\ \sum_{B=1}^p x_B \leq Q_1 \end{array} \right.$$

3. Распределение этих контейнеров по регионам на автомобильном транспорте. При этом варианте с помощью автомобильного транспорта происходит развозка порожних контейнеров по регионам, где есть груз. Далее автомобильным транспортом груз доставляется на одну из станций — «Чукурсай» или «Сергели», где осуществляется погрузка на железнодорожный транспорт. Этот вариант более эффективен, если грузы, идущие из России, направлены в регионы Узбекистана или если есть скоропортящиеся грузы, которые необходимо доставить из Ташкента в соответствующий регион. Изучаемые варианты оптимизационных задач считаются многоэтапными. Например, первый вариант задачи состоит из двух этапов, второй вариант — из трех, а третий — из четырех этапов. Поэтому математиче-

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные расчета

| $A_i \backslash C_j$ | C_1 | C_1 | Запасы сельхозпродукций |
|--|------------|------------|-------------------------|
| A_1 | 12 297 | 10 286 | 90 |
| A_2 | 16 366 | 14 354 | 110 |
| A_3 | 14 318 | 12 308 | 130 |
| A_4 | 8 118 | 9 128 | 50 |
| A_5 | 16 231 | 18 241 | 90 |
| A_6 | 22 341 | 23 351 | 110 |
| A_7 | 30 486 | 31 496 | 90 |
| A_8 | 38 760 | 39 770 | 80 |
| A_9 | 31 511 | 33 521 | 70 |
| A_{10} | 37 612 | 36 622 | 90 |
| A_{11} | 41 1048 | 44 1058 | 70 |
| A_{12} | 48 1204 | 49 1214 | 70 |
| Перерабатывающая способность холодильных складов | 500 | 550 | 1050 |

ская формулировка рассматриваемого варианта будет производиться в следующих публикациях. На практическом примере рассмотрим первый вариант с условием одинаковой себестоимости переработки грузов на холодильных терминалах. В этом случае задача решается как одноэтапная.

Математическое решение задачи

Для численного решения поставленной задачи были собраны исходные данные. Значения запаса сельхозпродукции получены исходя из производственного потенциала фермеров соответствующих регионов согласно статистическим данным [12, 13] для обеспечения грузами t -го маршрута «Агроэкспресс». Перерабатывающие

ТАБЛИЦА 2. Данные первой опорной таблицы по методу минимального элемента

| $A_i \backslash C_j$ | C_1 | C_1 | Запасы сельхозпродукций |
|--|--------|--------|-------------------------|
| A_1 | 12 — | 10 90 | 90 |
| A_2 | 16 — | 14 110 | 110 |
| A_3 | 14 — | 12 130 | 130 |
| A_4 | 8 50 | 9 — | 50 |
| A_5 | 16 90 | 18 — | 90 |
| A_6 | 22 110 | 23 — | 110 |
| A_7 | 30 90 | 31 — | 90 |
| A_8 | 38 80 | 39 — | 80 |
| A_9 | 31 70 | 33 — | 70 |
| A_{10} | 37 — | 36 90 | 90 |
| A_{11} | 41 10 | 44 60 | 70 |
| A_{12} | 48 — | 49 70 | 70 |
| Перерабатывающая способность холодильных складов | 500 | 550 | 1050 |

способности холодильных терминалов приняты согласно [14]. В табл. 1 приведены запасы сельхозпродукции каждого из фермерских хозяйств A_i (далее — ФХ A_i). Цифры в правом нижнем углу — это расстояния от ФХ до соответствующего терминала холодильника C_j , а цифры в левом верхнем углу означают себестоимость перевозки одной тонны груза. Далее, решая транспортную задачу методом наименьшей стоимости по строкам, получим базисный план, представленный в табл. 2.

Используя метод потенциала, определим оптимальность этого базисного плана. u_i — это потенциал отправления, а v_j — потенциал прибытия. При этом, учитывая это условие $u_i + v_j = c_{ij}$, определим потенциалы по рядам и по столбцам,

ТАБЛИЦА 3. Данные первой опорной таблицы по методу минимального элемента

| $A_i \backslash C_j$ | C_1 | C_1 | Запасы сельхозпродукций |
|--|--------|--------|-------------------------|
| A_1 | 12 — | 10 90 | 90 |
| A_2 | 16 — | 14 110 | 110 |
| A_3 | 14 — | 12 130 | 130 |
| A_4 | 8 — | 9 50 | 50 |
| A_5 | 16 90 | 18 — | 90 |
| A_6 | 22 100 | 23 10 | 110 |
| A_7 | 30 90 | 31 — | 90 |
| A_8 | 38 80 | 39 — | 80 |
| A_9 | 31 70 | 33 — | 70 |
| A_{10} | 37 — | 36 90 | 90 |
| A_{11} | 41 70 | 44 — | 70 |
| A_{12} | 48 — | 49 70 | 70 |
| Перерабатывающая способность холодильных складов | 500 | 550 | 1050 |

начиная с $u_i = 0$. Следовательно, проверим следующие условие по небазисным клетки: $u_i + v_j \leq c_{ij}$.

В этом случае это условие не выполняется по (4,2), (6,2) и (9,2) клеткам. При этом план считается неоптимальным. Из этого плана переходим к оптимальному путем циклической перестановки этих клеток. Далее получим табл. 3, для которой выполняются все условия оптимальности.

Ниже приведен ответ задачи в виде матриц. Из ответа видно, что из вектора A_i фермеров к первому холодильному терминалу целесообразно отправить соответственно 0, 0, 0, 0, 90, 100, 90, 80, 70, 0, 70, 0 тонн грузов, а ко второму холодильному терминалу 90, 110, 130, 50, 0, 10, 0, 0, 0, 90, 0, 70 тонн грузов агропродукции:

$$c = \begin{pmatrix} 12 & 10 \\ 16 & 14 \\ 14 & 12 \\ 8 & 9 \\ 16 & 18 \\ 22 & 23 \\ 30 & 31 \\ 38 & 39 \\ 31 & 33 \\ 37 & 36 \\ 41 & 44 \\ 48 & 49 \end{pmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} 0 & 90 \\ 0 & 110 \\ 0 & 130 \\ 0 & 50 \\ 90 & 0 \\ 100 & 10 \\ 90 & 0 \\ 80 & 0 \\ 70 & 0 \\ 0 & 90 \\ 70 & 0 \\ 0 & 70 \end{pmatrix}$$

Далее, подставляя оптимальные значения x из матриц в целевую функцию, определим минимальные затраты перевозок.

$$F_{\min}(x) = 10 \cdot 90 + 14 \cdot 110 + 12 \cdot 130 + 9 \cdot 50 + 16 \cdot 90 + 22 \cdot 100 + 23 \cdot 10 + 30 \cdot 90 + 38 \cdot 80 + 31 \cdot 70 + 36 \cdot 90 + 41 \cdot 70 + 49 \cdot 70 = 25\,770.$$

Заключение

Основываясь на математической формулировке проделанного анализа, можно сделать вывод о том, что первый вариант оптимален, если комплекс услуг, оказываемых в холодильных терминалах, относительно меньше от терминалов консолидации. В противном случае второй вариант выгоднее. Третий вариант наиболее экономичен, если грузы, идущие из России, направлены в регионы Узбекистана или есть скоропортящиеся грузы, которые необходимо доставить в соответствующий регион. Следовательно, из проведенного расчета можно сделать вывод, что при оптимальном значении матрицы x целевая функция получит следующее минимальное значение: $F_{\min}(x) = 25\,770$ условных денеж-

ных единиц. Далее, эта модель позволяет определить, к какому холодильному терминалу фермеру выгоднее отвезти свои грузы. Результаты работы модели могут быть применены к реальным ситуациям. При перевозке изучаемых грузов существуют также другие критерии, не все из которых взаимосвязаны с затратами. Исходя из этого, стоит задача разработать технологию поставки грузов «Агроэкспрессами» в условиях многокритериальной оптимизации многоэтапных задач, которая будет решена при последующих исследованиях.

Библиографический список

1. Журабоев К. А. Совершенствование перевозок скоропортящихся грузов путем корректировки логистической цепи (на примере республики Узбекистан): дис. ... канд. техн. наук / К. А. Журабоев. — СПб.: ПГУПС, 2012. — 48 с.
2. Официальная статистика — Министерство инвестиций и внешней торговли республики Узбекистан. — URL: <https://mift.uz/ru/menu/vneshne-torgoviy-oborot-Uzbekistana> (дата обращения: 21.11.2021).
3. Официальная статистика. — Государственный комитет Узбекистана по статистике. — URL: <https://www.stat.uz/ru/ofitsialnaya-statistika> (дата обращения: 22.11.2021).
4. Информационная статистика. — URL: https://www.akm.ru/press/rzhd_logistika_i_rets_budut_otpravlyat_agroekspresy_v_uzbekistan (дата обращения: 01.01.2022).
5. Сабуров М. Б. Оценка факторов, влияющих на экспортный потенциал Республики Узбекистан / Е. К. Коряковский, М. Б. Сабуров, Ш. Х. Султонов // Известия ПГУПС. — 2021. — № 1(18). — С. 132–142.
6. Сабуров М. Б. Прогнозирование погрузка грузов на железных дорогах Узбекистана / М. Б. Сабуров, Д. Б. Бутунов // Universum. — 2021. — № 1. — С. 36–42.
7. Ковалев В. И. Управление парками вагонов стран СНГ и Балтии на железных дорогах России: учеб. пособие / В. И. Ковалев, С. Ю. Елисеев, В. Г. Дегтяров и др. — М.: Маршрут, 2006. — 243 с.

8. Нестеров Е. П. Транспортные задачи линейного программирования / Е. П. Нестеров. — М.: Транспорт, 1971. 216 с.
9. Ковалев В. И. Организация вагонопотоков в условиях новых форм хозяйствования на железнодорожном транспорте: авт. дис. ... д-ра технич. наук / В. И. Ковалев. — СПб.: ПГУПС, 2003. — 52 с.
10. Осьминин А. Т. Рациональная организация вагонопотоков на основе методов многокритериальной оптимизации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. Т. Осьминин. — Самара: СамГУПС, 2000. — 48 с.
11. Дегтяров В. Г. Эффективный метод поиска оптимального решения транспортной задачи по критерию минимальной стоимости / В. Г. Дегтяров, В. А. Ходаковский // Автоматика на транспорте. — 2017. — № 1(3). — С. 20–35.
12. Официальная статистика — Министерство сельского хозяйства республики Узбекистан — URL: <https://www.agro.uz/ru/charts/> (дата обращения: 01.02.2022).
13. Официальная статистика — Википедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сельское_хозяйство_Узбекистана (дата обращения: 04.02.2022).
14. Официальная статистика Узбекской железной дороги АО «Узбекистон темир йуллари». — URL: Официальная статистика — Министерство сельского хозяйства республики Узбекистан. — URL: <https://www.railway.uz/ru/gazhk/statisticheskie-dannye/> (дата обращения: 01.02.2022).

Дата поступления: 24.04.2022

Решение о публикации: 19.05.2022

Контактная информация:

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

Ways to a Rise Efficiency of Logistic Provision for International Transport System "Agroexpress" Activity on the Basis of One-Criterion Optimization

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. Ways to a Rise Efficiency of Logistic Provision for International Transport System "Agroexpress" Activity on the Basis of One-Criterion Optimization // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 276–285. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-276-285

Summary

Purpose: To develop technology variants to provide for necessary level of cargo traffic for trains "Agroexpress" and mathematical model proposal for these purposes. **Methods:** System analysis, operation mathematical optimization and linear programming. **Results:** Work flows on provision of agricultural cargos of the being considered train are analyzed. Mathematical model of provision of agro-production of "Agroexpress" trains in Uzbekistan is developed. With the help of the model, there is a possibility to improve work technology on provision of cargo traffic of "Agroexpress" in sufficient quantity by minimal expenditure criterion. **Practical importance:** The proposed model creates favorable conditions for increasing foreign cargo traffic of Russia and Uzbekistan. With the help of the model it is possible to improve the technology of work to ensure the cargo traffic in a sufficient number of "Agroexpress" on the criterion of minimum costs.

Keywords: Cargo traffic, agroexpress, transport-logistic center, cargo traffic, refrigerator terminal, perishable cargo.

References

1. Zhuraboev K. A. *Sovershenstvovanie perevozok skoroportyashchikhsya gruzov putem korrektyrovki logisticheskoy tsepi (na primere respubliki Uzbekistan)*. *Kand. Diss* [Improving the transportation of perishable goods by adjusting the logistics chain (on the example of the Republic of Uzbekistan). *Cand. Diss*]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2012. 48 p. (In Russian)
2. *Ofitsial'naya statistika — Ministerstvo investitsiy i vneshney torgovli respubliki Uzbekistan* [Official statistics — Ministry of Investments and Foreign Trade of the Republic of Uzbekistan]. Available at: <https://mift.uz/ru/menu/vneshne-torgoviy-oborot-Uzbekistana> (accessed: November 21, 2021). (In Russian)
3. *Ofitsial'naya statistika. — Gosudarstvennyy komitet Uzbekistana po statistike* [Official statistics. — State Committee of Uzbekistan on Statistics]. Available at: <https://www.stat.uz/ru/ofitsialnaya-statistika> (accessed: November 22, 2021). (In Russian)
4. *Informatsionnaya statistika* [Information statistics]. Available at: https://www.akm.ru/press/rzhd_logistika_i_rets_budut_otpravlyat_agroekspresy_v_uzbekistan (accessed: January 01, 2022). (In Russian)
5. Saburov M. B. Otsenka faktorov, vliyayushchikh na eksportnyy potentsial Respubliki Uzbekistan [Assessment of factors affecting the export potential of the Republic of Uzbekistan]. *Izvestiya PGUPS* [Izvestia PGUPS]. 2021, I. 1(18), pp. 132-142. (In Russian)
6. Saburov M. B. Prognozirovaniye pogruzka gruzov na zheleznykh dorog Uzbekistana [Forecasting the loading of goods on the railways of Uzbekistan]. *Universum* [Universum]. 2021, I. 1, pp. 36-42. (In Russian)
7. Kovalev V. I. *Upravlenie parkami vagonov stran SNG i Baltii na zheleznykh dorogakh Rossii* [Management of the fleets of wagons of the CIS and Baltic countries on the railways of Russia]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 243 p. (In Russian)
8. Nesterov E. P. *Transportnye zadachi lineynogo programmirovaniya* [Transport problems of linear programming]. Moscow: Transport Publ., 1971. 216 p. (In Russian)
9. Kovalev V. I. *Organizatsiya vagonopotoxov v usloviyakh novykh form khozyaystvovaniya na zhelezno-dorozhnom transporte*. *Dokt. Diss* [Organization of car flows in the conditions of new forms of management in railway transport. *Doct. Diss*]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2003. 52 p. (In Russian)
10. Os'minin A. T. *Ratsional'naya organizatsiya vagonopotoxov na osnove metodov mnogokriterial'noy optimizatsii*. *Dokt. Diss* [Rational organization of car flows based on methods of multicriteria optimization. *Doct. Diss*]. Samara: SamGUPS Publ., 2000. 48 p. (In Russian)
11. Degtyarov V. G. Effektivnyy metod poiska optimal'nogo resheniya transportnoy zadachi po kriteriyu minimal'noy stoimosti [An effective method for finding the optimal solution to a transport problem by the criterion of minimum cost]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2017, I. 1(3), pp. 20-35. (In Russian)
12. *Ofitsial'naya statistika — Ministerstvo sel'skogo khozyaystva respubliki Uzbekistan* [Official statistics — Ministry of Agriculture of the Republic of Uzbekistan]. Available at: <https://www.agro.uz/ru/charts/> (accessed: February 01, 2022). (In Russian)
13. *Ofitsial'naya statistika — Vikipediya* [Official statistics - Wikipedia]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Sel'skoe_khozyaystvo_Uzbekistana (accessed: February 04, 2022). (In Russian)
14. *Ofitsial'naya statistika — Uzbekskoy zheleznoy dorogi AO «Uzbekiston tear yullari»* [Official statistics - Uzbek Railway JSC “Uzbekiston tear yullari”]. *Ofitsial'naya statistika — Ministerstvo sel'skogo khozyaystva respubliki Uzbekistan* [Official statistics — Ministry of Agriculture of the Republic of Uzbekistan]. Available at: <https://www.railway.uz/ru/gazhk/statisticheskie-dannye/> (accessed: February 01, 2022). (In Russian)

Received: April 24, 2022

Accepted: May 19, 2022

Author's information:

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

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

УДК: 629.4.016.2

Определение затрат энергии в синхронных тяговых генераторах тепловозов при различных режимах нагружения

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 в синхронных тяговых генераторах тепловозов при различных режимах нагружения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 286–297. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-286-297

Аннотация

Цель: Разработка методики определения затрат энергии в синхронных тяговых генераторах в зависимости от реализуемого режима нагружения. Для выполнения расчета тяговой характеристики тепловоза необходимо получить аналитические зависимости потерь энергии в синхронном тяговом генераторе от частоты вращения его вала, тока и напряжения на выходе выпрямительной установки. **Методы:** Исследование всех составляющих потерь энергии в тяговом синхронном генераторе. **Результаты:** Определены значения затрат мощности на преобразование энергии в синхронном тяговом генераторе. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют уточнить величину затрат энергии в тяговом приводе локомотивов и повысить точность тяговых расчетов.

Ключевые слова: Энергоэффективность, синхронный тяговый генератор, к.п.д. синхронного тягового генератора, тяговый привод.

Введение

Вопросам повышения энергоэффективности локомотивной тяги посвящено большое количество трудов российских и зарубежных ученых. При этом в большинстве случаев используют паспортные параметры тяговых и энергетических характеристик локомотивов [1–3].

Решение задачи повышения энергоэффективности локомотивной тяги за счет оптимизации режимов управления локомотивом предполагает выполнение предварительных вариантов

тяговых расчетов, точность которых во многом определяется достоверностью исходных данных, в том числе информацией о реальных тяговых и энергетических характеристиках локомотивов.

Несмотря на то, что уровень энергоэффективности тепловоза в эксплуатации в основном определяется техническим и теплотехническим состоянием его дизеля [4], пренебрегать переменным характером потерь в элементах тягового привода недопустимо, особенно в режимах, отличных от номинальных.

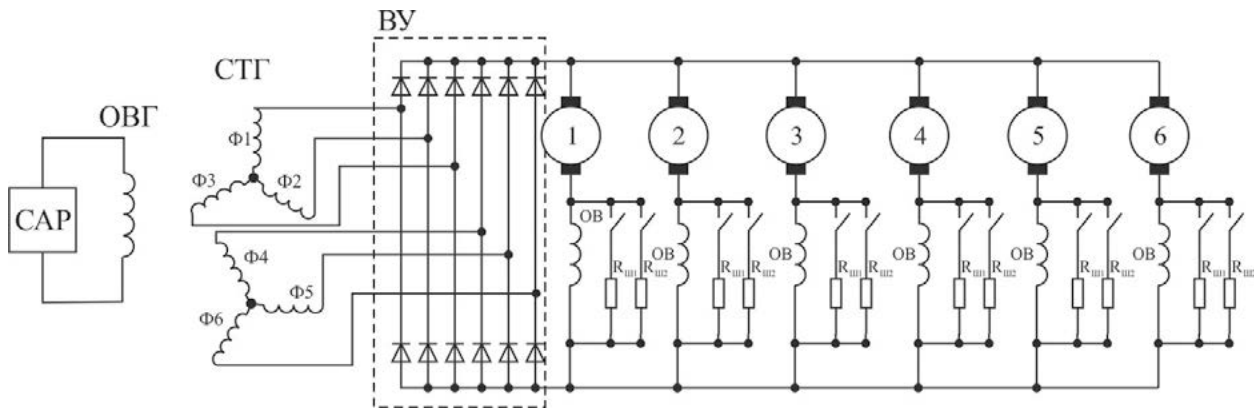


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема силовой цепи тепловоза с неуправляемой шестифазной выпрямительной установкой

Целью данной работы является разработка практически ориентированной методики расчета потерь энергии в тяговом синхронном генераторе тепловоза для расчета уточненной тяговой характеристики. При этом значения потерь должны рассчитываться с использованием параметров, регистрируемых средствами бортовой диагностики тепловоза — частоты вращения коленчатого вала дизеля, напряжений и токов на выходе выпрямительной установки. Расчет выполнен для генераторов ГС-501А и ГСТ-2800-1000 тепловозов 2ТЭ116У (2ТЭ25КМ) и ТЭП70БС [5].

1. Составляющие потерь энергии в синхронном тяговом генераторе

В соответствии с [6, 7] мощность потерь в синхронном тяговом генераторе может быть представлена суммой следующих составляющих:

$$\sum \Delta P_{\Gamma} = \Delta P_{\Gamma_{эл}} + \Delta P_{\Gamma_{мех}} + \Delta P_{\Gamma_{магн}} + \Delta P_{\Gamma_{хх}} + \Delta P_{\Gamma_{доб}} + \Delta P_{\Gamma_{возб}}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\Gamma_{эл}}$ — мощность электрических потерь, Вт; $\Delta P_{\Gamma_{мех}}$ — мощность механических потерь, Вт; $\Delta P_{\Gamma_{магн}}$ — мощность основных магнитных потерь в сердечнике статора, Вт; $\Delta P_{\Gamma_{хх}}$ — мощ-

ность добавочных потерь холостого хода, Вт; $\Delta P_{\Gamma_{доб}}$ — мощность добавочных нагрузочных потерь, Вт; $\Delta P_{\Gamma_{возб}}$ — затраты энергии на возбуждение тягового генератора.

Расчет затрат энергии на возбуждение синхронного тягового генератора по данным средств бортовой диагностики был рассмотрен ранее [8].

Мощность электрических потерь

Мощность электрических потерь в обмотке статора тягового синхронного генератора (ТСГ) может быть определена по следующей зависимости:

$$\Delta P_{\Gamma_{эл}} = \sum_{i=1}^6 (I_{\Gamma_{\phi i}}^2 \cdot r_{\phi i}), \quad (2)$$

где i — номер фазы генератора; $I_{\Gamma_{\phi i}}$ — фазный ток обмотки статора, А; $r_{\phi i}$ — активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом.

На тепловозах ТЭП70БС, 2ТЭ116 статорные обмотки ротора нагружены на одну неуправляемую выпрямительную установку с мостовой схемой выпрямления (рис. 1).

Для тепловозов 2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ, имеющих поосное регулирование тяговых электродвигателей (ТЭД), трехфазная обмотка статора включена на три полностью управляемых трехфазных

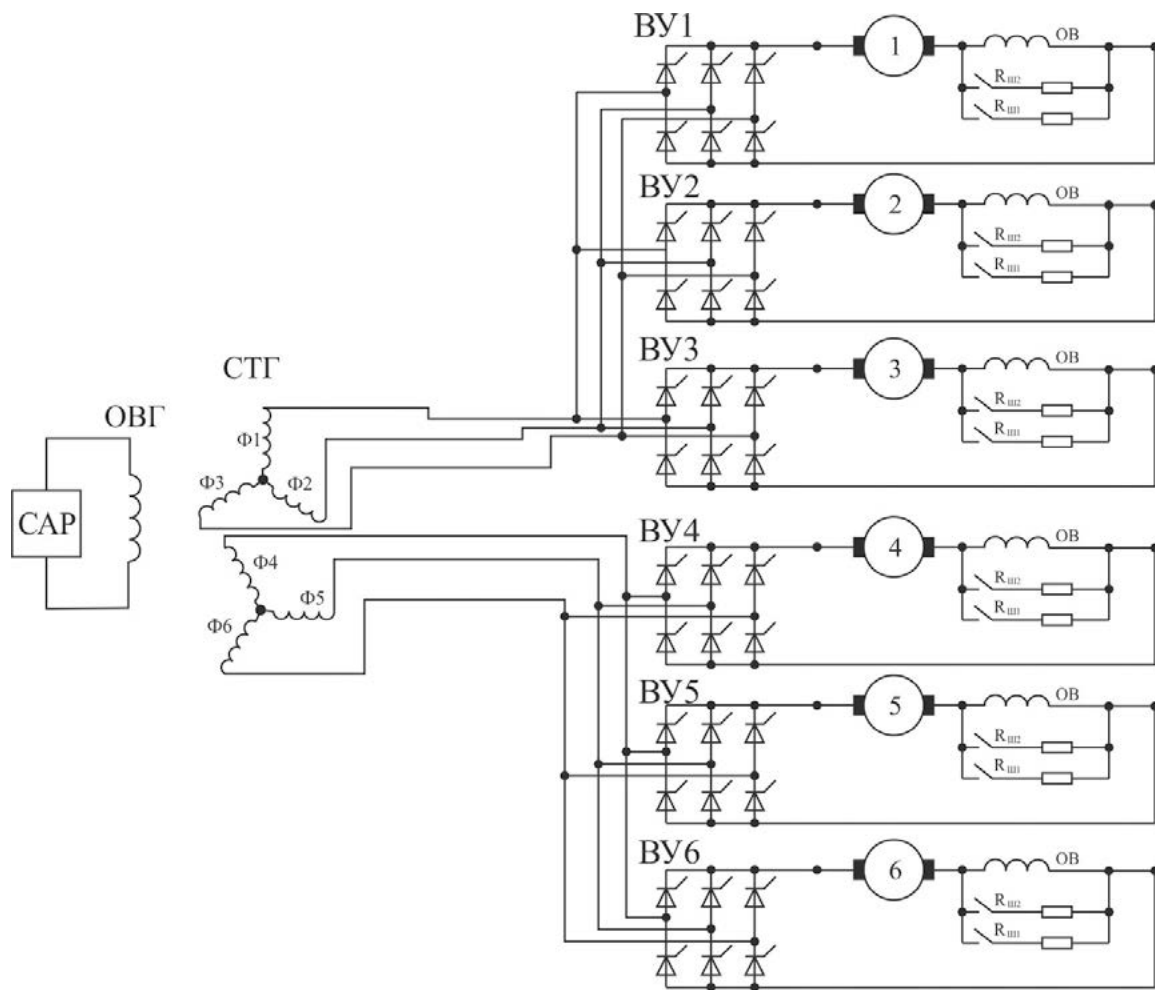


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема силовой цепи тепловоза с поосным регулированием напряжения тяговых двигателей

выпрямителя, каждый из которых осуществляет питание одного тягового двигателя (рис. 2).

В соответствии с [7] паспортное значение активного сопротивления фазы обмотки статора для рассматриваемых синхронных тяговых генераторов составляет: $r_{\phi i} = 0,0011$ Ом.

Значения фазных токов тягового генератора определяется из соотношения [6]:

$$I_{\Gamma\phi} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d = \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot \sum_{j=1}^6 I_j, \quad (3)$$

где I_d — действующее значение тока на выходе выпрямительной установки, А; I_j — ток, про-

текающий через якорь j -го тягового двигателя, А.

С учетом выражения (3) мощность электрических потерь в статоре синхронного тягового генератора может быть определена по следующей зависимости:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Gamma\text{эл}} &= I_{\Gamma\phi}^2 \cdot \sum_{i=1}^6 (r_{\phi i}) = \\ &= \frac{1}{6} \left(\sum_{j=1}^6 I_j \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^6 r_{\phi i} = \left(\sum_{j=1}^6 I_j \right)^2 \cdot r_{\phi}. \end{aligned} \quad (4)$$

При использовании шести независимых управляемых трехфазных выпрямителей зависи-

мости для определения фазных токов ТСГ будут иметь иной вид:

$$I_{Г\phi 1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (I_1 + I_2 + I_3) = 0,8165 \cdot (I_1 + I_2 + I_3); \quad (5)$$

$$I_{Г\phi 2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (I_4 + I_5 + I_6) = 0,8165 \cdot (I_4 + I_5 + I_6), \quad (6)$$

где $I_{Г\phi 1}, I_{Г\phi 2}$ — фазные токи обмоток статора ТСГ, А; $I_1 - I_6$ — токи тяговых двигателей, А.

С учетом зависимостей (5) и (6) выражение (2) примет вид:

$$\Delta P_{Гэл} = 2 \cdot r_{\phi} \left((I_1 + I_2 + I_3)^2 + (I_4 + I_5 + I_6)^2 \right). \quad (7)$$

При одинаковых токах ТЭД, равных 700А, мощность электрических потерь в ТСГ составит 19,4кВт.

Мощность механических и вентиляционных потерь

Механические потери в генераторе, представляющие собой сумму потерь на трение в подшипниках, на контактных кольцах и вентиляционных потерь, могут быть определены по следующей зависимости [6, 7]:

$$\Delta P_{Гмех} = 3,68 \cdot p \cdot \left(\frac{v_{ор}}{40} \right)^3 \cdot \sqrt{l_{ст}} \cdot 10^3, \text{ Вт}, \quad (8)$$

где $v_{ор}$ — окружная скорость вращения ротора, м/с; $p = 6$ — число пар полюсов; $l_{ст}$ — полная длина сердечника статора, мм.

После элементарных преобразований она может быть представлена в виде:

$$\Delta P_{Гмех} = K_{мех} \cdot n_{диз}^3, \quad (10)$$

где $K_{мех}$ — постоянный коэффициент механических потерь, определяемый по зависимости:

$$K_{мех} = 3680 \cdot p \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{\delta}}{2400} \right)^3 \cdot \sqrt{l_{ст}}. \quad (11)$$

где D_{ρ} — диаметр ротора (м). Полная длина сердечника статора в выражение (11) подставляется в м.

Для тягового генератора ГС-501А:

$$K_{мех} = 3680 \cdot 6 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 1,22}{2400} \right)^3 \cdot \sqrt{0,300} = 0,00004926.$$

Для тягового генератора ГСТ-2800-1000:

$$K_{мех} = 3680 \cdot 6 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 1,22}{2400} \right)^3 \cdot \sqrt{0,326} = 0,00005135.$$

Таким образом, при номинальной частоте вращения ротора 1000 об/мин механические потери в генераторе ГС-501А составят 49,26 кВт, а при частоте вращения 350 об/мин, соответствующей первой позиции контроллера, механические потери составят 2,11 кВт. У генератора ГСТ-2800-1000 величина потерь для частот вращения 350 об/мин и 1000 об/мин составит 2,2 кВт и 51,35 кВт соответственно.

Мощность магнитных потерь

Магнитные потери в статоре ТСГ определяются как сумма магнитных потерь в спинке статора $\Delta P_{мсс}$ и потерь в зубцовой зоне статора $\Delta P_{мзз}$:

$$\Delta P_{Гмагн} = \Delta P_{мсс} + \Delta P_{мзз}. \quad (12)$$

Основные магнитные потери в спинке статора и зубцовой зоне статора могут быть определены из соотношений [7]:

$$\Delta P_{\text{мсс}} = k_{\text{мт}} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot B_{\text{сц}}^2 \cdot G_{\text{сц}}, \text{ Вт}; \quad (13)$$

$$\Delta P_{\text{мзз}} = k_{\text{мт}} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot B_{\text{зс}}^2 \cdot G_{\text{зс}}, \text{ Вт}, \quad (14)$$

где $k_{\text{мт}} = 1,7$ — технологический коэффициент, учитывающий увеличение магнитных потерь из-за наличия в сердечнике статора дефектов, возникающих при штамповке листов, их сборке и последующей обработке пакетов; β — показатель степени, зависящий от марки стали; $P_{1,0/50}$ — удельные магнитные потери в стали весом 1 кг при перемагничивании с частотой 50 Гц в магнитном поле с индукцией 1 Тл; f — частота выходного напряжения, Гц; $B_{\text{сц}}$ и $B_{\text{зс}}$ — индукция в спинке и зубцах статора соответственно, Тл; $G_{\text{сц}}$ и $G_{\text{зз}}$ — масса стали спинки статора и зубцовой зоны соответственно, кг.

С учетом $f = \frac{p \cdot n_{\text{диз}}}{60}$ зависимости (12) и (13)

могут быть представлены в следующем виде:

$$\Delta P_{\text{мсс}} = k_{\text{мт}} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{p}{3000}\right)^\beta \cdot G_{\text{сц}} \cdot B_{\text{сц}}^2 \cdot n_{\text{диз}}^\beta, \text{ Вт}; \quad (16)$$

$$\Delta P_{\text{мзз}} = k_{\text{мт}} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{p}{3000}\right)^\beta \cdot G_{\text{зз}} \cdot B_{\text{зс}}^2 \cdot n_{\text{диз}}^\beta, \text{ Вт}. \quad (17)$$

Статор тяговых генераторов набирается из листов стали Э-43, предназначенной для магнитных цепей электрических машин. Для данной марки стали удельные магнитные потери $P_{1,0/50}$

составляют 1,25 Вт/кг, а показатель степени β равен 1,5 [7, 9]. Масса стали спинки статора $G_{\text{сц}}$ для генератора ГС-501А может быть принята равной 930 кг, а масса стали в зубцовой зоне $G_{\text{зз}}$ равна 271 кг. Для генератора ГСТ-2800-1000 эти значения составят 1011 и 294 кг соответственно.

Значения индукции в зубцовой зоне и спинке статора определяются по следующим зависимостям:

$$B_{\text{зз}} = \frac{t_1}{(t_1 - b_p) \cdot k_c} \cdot \frac{10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_{\text{ст}}} \cdot \Phi, \text{ Тл}; \quad (18)$$

$$B_{\text{сц}} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau}{h_c \cdot k_c} \cdot \frac{10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l} \cdot \Phi, \text{ Тл}. \quad (19)$$

где t_1 — зубцовое деление статора, м; b_p — ширина паза статора, м; k_c — коэффициент заполнения сердечника сталью; α_i — коэффициент полюсного перекрытия; τ — длина полюсной дуги, м; h_c — высота сердечника статора, м; Φ — магнитный поток полюсов ротора, Вб.

Магнитный поток определяется по следующей зависимости (Вб) [7]:

$$\Phi = \frac{E_{\text{Гф}}}{4 \cdot k_b \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{\text{об}}}, \text{ Вб}, \quad (20)$$

где $E_{\text{Гф}}$ — э.д.с. фазы обмотки статора, В; $k_b = 1,1-1,15$ — коэффициент формы поля, зависящий от коэффициента полюсного перекрытия; $w_1 = 12$ — число витков фазы обмотки; $k_{\text{об}} = 0,92-0,96$ — обмоточный коэффициент.

Фазное значение э.д.с. синхронного тягового генератора определяется исходя из выражения:

$$E_{\text{Гф}} = U_{\text{Гф}} + I_{\text{Гф}} \cdot r_{\text{ф}}, \text{ В} \quad (21)$$

где $U_{\text{Гф}}$ — фазное напряжение генератора, В.

Фазное напряжение генератора $U_{\text{Гф}}$ в схемах выпрямления показанных на рис. 1 и 2 определяется по зависимости:

$$U_{ГФ} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot U = 0,4275 \cdot U, \text{ В}, \quad (22)$$

где U — действующее значение выпрямленного напряжения, приложенного к тяговому двигателю, В.

Выполнив элементарные подстановки и заменив частоту напряжения тягового генератора f на частоту вращения вала дизель-генераторной установки $n_{диз}$, получим следующие соотношения:

$$B_{зз} = \frac{15 \cdot 10^6 \cdot t_1}{(t_1 - b_i) \cdot k_c \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot l_{ст} \cdot k_b \cdot p \cdot w_1 \cdot k_{об}} \times \frac{E_{ГФ}}{n_{диз}}, \text{ Тл}. \quad (23)$$

$$B_{cc} = \frac{7,5 \cdot 10^6}{h_{ст} \cdot k_{св} \cdot l \cdot k \cdot p_{об} \cdot w_1 \cdot k_{диз}} \cdot \frac{E_{ГФ}}{n}, \text{ Тл}. \quad (24)$$

После выполнения всех подстановок выражения (15) и (16) примут вид:

$$\Delta P_{мсс} = k_{мг} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{p}{3000}\right)^B \cdot G_{cc} \times \left(\frac{7,5 \cdot 10^6}{h_{ст} \cdot k_{св} \cdot l \cdot k \cdot p_{об} \cdot w_1 \cdot k}\right)^2 \cdot \frac{E_{ГФ}^2}{n_{диз}^{2-\beta}}, \text{ Вт}; \quad (25)$$

$$\Delta P_{мзз} = k_{мг} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{p}{3000}\right)^B \cdot G_{зз} \times \left(\frac{15 \cdot 10^6 \cdot t_1}{(t_1 - b_i) \cdot k_c \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot l \cdot k \cdot p \cdot w_1 \cdot k}\right)^2 \times \frac{E_{ГФ}^2}{n_{диз}^{2-\beta}}, \text{ Вт}. \quad (26)$$

С учетом того, что все составляющие выражений (24) и (25), за исключением $E_{ГФ}$ и $n_{диз}$, представляют собой постоянные параметры ТСГ, выражение (12) можно представить в следующем виде:

$$\Delta P_{Магн} = \Delta P_{мсс} + \Delta P_{мзз} = K_{Магн} \cdot \frac{E_{ГФ}^2}{n_{диз}^{2-\beta}}, \text{ Вт}, \quad (27)$$

где $K_{Магн}$ — постоянный коэффициент магнитных потерь в спинке и в зубцовой зоне статора, определяемый по следующей зависимости:

$$K_{Магн} = k_{мг} \cdot P_{1,0/50} \cdot \left(\frac{p}{3000}\right)^B \times \left(\frac{7,5 \cdot 10^6}{k_c \cdot l_{ст} \cdot k_b \cdot p \cdot w_1 \cdot k_{об}}\right)^2 \times \left[G_{cc} \cdot \left(\frac{1}{h_c}\right)^2 + G_{зз} \cdot \left(\frac{2 \cdot t_1}{(t_1 - b_{п}) \cdot \alpha_i \cdot \tau}\right)^2\right]. \quad (28)$$

Значение коэффициента $K_{Магн}$ для ТСГ ГС-501А составляет 4,175, для ГСТ-2800-1000 значение этого коэффициента равно 3,84.

Зависимость мощности магнитных потерь от частоты вращения ротора и фазной э.д.с. тяговых генераторов показано на рис. 3 и 4.

Из приведенных результатов расчета следует, что мощность магнитных потерь может достигать 20 кВт и уменьшается по мере увеличения частоты вращения ротора.

Мощность добавочных потерь холостого хода

Добавочные потери холостого хода в синхронном тяговом генераторе представляют собой поверхностные потери в полюсных наконечниках и вызываются изменением магнитной индукции из-за зубчатости внутренней поверхности сердечника статора. В соответствии с [7] они определяются по зависимости:

$$\Delta P_{Гхх} = k_i \cdot p \cdot b_{\delta} \cdot l_{ст} \cdot (z_i \cdot n_{диз} \cdot 10^{-4})^{1,5} \times (B_{\delta} \cdot (k_{\lambda} - 1) \cdot t_1)^2 \cdot 10^{-6}, \text{ Вт}, \quad (29)$$

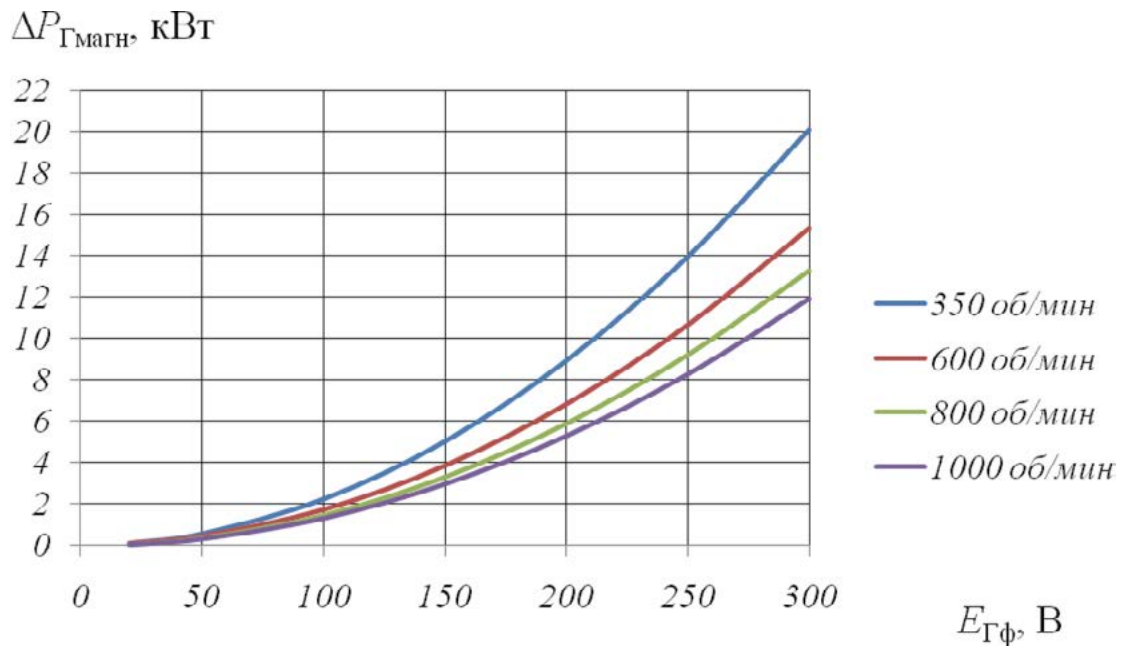


Рис. 3. Результаты определения магнитных потерь для синхронного тягового генератора ГС-501А

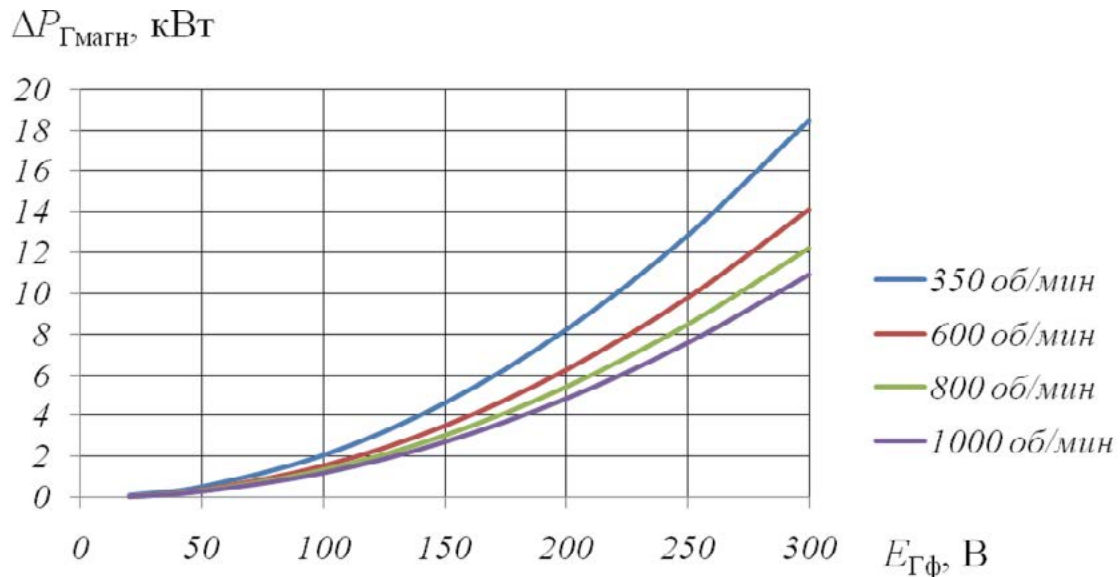


Рис. 4. Результаты определения магнитных потерь для синхронного тягового генератора ГСТ-2800-1000

где B_{δ} — магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл; k_{π} — коэффициент, определяемый толщиной листов полюсных наконечников; b_p — ширина полюсного наконечника, мм; z_n — число пазов обмотки статора; $k_{\delta 1}$ — коэффициент воздушного зазора статора.

С учетом толщины стали полюсов ротора синхронных тяговых генераторов (1,4 мм [5, 10]), коэффициент k_{π} может быть принят равным 6,2.

Ширина полюсного наконечника для синхронных тяговых генераторов ГС-501А и ГСТ-2800-1000 может быть принята равной 225 мм.

Коэффициент воздушного зазора статора определяется согласно зависимости [7]:

$$k_{\delta l} = \frac{t_1 + 10 \cdot \delta_{cp}}{t_1 - b_p + 10 \cdot \delta_{cp}}, \quad (30)$$

где δ_{cp} — среднее значение воздушного зазора, которое может быть определено исходя из соотношения:

$$\delta_{cp} = \delta + \frac{\delta_{max} - \delta}{3}, \text{ мм}, \quad (31)$$

где δ — воздушный зазор по центру полюса, мм; δ_{max} — воздушный зазор по краю полюса, мм.

В соответствии с [5], среднее значение воздушного зазора составит 5,84 мм для синхронного тягового генератора ГС-501А и 6,17 мм для тягового синхронного генератора ГСТ-2800-1000.

После подстановки величины среднего воздушного зазора коэффициент воздушного зазора статора составит 1,161 для тягового синхронного генератора ГС-501А и 1,154 для тягового генератора ГСТ-2800-1000.

Выполнив ряд элементарных преобразований с заменой магнитной индукции в воздушном зазоре на магнитный поток [7] и воспользовавшись выражением (20), получим следующую зависимость для определения мощности добавочных потерь холостого хода:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ГХХ} = & k_p \cdot p \cdot b_p \cdot l_{ст} \cdot (z_i \cdot 10^{-4})^{1,5} \times \\ & \times (k_{\delta l} - 1)^2 \cdot t_1^2 \cdot \left(\frac{10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_{ст}} \right)^2 \cdot n_{диз}^{1,5} \times \\ & \times \left(\frac{15}{k_b \cdot p \cdot w_1 \cdot k_{об}} \right)^2 \cdot \left(\frac{E_{ГФ}}{n_{диз}} \right)^2, \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (32)$$

Вычленив постоянные составляющие и произведя ряд элементарных преобразований, выражение (32) можно представить в виде:

$$\Delta P_{ГХХ} = K_{ХХ} \cdot \frac{E_{ГФ}^2}{n_{диз}^{0,5}}, \quad (33)$$

где $K_{ХХ}$ — постоянный коэффициент для определения дополнительных потерь холостого хода, определяемый по зависимости:

$$\begin{aligned} K_{ХХ} = & k_p \cdot p \cdot b_p \cdot l_{ст} \cdot (z_p \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot (k_{\delta l} - 1)^2 \times \\ & \times t_1^2 \cdot \left(\frac{10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_{ст}} \right)^2 \cdot \left(\frac{15}{k_b \cdot p \cdot w_1 \cdot k_{об}} \right)^2 \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \quad (34)$$

Для тягового генератора ГС-501А величина коэффициента $K_{ХХ}$ составит 0,829, а для тягового генератора ГСТ-2800-1000 величина коэффициента $K_{ХХ}$ составит 0,698.

Зависимость мощности добавочных потерь холостого хода от частоты вращения ротора и фазной э.д.с. тягового генератора показана на рис. 5 и 6.

Как видно из представленных результатов, мощность добавочных потерь холостого хода может составлять до 4кВт и уменьшается с увеличением частоты вращения ротора.

Мощность добавочных потерь при нагрузке

Добавочные потери при нагрузке $\Delta P_{Гдоб}$ представляют собой потери в обмотке статора от вихревых токов, потери в стали статора и полюсных наконечниках ротора от высших гармоник магнитного поля. Добавочные потери при нагрузках в синхронных машинах определяют приближенно как часть полезной мощности тягового генератора. Согласно [11], для синхронного тягового генератора мощность добавочных потерь может быть принята равной 0,4 % от мощности генератора или 0,5 % от мощности на зажимах ВУ [6]:

$$\Delta P_{Гдоб} = 0,004 \cdot P_{Гвых} = 0,005 \cdot \sum (U_i \cdot I_i). \quad (35)$$

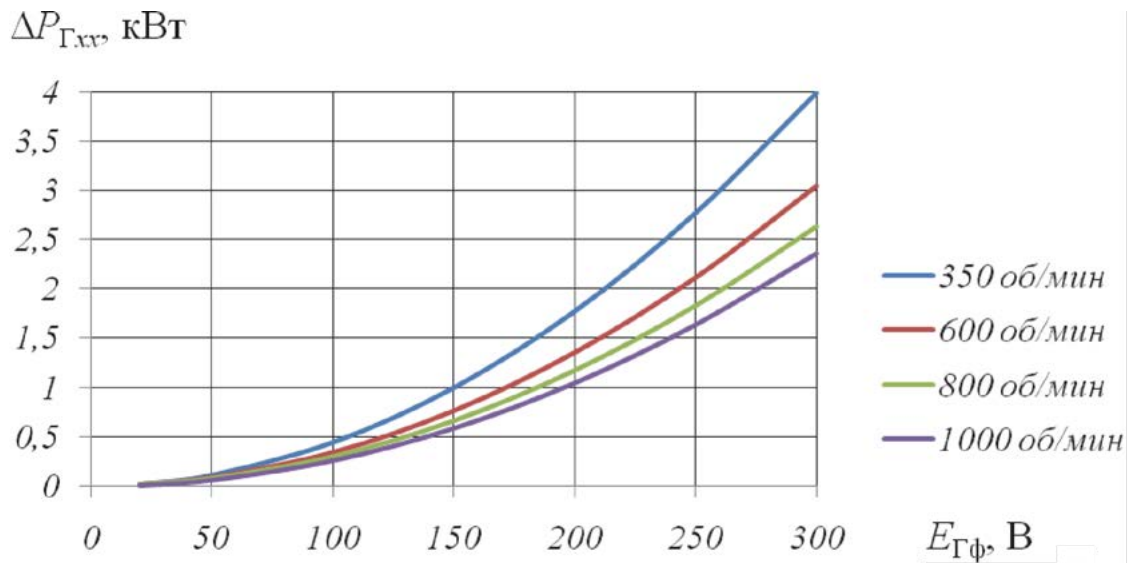


Рис. 5. Результаты определения добавочных потерь холостого хода для синхронного тягового генератора ГС-501А

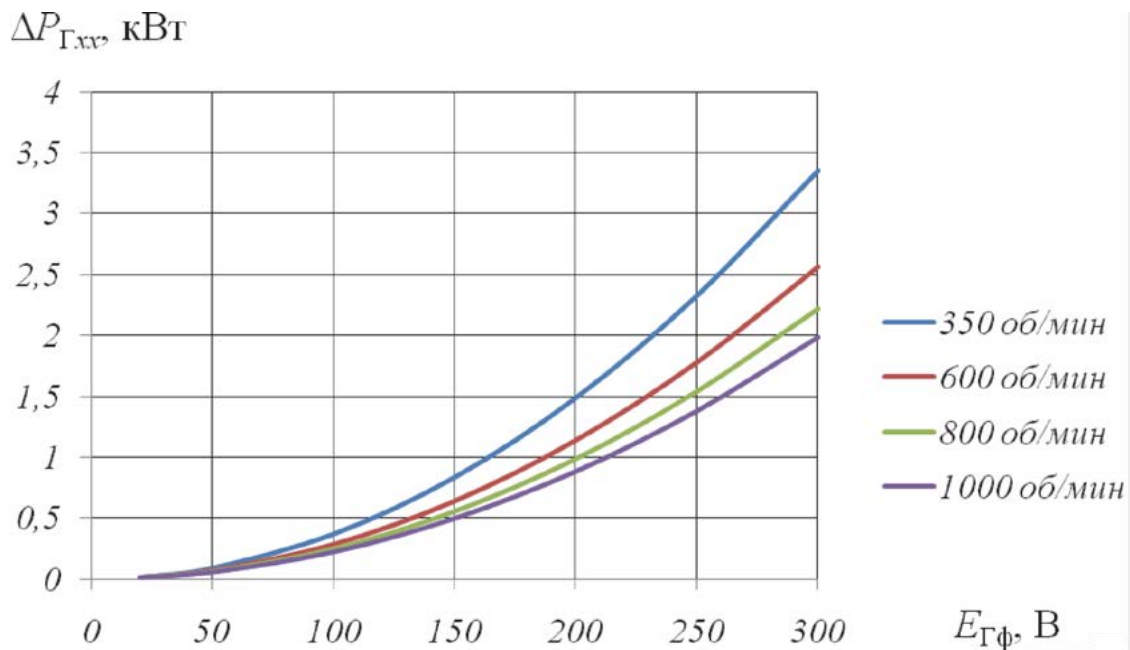


Рис. 6. Результаты определения добавочных потерь холостого хода для синхронного тягового генератора ГСТ-2800-1000

Выводы

1. В результате выполненной работы предложена методика определения мощности потерь в синхронных тяговых генераторах при различных режимах нагружения.

2. Все составляющие потерь могут быть определены с использованием значений частоты вращения вала дизеля, токов и напряжений тяговых электродвигателей, регистрируемых бортовыми средствами диагностики тепловоза.

3. Мощность электрических потерь при номинальных значениях токов тяговых двигателей достигает 20 кВт.

4. Мощность механических потерь при номинальной частоте вращения достигает 50 кВт.

5. Мощность магнитных потерь в номинальном режиме работы ТСГ составляет 20 кВт, а мощность добавочных потерь холостого хода составляет 4 кВт, причем с уменьшением частоты вращения ротора эти потери увеличиваются.

Работа выполнена в рамках гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Библиографический список

1. Баранов Л. А. Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Гинь; под ред. Л. А. Баранова. — М.: МИИТ, 2011. — 164 с.

2. Юренко К. И. Математическое моделирование энергооптимальных режимов ведения поезда с учетом возмущений / К. И. Юренко, А. Н. Савоськин, Е. И. Фандеев // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2015. — № 3. — С. 34–44.

3. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. — М.: Интекст, 2012. — 80 с.

4. 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.

5. 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.

6. Гаккель Е. Я. Электрические машины и электрооборудование тепловозов: учебник для вузов ж. д. трансп. / Е. Я. Гаккель, К. И. Рудая, И. Ф. Пушкарев и др.; под ред. Е. Я. Гаккель. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1981 — 256 с.

7. Кацман М. М. Расчет и конструирование электрических машин: учебное пособие для техникумов / М. М. Кацман. М.: Энергоатомиздат, 1984. — 360 с.

8. Курилкин Д. Н. Определение затрат энергии на возбуждение синхронного тягового генератора по данным микропроцессорных систем управления для прогнозирования тяговой характеристики локомотива / Д. Н. Курилкин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 103–117.

9. ГОСТ 21427.3—75. Сталь электротехническая горячекатаная тонколистовая.

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

11. ГОСТ 2582—2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия.

Дата поступления: 12.04.2022

Решение о публикации: 28.04.2022

Контактная информация:

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

Determination of Energy Consumption in Synchronous Traction Generators of Diesel Locomotives Under Various Workload Conditions

D. N. Kurilkin

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

For citation: Kurilkin D. N. Determination of Energy Consumption in Synchronous Traction Generators of Diesel Locomotives Under Various Workload Conditions // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 286–297. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-286-297

Summary

Purpose: To develop a methodology for determining energy consumption in synchronous traction generators depending on implemented workload mode. To calculate traction characteristics of a locomotive it is necessary to obtain analytical dependences of energy losses in a synchronous traction generator from rotation frequency of its shaft, electric current and voltage at rectifier plant. To solve the problem of determining significance of various components of losses in a synchronous traction generator under different operating modes. **Methods:** Investigation of all components of energy losses in a traction synchronous generator. Conclusion of analytical dependencies that allow calculating all components of losses in generator depending on its design parameters by obtaining constant coefficients that depend on design parameters of generator. **Results:** The values of capacity spending for energy conversion in a synchronous traction generator are determined. The obtained dependences allow us to perform refined analysis of losses in a traction drive. It is shown that the capacity of mechanical losses at a nominal speed reaches 50 kW, capacity of electrical and magnetic losses can reach 20 kW. **Practical importance:** The results obtained allow us to clarify the amount of energy consumption in a traction drive of locomotives and improve the accuracy of traction calculations. The nature of the change in losses in a synchronous traction generator depending on speed, voltage and current at the output of rectifier plant and its design parameters is shown. The results can be used, among other things to clarify traction characteristics of locomotives.

Keywords: Energy efficiency, synchronous traction generator, efficiency of synchronous traction generator, loss components, traction drive.

References

1. Baranov L. A., Erofeev E. V., Meleshin I. S., Gin' L. M. *Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov* [Optimization of train traffic control]. Moscow: MIIT Publ., 2011. 164 p. (in Russian)
2. Yurenko K. I., Savos'kin A. N., Fandeev E. I. Matematicheskoe modelirovanie energooptimal'nykh rezhimov vedeniya poezda s uchetom vozmushcheniy [Mathematical modeling of energy-optimal train driving modes taking into account disturbances]. *Izv. vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Izv. universities. North Caucasian region. Technical science]. 2015, I. 3, pp. 34-44. (In Russian)
3. Muginshteyn L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. *Energooptimal'nye metody upravleniya dvizheniem poezdov* [Energy-optimal methods of train traffic control]. Moscow: Intekst Publ., 2012. 80 p. (In Russian)
4. Perminov V. A. Vliyanie tekhnicheskogo sostoyaniya vspomogatel'nogo oborudovaniya teplovozzov 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)

5. Grishchenko A. V., Kazachenko E. V. *Novye elektricheskie mashiny lokomotivov* [New Electric Machines of Locomotives]. Moscow: GOU «Uchebnogo metodicheskiiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2008. 271 p. (In Russian)
6. Gakkel' E. Ya. *Elektricheskie mashiny i elektrooborudovanie teplovozov* [Electrical machines and electrical equipment of diesel locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1981. 256 p. (In Russian)
7. Katsman M. M. *Raschet i konstruirovaniye elektricheskikh mashin* [Calculation and design of electrical machines]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984. 360 p. (In Russian)
8. Kurilkin D. N. *Opreделение zatrat energii na vzbuzhdeniye sinkhronnogo tyagovogo generatora po dannym mikroprotsessornykh sistem upravleniya dlya prognozirovaniya tyagovoy kharakteristiki lokomotiva* [Determination of energy costs for the excitation of a synchronous traction generator according to microprocessor control systems for predicting the traction characteristics of a locomotive]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, I. 1, pp. 103-117. (In Russian)
9. Marchenko V. S. *Elektrooborudovanie teplovozov* [Electrical equipment of diesel locomotives]. Moscow: IKTs «Akademkniga» Publ., 2003. 248 p. (In Russian)
10. *GOST 21427.3-75. Stal' elektrotekhnicheskaya goryachekatanaya tonkolistovaya* [GOST 21427.3-75. Steel electrical hot-rolled sheet]. (In Russian)
11. *GOST 2582-2013. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskije usloviya* [GOST 2582-2013. Electric rotating traction machines. General specifications]. (In Russian)

Received: April 12, 2022

Accepted: April 28, 2022

Author's information:

Dmitry N. KURILKIN – PhD in Engineering;
kurilkin@pgups.ru

УДК 656.2

Оценка возможностей транспортно-экспедиторской компании при проектировании цепи доставки груза

Г. И. Никифорова, Т. Г. Сергеева

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

Для цитирования: Никифорова Г. И., Сергеева Т. Г. Оценка возможностей транспортно-экспедиторской компании при проектировании цепи доставки груза // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 298–304. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-298-304

Аннотация

Цель: Исследовать пути повышения качества транспортно-экспедиторских услуг, снижения транспортной составляющей в цене товара, а также возможности совершенствования цепей поставок в современных условиях с помощью методов управления качеством. Оценить возможности и выбрать приоритетную транспортно-экспедиторскую компанию в соответствии с запросами грузовладельца. Для этого предварительно проанализировать потребности грузовладельцев к перевозке, а затем перевести запросы грузовладельца в технические и технологические требования к оказываемым услугам с помощью матрицы «дом качества». Проанализировать возможности интеграции методов экспертного оценивания в методику развертывания функций качества. **Материалы и методы:** Метод развертывания функций качества, построение дома качества, метод попарного сопоставления, построение шкалы порядка. Представлен порядок расчета величины конкордации. **Результаты:** Показана необходимость перевода запросов грузовладельцев в технические и технологические характеристики для приведения в соответствие требований к цепи доставки и предоставляемых услуг. Представлены общие положения построения дома качества для возможности применения экспертного метода на этапе оценки конкурирующих транспортно-экспедиторских компаний. **Практическая значимость:** Показана возможность улучшения качества услуг транспортно-экспедиторских компаний в соответствии с требованиями грузовладельца.

Ключевые слова: Транспортно-экспедиторская компания, цепь доставки груза, метод развертывания функций качества, эксперт, метод попарного сопоставления, коэффициент конкордации.

Проблемы в организации цепей поставок и удовлетворении требований грузовладельцев, возникающие в последнее время [1, 2], должны решаться с помощью надежных и опробованных в различных видах производства методах управления качеством [3–5]. Санкционная политика ряда

стран в отношении РФ в первую очередь отразилась на работе логистических цепей и транспортной отрасли в целом. Подобные глобальные изменения должны подталкивать к поиску новых эффективных решений по организации доставки груза [6, 7] и удовлетворению требований в пер-

вую очередь внутреннего потребителя [8, 9]. В настоящее время большинство логистических цепей требуют оперативного регулирования и перестройки, а зачастую и полного перепроектирования. И здесь важно использовать эффективные методы организации производства, которые в свое время позволили поднять экономику в других странах, например в Японии после Второй мировой войны. Метод развертывания функций качества послужит инструментом для перевода запросов грузовладельцев к транспортно-экспедиторским компаниям (а также операторским компаниям и перевозчикам) в технические и технологические характеристики процесса доставки груза. Наглядность и результативность этого метода подтверждается его широким и успешным применением по всему миру [4]. В данном исследовании предлагается один из этапов метода развертывания функций качества реализовать с помощью экспертного оценивания.

Снижение транспортной составляющей в цене товара является важной задачей в условиях местного рынка товарораспределения и глобальной мировой торговли. Сложности последних лет, связанные с пандемией и политическими событиями, мотивируют к поиску новых решений в организации логистических цепей, снижению себестоимости перевозки, повышению качества услуг, увеличению клиентоориентированности. Комплексность транспортной услуги в полной мере в настоящее время обеспечивается реализацией логистической модели экспедирования. Она отвечает требованиям современного грузовладельца, которому необходимо минимизировать денежные, временные и информационные затраты при организации перевозки груза [5].

Логистическая модель экспедирования предполагает участие единого экспедитора в деятельности всей логистической цепи. Транспортно-экспедиторская компания таким образом переходит от посреднического к управленческому функци-

оналу при организации цепи поставки. Соответственно реализуются логистические принципы «точно в срок», «от двери до двери» и проч. Логистическая модель системы экспедирования повышает важность экспедитора в цепи поставок, таким образом, увеличивается значимость оценки и выбора транспортной компании для осуществления перевозки. Конечно, такой выбор будет обусловлен конкретными условиями и требованиями грузовладельца к перевозке: регулярность поставок, география перевозки, участие одного или нескольких видов транспорта, требования к подвижному составу, таре и упаковке груза и т. д. Компания грузовладелец/поставщик продукции, как правило, имеет перечень запросов, алгоритм выбора транспортно-экспедиторской компании. Осуществить выбор транспортно-экспедиторской компании на основании определенного ряда характеристик можно разными способами: путем принятия решения менеджмента компании-грузовладельца, на основании использования метода экспертных оценок, с использованием закона Парето, путем применения факторного анализа и т. д.

В общем виде задача оценки выбора транспортно-экспедиторской компании может реализовываться следующим образом:

- 1) преобразование перечня запросов грузовладельца к проектируемому процессу перевозки в технические требования;
- 2) оценка и выбор транспортно-экспедиторской компании.

В работе с запросами потребителя целесообразно использование метода развертывания функций качества. Этот метод возник в Японии в конце 60-х гг. XX в. и решал задачу удовлетворения потребностей клиентов. Его авторы — профессор С. Мидзуно и Е. Акао. В 70-х гг. метод развертывания функций качества успешно применяется в компаниях «Мицубиси» и «Тойота». Начиная с 80-х гг. этот метод стали использовать

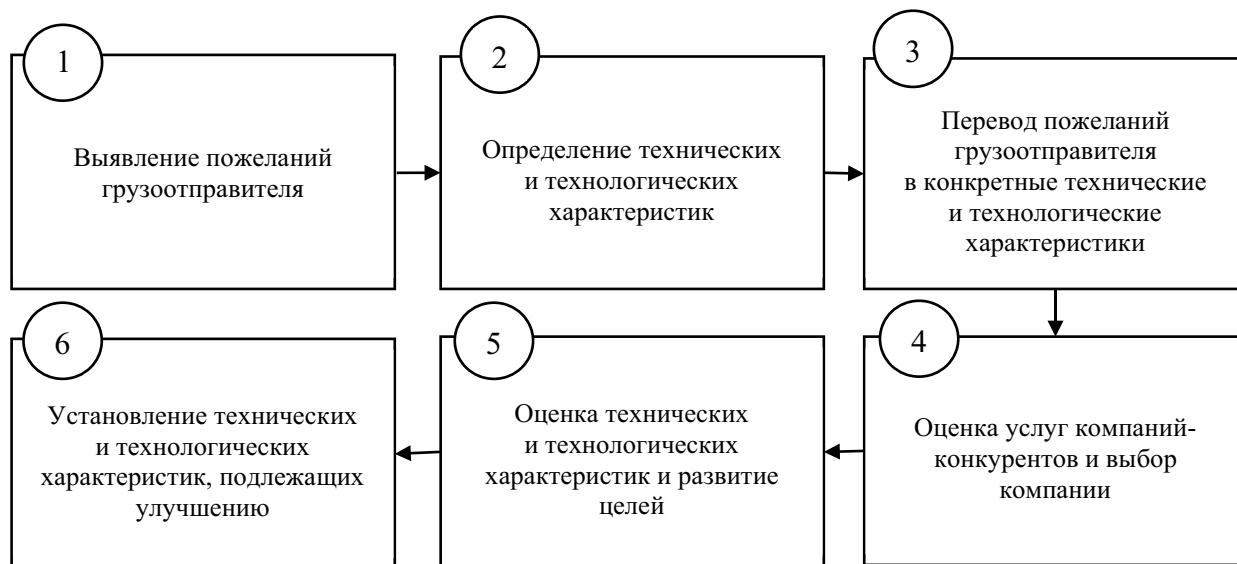


Рис. 1. Этапы применения метода развертывания функций качества

по всему миру. Например, в США опыт переняли автоконцерны «Форд», «Крайслер» и т. д. В Европе японский метод стал успешным в Италии, Германии, Швеции в 90-х годах прошлого века [5]. Сущность метода развертывания функций качества состоит в «переводе» запросов потребителей в конкретные технические требования. Как правило, запросы грузовладельца к перевозочному процессу имеют общий вид, т. е. первой задачей применения метода развертывания функций качества является соотношение запросов с техническими и технологическими параметрами цепи доставки. Далее пожелания, сформулированные грузовладельцем, переводятся в конкретные характеристики процесса доставки. Уже после этого проводится оценка компаний-конкурентов и выбор транспортно-экспедиторской компании (рис. 1).

В качестве примера запроса грузоотправителя может быть «дешевизна» перевозки, «надежность» транспортно-экспедиторской компании, под которой может пониматься и исполнение договорных условий, и доставка груза «точно в срок», и информационное обеспечение перевозки с постоянным уведомлением грузовладельца обо всех операциях с грузом и проч. Метод развер-

тывания функций качества помогает, к примеру, перевести эти запросы в следующий перечень характеристик:

- ритмичность и своевременность перевозок, α ;
- экономически обоснованная и приемлемая стоимость транспортно-экспедиторских услуг, β ;
- затраты на возможные потери груза при перевозке, складировании, перегрузке, обслуживании не должны отражаться на экономическом и конкурентоспособном состоянии грузовладельца, γ ;
- транспортно-экспедиторское обслуживание должно соответствовать договорным и техническим условиям, δ ;
- возможность гибкого подхода к выстраиваемой логистической цепи, ϵ .

Метод развертывания функций качества интересен визуальной реализацией в виде построения матрицы «дом качества» (рис. 2).

Остановимся подробнее на оценке уровня качества предоставляемых транспортно-логистических услуг в конкурентных компаниях (рис. 1). Для этого этапа построения «дома качества» целесообразно привлечение экспертов. При этом при работе команды экспертов можно определить уровень согласованности их мнений, что повысит объективность полученных результатов.

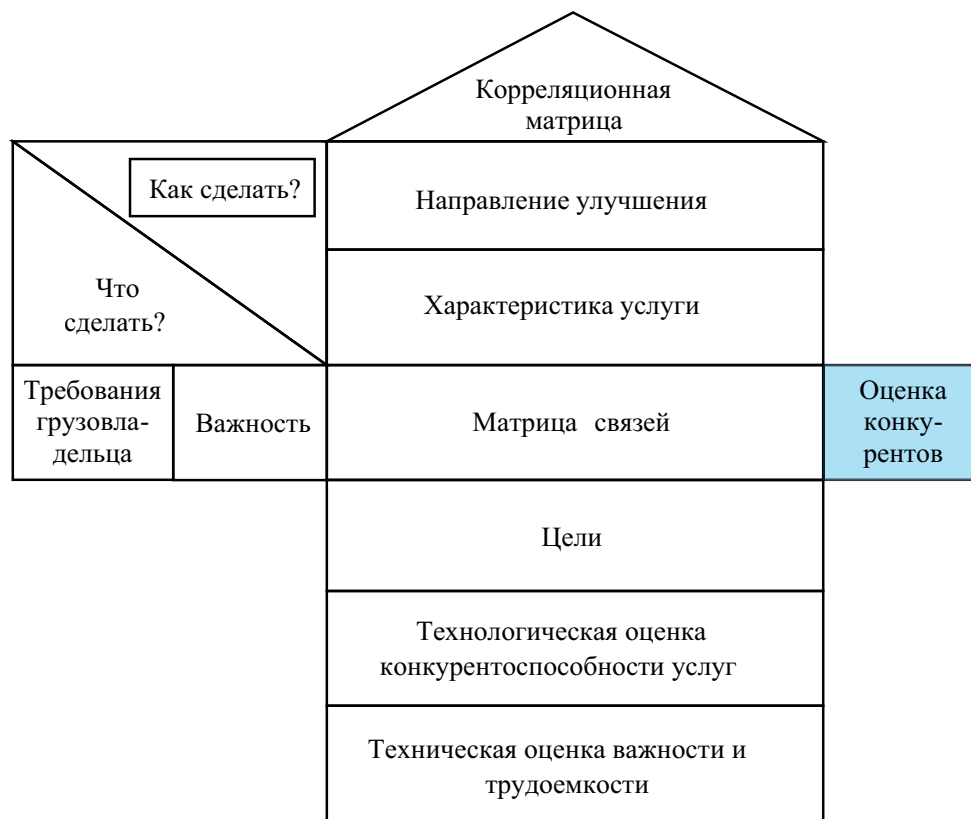


Рис. 2. Дом качества

ТАБЛИЦА 1. Пример экспертного оценивания транспортно-экспедиторской компании

| Транспортно-экспедиторская компания | 1 | 2 | ... | $n-1$ | n | Оценка r_i |
|-------------------------------------|---|---|-----|-------|-----|--------------|
| 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | r_1 |
| 2 | 0 | | 1 | 1 | 1 | r_2 |
| ... | 0 | 0 | | 0 | 0 | r_i |
| $n-1$ | 0 | 0 | 1 | | 0 | r_{n-1} |
| n | 0 | 0 | 1 | 1 | | r_n |

Процедура получения экспертных оценок проходит в несколько этапов:

- организация и проведение опроса;
- обработка результатов опроса и получение оценок весомости;
- анализ результатов;
- оценка и выбор транспортно-экспедиторской компании.

При использовании экспертного метода для оценки качества часто применяется шкала

порядка или ранжированный ряд. При построении шкалы порядка эксперты используют метод попарного сопоставления — это результат работы одного эксперта, оценивающего объекты определенным образом: по заданным параметрам «надежности» α , β , γ , δ и ε . Предпочтение одного объекта перед другим обозначается 1, обратная ситуация — 0. Предположим, что перед экспертом стоит задача выбора i -й транспортно-экспедиторской компании из n возможных (табл. 1)

ТАБЛИЦА 2. Определение суммы квадратов отклонений

| Объект экспертизы (1...n) | Ранжированный ряд j -го эксперта (1...m) | | | | | Сумма ранга R_i | Отклонение от среднего Δ_{R_i} | Квадрат отклонения S_i |
|---------------------------|--|--------------|--------------|------------------|--------------|--|---------------------------------------|---|
| | 1 | 2 | ... | $m-1$ | m | | | |
| 1 | r_{11} | r_{12} | r_{1j} | $r_{1(m-1)}$ | r_{1m} | R_1 | Δ_{R1} | S_1 |
| 2 | r_{21} | r_{22} | r_{2j} | $r_{2(m-1)}$ | r_{2m} | R_2 | Δ_{R2} | S_2 |
| ... | r_{i1} | r_{i2} | r_{ij} | $r_{i(m-1)}$ | r_{im} | R_i | Δ_{Ri} | S_i |
| $n-1$ | $r_{(n-1)1}$ | $r_{(n-1)2}$ | $r_{(n-1)j}$ | $r_{(n-1)(m-1)}$ | $r_{(n-1)m}$ | R_{n-1} | $\Delta_{R(n-1)}$ | $S_{(n-1)}$ |
| n | r_{n1} | r_{n2} | r_{nj} | $r_{n(1-m)}$ | r_{nm} | R_n | Δ_{Rn} | S_n |
| | | | | | | Среднее арифметическое число рангов $\overline{R_i}$ | | Сумма квадратов отклонений $\sum_{i=1}^n S_i$ |

Результатом экспертного оценивания является построение шкалы порядка или ранжированного ряда, где оценки r_i выстраиваются по возрастанию.

При экспертной оценке также возможно формировать экспертные группы, в этом случае проводится проверка согласованности их мнений. Для этого необходимо провести проверку по критерию Фишера гипотезы о принадлежности оценок разных экспертов к одной и той же генеральной совокупности оценок. Согласованность мнения экспертов можно оценивать по величине коэффициента конкордации:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^n S_i}{m^2 (n^3 + n)}, \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^n S_i$ — сумма квадратов отклонений оценок рангов каждого объекта экспертизы от среднего значения; m — число экспертов; n — число объектов экспертизы.

Предварительные расчеты для определения коэффициента конкордации можно представить в виде табл. 2.

Подсчет величины конкордации по формуле (1) позволит определить степень согласованности экспертов в группе. Коэффициент конкордации изменяется в диапазоне $0 < W < 1$, причем 0 соответствует несогласованности, а 1 соответствует

полной согласованности. Таким образом, при построении матрицы дома качества на определенном этапе возможно применение экспертного метода оценки характеристик и параметров конкурирующих транспортно-экспедиторских фирм. Сама матрица дома качества представлена в других публикациях [4, 5].

Применение метода развертывания функций качества в проектировании цепей доставки груза поможет сократить расходы на самых ранних этапах, грузовладельцу и поставщику транспортно-экспедиторских услуг общаться на одном языке. Интеграция экспертного метода при построении дома качества поможет эффективно реализовать этап оценки конкурирующих транспортно-экспедиторских компаний и выбрать приоритетную. При этом работу экспертной группы целесообразно оценить с помощью коэффициента конкордации.

Библиографический список

1. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 80–94.
2. Рынок международной логистики в 2022 — как это будет? — URL: <https://novelco.ru/press-tsentr/rynok-mezhdunarodnoy-logistiki-v-2022-kak-eto-budet/>.

3. Никифорова Г. И. Процессно-логистический подход в управлении перевозками / Г. И. Никифорова, О. Д. Покровская // Железнодорожный транспорт. — 2022. — № 4. — С. 21–23.
4. Салимова Т. А. Управление качеством: учебник по специальности «Менеджмент организации» / Т. А. Салимова. — М.: Омега-Л, 2013. — 376 с.
5. Никифорова Г. И. Исследование логистической цепи доставки груза в условиях выбора транспортно-экспедиторской компании / Г. И. Никифорова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — Т. 18. — № 4. — С. 491–498.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Куренков П. В. Логистика международных интермодальных грузовых перевозок / П. В. Куренков, А. А. Сафронова, Д. Г. Кахриманова // Логистика. — 2018. — № 3(136). — С. 24–27.

Дата поступления: 04.05.2022

Решение о публикации: 22.05.2022

Контактная информация:

НИКИФОРОВА Гузель Ислямовна — канд. техн. наук, доцент; guzel.spb@mail.ru

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

Assessment of the Capabilities of a Freight Forwarding Company When Designing a Cargo Delivery Chain

G. I. Nikiforova, T. G. Sergeeva

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

For citation: Nikiforova G. I., Sergeeva T.G. Assessment of the Capabilities of a Freight Forwarding Company When Designing a Cargo Delivery Chain // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 298–304. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-298-304

Summary

Purpose: To explore the ways to improve the quality of freight forwarding services, to reduce transport constituent in price as well as the possibilities to improve supply chains in modern conditions using quality management methods. To evaluate the possibilities and to select a priority freight forwarding company in accordance with cargo owner requests. To do this, first to analyze the needs of cargo owners for transportation and then to transfer the cargo owner's requests into technical and technological requirements for being provided services with the help of "quality house" matrix. To analyze the possibilities of integration of expert assessment into quality function development methodology. **Methods:** Quality function development method, quality house design, pairwise matching method, order scale design. Calculating procedure for concordance value is presented.

Results: The necessity to transfer cargo owner requests into technical and technological characteristics is shown in order to align the requirements on delivery chain and being provided services. The general provisions for quality house design are presented for the possibility of using the expert method at the stage of evaluation of competing freight forwarding companies. **Practical importance:** The possibility of improving services quality in freight forwarding companies in accordance with cargo owner requirement is shown.

Keywords: Freight forwarding company, cargo delivery chain, quality function development method, expert, pairwise matching method, concordance coefficient.

References

1. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistics transport systems of Russia in the context of new sanctions]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, I. 1, pp. 80-94. (In Russian)
2. *Rynok mezhdunarodnoy logistiki v 2022 — kak eto budet?* [International logistics market in 2022 – how will it be?]. Available at: <https://novelco.ru/press-tsentr/rynok-mezhdunarodnoy-logistiki-v-2022-kak-eto-budet/>. (In Russian)
3. Nikiforova G. I. Protsessno-logisticheskiy podkhod v upravlenii perevozkami [Process and Logistics Approach in Transportation Management]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2022, I. 4, pp. 21-23. (In Russian)
4. Salimova T. A. *Upravlenie kachestvom: uchebnik po spetsial'nosti «Menedzhment organizatsii»* [Quality management: a textbook on the specialty “Management of the organization”]. Moscow: Omega-L Publ., 2013. 376 p. (In Russian)
5. Nikiforova G. I. Issledovanie logisticheskoy tsepi dostavki gruza v usloviyakh vybora transportno-ekspeditorskoy kompanii [Study of the logistics chain of cargo delivery in terms of choosing a freight forwarding company]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the Petersburg University of Communications]. 2021, vol. 18, I. 4, pp. 491-498. (In Russian)
6. 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* [News of the Petersburg University of Communications]. 2020, vol. 17, I. 3, pp. 428-436. (In Russian)
7. Titova T. S., Pokrovskaya O. D. Mezhdistsiplinarnoe polozhenie teorii terminalistiki [Interdisciplinary position of the theory of terminalistics]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the Petersburg University of Communications]. 2018, vol. 15, I. 2, pp. 248-260. (In Russian)
8. 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, vol. 16, I. 3, pp. 449–454. (In Russian)
9. Kurenkov P. V. Logistika mezhdunarodnykh intermodal'nykh gruzovykh perezovok [Logistics of international intermodal freight transportation]. *Logistika* [Logistics]. 2018, I. 3(136), pp. 24–27. (In Russian)

Received: May 04, 2022

Accepted: May 22, 2022

Author's information:

Guzel I. NIKIFOROVA — PhD in Engineering, Associate Professor; guzel.spb@mail.ru
Tatiana G. SERGEEVA — PhD in Engineering, Associate Professor; sergeeva@pgups.ru

УДК 656.01

Транспортно-логистическая система Туркменистана

О. Д. Покровская, З. Н. Ёлдашов, М. А. Марченко, М. В. Шевердова

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

Для цитирования: Покровская О. Д., Ёлдашов З. Н., Марченко М. А., Шевердова М. В. Транспортно-логистическая система Туркменистана // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 305–318. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-305-318

Аннотация

Цель: Провести аналитическое исследование современного состояния транспортно-логистической системы Туркменистана с учетом геополитического положения, включая вопросы развития логистической инфраструктуры, развития международных транспортных коридоров и реализуемых крупномасштабных транспортно-логистических проектов. **Методы:** Применен метод аналитического обзора состояния транспортно-логистической системы Республики Туркменистан. **Результаты исследования:** Дана характеристика развитию видов транспорта, сложившихся торгово-экономических и транспортных связей. Проведен анализ имеющейся логистической инфраструктуры. Установлены ключевые особенности транспортно-логистической системы Туркменистана. Сформулированы перспективные целевые треки развития. **Практическая значимость:** Выполнен аналитический обзор современного состояния, трендов и перспектив развития транспортно-логистической системы Туркменистана. Установлено, что туркменская транспортно-логистическая система работает с грузопотоками почти по всем видам транспорта. Страна развивает инструментарий современной логистики, выстраивая транспортную инфраструктуру, способную составить конкуренцию существующим к настоящему времени объектам, имеет в своем составе систему международных транспортных коридоров и логистических центров мультимодального типа и проводит политику открытого транспортно-логистического пространства и интеграции. По итогам исследования сформулированы ключевые отличительные черты сложившегося облика транспортно-логистической системы, выполнен SWOT-анализ особенностей транспортно-логистической системы, а также перспективные треки ее развития.

Ключевые слова: Транспортно-логистическая система, геополитика, крупномасштабные проекты, логистическая инфраструктура.

Введение. Анализ современного состояния транспортно-логистической системы Туркменистана с учетом геополитического положения страны

Актуальность тематики исследования определяется активизацией товарообменных процессов, ростом объема транзита и реализацией целого ряда проектов логистического строительства в стране. Так, например, только в минувшем 2021 г. в Туркменистане в 3,5 раза увеличился объем транзита международных грузов за 2021 г. Кроме того, на ближайшую перспективу страна амбициозно позиционирует себя как крупнейший транспортно-логистический центр Европы и Азии.

По территории республики, которую именуют «перекрестком семи дорог», исторически следовали многочисленные торговые маршруты, соединяющие торговые системы Востока и Запада. Такие крупномасштабные логистические проекты, как энергетическая магистраль XXI века — газопровод Туркменистан — Китай, а также Туркменистан — Афганистан — Пакистан-Индия, трассы которых соответствуют основной трассе Великого Шелкового пути, свидетельствуют о динамичном развитии транспортно-логистической системы Туркменистана.

Вопросам построения национальных транспортно-логистических систем посвящены работы [1–4]. О значимости рассмотрения проблем рационального управления сложными системами в транспортной логистике свидетельствуют результаты, полученные в работах [5–11]. Вопросам оценивания транспортных систем и складских комплексов посвящены более ранние работы [12–17], в которых рассматривались вопросы международной логистики организации работы транспортных коридоров и их логистической инфраструктуры.

Вместе с тем объективно требуются аналитические исследования текущего состояния инфраструктуры, а также трендов и перспектив

развития транспортно-логистической системы Туркменистана. В экономике страны преобладает сфера услуг и промышленность, что определяет особую роль вопросов транспортно-логистического развития. В свете новых геополитических условий и переориентации как логистических цепей, так и торгово-экономических связей необходимы аналитические исследования изменившегося облика транспортно-логистических систем стран, имеющих стратегически важное значение для организации международного транзита и логистического обслуживания грузовых и товарных потоков.

Целью данной работы является аналитическое исследование современного состояния транспортно-логистической системы Туркменистана с учетом геополитического положения, включая вопросы развития логистической инфраструктуры, развития международных транспортных коридоров и реализуемых крупномасштабных транспортно-логистических проектов.

Для прогрессивного развития транспортно-логистической систем Туркменистана уже сегодня имеются широкие возможности полной реализации транзитного потенциала. Принимая во внимание местоположение Туркменистана с учетом его стратегических преимуществ, на территории государства находятся такие транспортные коридоры, как ТРАСЕКА, ОСЖД VI и X, а также ЦАРЭС II и III.

На сегодняшний день, являясь неотъемлемой частью Великого Шелкового пути, Туркменистан играет существенную роль в его инновационном развитии. Основным приоритетом развития транспортно-логистических систем, формируемых на территории страны, является активизация частного сектора, динамичное развитие финансового сектора и интегрирование в другие государства путем ускорения товарообменных процессов на базе региональной транспортной инфраструктуры. Туркменистан в последние годы наметил

ключевой целью консолидацию Прикаспийских государств в области транспортной инфраструктуры и инициирует трансформацию Каспия в ключевой, мощный транспортно-транзитный узел международного значения, позволяющий стать драйвером развития нового геоэкономического пространства Евразии [18].

О продуктивном участии республики в развитии евроазиатских транспортных связей говорят позиции Туркменистана на Транскаспийском международном транспортном маршруте, маршруте «Лазурит» в части увеличения объема грузовых перевозок при соразмерном наращивании логистических мощностей инфраструктуры портов, терминалов и иных логистических объектов различного масштаба.

Основными треками развития можно назвать модернизацию международного морского порта Туркменбаши, строительство целого ряда внутренних автомобильных и железных дорог, развитие и совершенствование согласно международному стандарту правового обеспечения международных транспортных перевозок.

В таблице представлен перечень из трех наиболее крупных транспортно-логистических проектов, реализуемых Туркменистаном [19].

Импорт грузов с территории Туркменистана включает в себя в первую очередь пригодные для контейнеризации и генеральные грузы (в районе 92 %), что составляет 25 % от всей экспортируемой продукции. Следует отметить неравнозначность экспорта и импорта: так, экспортируемая

часть готовой продукции составляет всего 5 % от общего оборота товаров. В связи с этим в целях реализации наличного экспортного потенциала по готовой продукции, которая пригодна частично или полностью для контейнеризации, следует в дальнейшем привлекать на мощности транспортно-логистической инфраструктуры Туркменистана и западный транзит грузов [20].

Использованием торгового пути, проходящем через Каспийское море из Баку в Туркменбаши, приведет к общей экономии 1400 км пробега наземного транспорта через территорию Ирана. Отметим, что это кратчайший и наиболее оптимальный путь с точки зрения транспортной логистики для автомобильного грузопотока, идущего с государственной территории Турции и стран южного Кавказа в страны Азиатского региона. Туркменбаши — это ключевой транспортный узел, соединяющий железнодорожные магистрали Казахстана, Узбекистана, Китая и других стран.

Туркменистан находится в центре ключевого транспортного коридора между Европой и Азией и неоднократно инициировал крупные международные и региональные транспортно-логистические проекты, направленные на торгово-экономическое сотрудничество и логистическую координацию между странами Центральной Азии и соседними регионами. Дислокация Туркменистана определяет его лидерство как регионального логистического перегрузочного центра со значительным транзитным потенциалом. Так, например, в 2016 г. был открыт 85-километро-

Важнейшие транспортно-логистические проекты Туркменистана [20]

| Название проекта | Год утверждения | Подсектор | Общая стоимость проекта | Финансирование МФО |
|--|-----------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Проект ж/д магистрали «Север—Юг» | 2011 | Железные дороги | 166,7 млн долл. США | 125 млн долл. США (АБР) |
| Проект реконструкции дороги Атамурат—Имамназар | 2002 | Реконструкция дорог | | АБР |
| Развитие порта Туркменбаши | 1997 | Морской транспорт | 39,4 млн ЭКЮ | 27,5 млн ЭКЮ (ЕБРР) |

вый туркменский участок Атамырат — Имамнар — Акина трансгосударственной магистрали Туркменистан — Афганистан — Таджикистан длиной в 600 км.

На территории республики добывается уголь и природный газ, однако недостаточно развита металлургия и производственная сфера товаров широкого потребления. В результате Туркменистан закупает большое количество готовой продукции за рубежом. Примером подобных закупок являются продукты питания; промышленное оборудование; продукты черной металлургии (изделия из чугуна, стали, алюминия), химические средства — удобрения, моющие средства, косметика; лекарственные препараты.

Туркменистан — постоянный экономический партнер России. Россия является четвертым по значимости поставщиком и осваивает порядка 10 % общего объема импорта. Несмотря на отсутствие границы по линии суши, товары довольно хорошо импортируются и экспортируются. В Туркменистане налажено производство хлопка, ткани, нефти и нефтепродуктов, которые затем экспортируют в Российскую Федерацию, а обратно импортируются продовольственные товары и оборудование. Между территориями вышеупомянутых государств имеются в наличии и исправно функционируют все типы путей сообщения [21].

Проведенная руководством страны большая работа по организации новых транспортных коридоров «Узбекистан — Туркменистан — Иран — Оман — Катар» и «Афганистан — Туркменистан — Азербайджан — Грузия — Турция» способствует, в свою очередь, наращиванию внешних связей регионального и континентального масштаба. Туркменистан, таким образом, уже сейчас обладает стратегической системой межконтинентальных железных и автомобильных дорог, а также активно развивающейся транспортно-логистической инфраструктурой.

Характеристика железнодорожной инфраструктуры Туркменистана

В Туркменистане порядка 90 % торговых перевозок осуществляется при помощи железнодорожного транспорта.

В таких условиях роль железнодорожного транспорта на внутреннем транспортном рынке существенно возрастет и трансформируется именно на комбинированном пересечении и комплексном логистическом обслуживании как грузопотоков, поступающих с железной дороги, так и с автомобильного транспорта.

С учетом перспективного роста движения на железнодорожной линии Ашхабада — Дашогуз и с окончанием строительства с последующей подготовкой к вводу в эксплуатацию железнодорожного полигона Туркменистан — Афганистан — Таджикистан комплексное развитие транспортной логистики, позволяющей оптимизировать перевозки как на железнодорожном, так и на автотранспорте, последующее движение к дальнейшему развитию будет придано Марыйскому, Лебапскому и Дашогузскому велятам, что расширит транспортные связи с соседними странами.

Первая железнодорожная линия в Туркменистане была пущена в 1880 г. и имеет стратегическое значение для развития международных отношений. В рамках глобальной программы восстановления Шелкового пути [22] Туркмения согласно железнодорожной стратегии ЦАРЭС по расширению роли железнодорожного транспорта в регионе разработала комплекс мероприятий с целью модернизации и реформы железнодорожного хозяйства страны. Также идет кардинальное обновление подвижного состава, запланированы мероприятия на электрификацию железной дороги.

С 1992 г. Положением «О Туркменской железной дороге» железная дорога Туркменистана определена единым производственно-хозяйственным комплексом, действующим на полном хозяй-

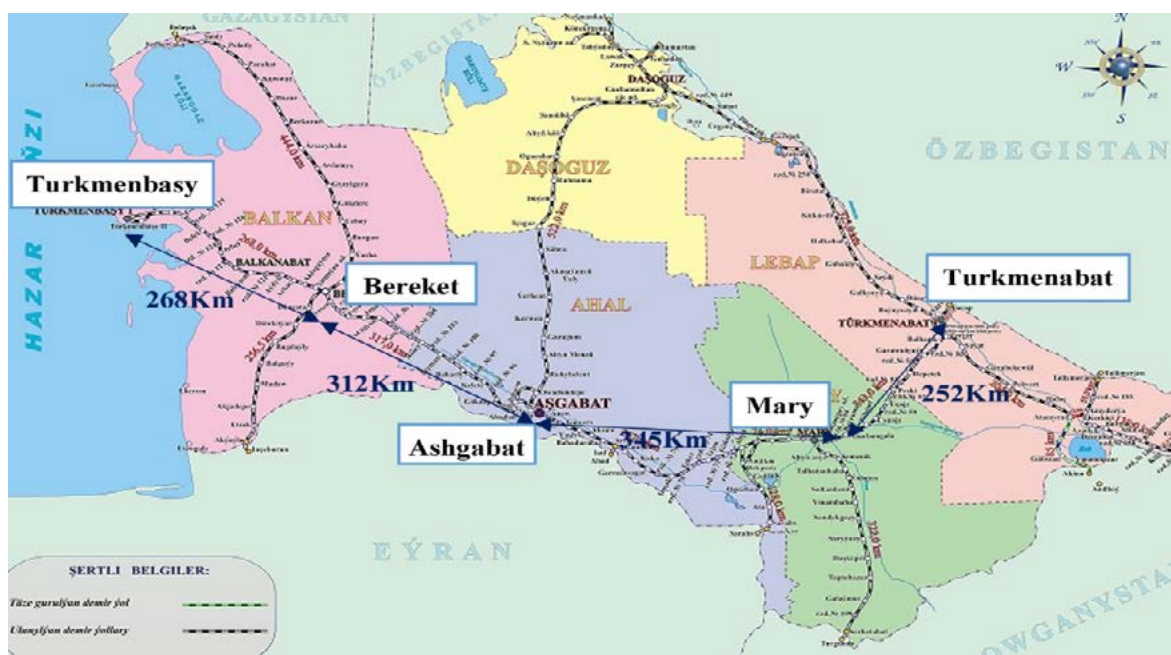


Рис. 1. Железнодорожная сеть Туркменистана

ственном расчете и самофинансировании, включающим экономические методы управления.

В 2017 г. одиннадцать стран — членов программы Центрально-Азиатского регионального экономического содружества (ЦАРЭС) — Китай, Афганистан, Грузия, Казахстан, Таджикистан, Кыргызстан, Азербайджан, Монголия, Пакистан, Узбекистан и Туркменистан — утвердили железнодорожную стратегию ЦАРЭС с целью расширения роли железнодорожного транспорта в регионе. Данная Стратегия направлена на ускорение выявления, подготовку и финансирование железнодорожных инвестиционных проектов и реформу железных дорог и повышения эффективности. В рамках Стратегии проводятся оценка и поддержка в исследовании рынка железнодорожного транспорта, обмен знаниями, а также реформирование и коммерциализация. В 2018 г. Азиатский банк развития утвердил проект региональной технической помощи на сумму 2 млн долларов США для помощи странам ЦАРЭС в реализации железнодорожной стратегии, а также совместно с Фондом сокращения бедности и регионального сотрудничества КНР, Фондом Сое-

диненного Королевства для азиатской региональной торговли и установления связей.

Туркменистан расположен на берегу Каспийского моря и имеет границы по суше с Афганистаном, Ираном, Казахстаном и Узбекистаном, а также через каспийское судоходство — с Азербайджаном, Ираном, Казахстаном и Россией. Туркменистан — это самая малонаселенная страна в Азии с населением 5,85 миллионов человек (2018 г.), 80 % которой составляют пустыни.

После распада СССР железнодорожная сеть Туркменистана претерпела некоторые изменения, построив новые ветки: от Теджена до границы с Ираном в Сарахе (1996), Ашхабад — Дашогуз до Узбекистана возле Нукуса (2006), ж/д коридор Север — Юг вдоль восточной стороны Каспийского моря от Акяйлы на границе с Ираном через Берекет до Серхетяки на границе с Казахстаном и далее с РФ (2014), от Керки (Атамурат) до афганской границы в Имамназаре и через границу до Акины в Афганистане (2016) и 2000 км сообщение внутри Афганистана от границы в Серхетабаде до Тургунди (2018) (рис. 1)



Рис. 2. Железнодорожный вокзал Ашхабада

Агентство *Türkmen demiryollary* (Туркменские железные дороги) как в большинстве стран имеет государственное управление, главный офис которого находится в Ашхабаде. Ширина колеи составляет 1520 мм как на территории всего бывшего Советского Союза, так как строительство железной дороги в Туркменистане началось в 1880 г. Российской Империей. С 1955 г. весь железнодорожный транспорт был переведен на тепловозную тягу.

Общая протяженность железных дорог Туркменистана — 3550,9 км, и в настоящий момент нет электрифицированных дорог, только одна частично двухпутная линия — Туркменабад (Чарджоу) — Ашхабад — Туркменбаши (Красноводск).

Крупным железнодорожным узлом Туркменистана является станция Берекет, построенная в 1885 г., которая является важным стратегическим узлом на Транскаспийской магистрали (Каспийское море — Туркменистан — Узбекистан — Казахстан) и Транснациональной магистрали Север — Юг (Россия — Казахстан — Туркменистан — Иран — Персидский залив) [23].

Всего в Туркменистане на сегодняшний день насчитывается 231 железнодорожная станция. Крупнейшим центром пассажирского сообщения является вокзал столицы страны, Ашхабада (рис. 2).

Инвестиционные проекты в железнодорожном секторе Туркменистана

В рамках глобальной проектной разработки «Один пояс — один путь», инициированного КНР, разработана программа по развитию и модернизации железнодорожной индустрии страны. Инвестиционные проекты направлены на реконструкцию, модернизацию железнодорожной инфраструктуры, закупку нового высокоскоростного транспорта.

В настоящий момент ведется строительство нового моста на 4875-м километре железной дороги (между развязкой 112 и станцией Узынсу) Берекет Балканского велаята, который будет отличаться высокой пропускной способностью, сейсмостойкостью, что немаловажно для этих мест, и надежностью, что позволит увеличить проходимость и скорость.

Планируется строительство водопропускных современных труб на ж/д Иары — Серхетабат и моста через реку Кушка на границе с Афганистаном для увеличения пропускной способности по направлению Афганистан — Туркменистан — Азербайджан — Грузия — Турция — Европа, которая повысит секционную скорость поездов.

Важной задачей является электрификация железной дороги Туркменистана, для которой разработан комплекс мероприятий, первым эта-

пом которых будет проводиться модернизация и электрификация участка Ашхабад — Душак.

Первый контейнерный поезд, следующий из Туркменистана в Китай, успешно прошел через Казахстан и добрался до пункта назначения [24].

Железнодорожный состав из 42 сорокафутовых контейнеров, груженный гипсом, стартовал со станции Акяйла (Туркменистан), после чего пересек территорию Казахстана, преодолев расстояние в 4150 км до границы с Китаем. На прохождение казахстанского участка данного маршрута, который пролегает от пограничных переходов Серхетяка — Болашак до Алтынколь — Хоргос и составляет 3450 км, отводилось 5 дней пути.

Над упомянутой разработкой работали такие крупные корпорации, как ОАО «Транспортно-логистический центр Туркменистан» и АО «KTZ Express» по согласованию с китайскими коллегами.

Запуск контейнерной линии из Туркменистана в Китай удалось реализовать за счет усилий железнодорожного полигона «Казахстан — Туркменистан — Иран», который находится в составе одной из веток международного транспортного коридора «Север — Юг», работающего с 2014 г.

Характеристика элементов мультимодальной транспортно-логистической системы Туркменистана

Важными логистическими объектами авиатранспорта стали международные аэропорты в Ашхабаде и велятских центрах. Новый аэровокзальный комплекс в Туркменбаши обладает развитой, современной инфраструктурой автомобильных и железных дорог.

Туркменистан играет ключевую роль при устойчивом, стабильном обеспечении энергоресурсами соседних государств.

Занимая четвертое место в мире по запасам природного газа, транспортно-логистическая

система Туркменистана обеспечивает стабильную и надежную поставку потребителям углеводородного сырья, содействует энергоэффективности и снижению воздействий вредных веществ в атмосферу.

В стране ведется диверсификация транспортной инфраструктуры, которая обеспечит доставку энергоресурсов на международные рынки путем создания разветвленной и многовариантной трубопроводной системы, что направлено на расширение географии экспортных маршрутов поставок энергоносителей на мировые рынки. Глобальное значение имеет проект строительства магистрального газопровода Туркменистан — Афганистан — Пакистан — Индия для укрепления энергобезопасности и экономической стабильности в регионе, что сформирует инфраструктурные условия развития международного сотрудничества в Азии.

На трубопроводном транспорте также идет развитие, в частности, кольцевой сети газовых месторождений страны, в рамках которой работает газопровод Запад — Восток для распределения добываемого природного газа, диверсификации экспортных логистических схем и более рационального внутреннего газопотребления в стране и регионе Каспия. Уже сейчас трубопроводный транспорт Туркмении является ключевым транспортно-логистическим звеном для мультимодальных систем доставки. Например, типичная логистическая схема может выглядеть так: транспортировка газа путем трубопроводного транспорта к газоперерабатывающим предприятиям и электростанциям — производство продукции поставки потребителям продуктов переработки газа (бензин, дизтопливо, полипропилен, электроэнергия) как железнодорожным, морским, автотранспортом, так и по линиям электропередач.

Автомобильный транспорт в Туркменистане имеет хорошо развитую инфраструктуру относи-

тельно прочих восточноазиатских стран, активно ведется строительство новых автомобильных дорог. Для транзита зачастую используется Азербайджан, Иран. Из России (Екатеринбург, Новосибирск) автомобильные маршруты идут транзитом через Казахстан.

Суммарная протяженность автомобильной сети автомобильных дорог Туркменистана равняется 24 000 км [20].

В Туркмении в настоящее время функционируют 4 аэропорта международного уровня, крупнейшими являются Туркменбаши и Ашхабад.

В сфере морских перевозок есть возможность напрямую через территорию прочих государств производить доставку груза контрагенту через Каспийское море, находящееся между Россией и Туркменией, но подобный способ транспортировки пользуется меньшей популярностью. Данная проблема возникает вследствие слабого развития портовой инфраструктуры Туркмении. У российских контрагентов при поставках готовой продукции наиболее часто возникают следующие проблемы: 1) большие интервалы в сообщении, до месяца и более; 2) отсутствие срочного бронирования; 3) сложности в процессе заключения договора фрахтования юридического характера [21].

В сфере морского транспорта ведущее место занимает расширение логистической функциональности международного морского порта Туркменбаши.

Данный порт находится на «перекрестке» потоков готовой продукции, которая следует из государств Европы в Азиатские страны и обратным материальным потоком, и при этом является так называемым гейтвеем — «морскими воротами» государств Центральной Азии. Как ключевое звено такого международного торгового коридора, как ТРАСЕКА, порт имеет множество транспортных связей с инфраструктурой железных и автомобильных дорог и является стратегически важным узлом в процессе следования во

многие государства Средней Азии и обратно и на Транскаспийской железной дороге.

Новейшая транспортная инфраструктура портового комплекса делает возможным оказание контрагентам разнообразных услуг на уровне международных стандартов, стремительное увеличение функционирования Международного морского порта города Туркменбаши [19].

Облик транспортно-логистической системы Туркменистана

Таким образом, туркменская транспортно-логистическая система работает с грузопотоками почти по всем видам транспорта.

Проводя политику открытого транспортно-логистического пространства и интеграции, страна развивает инструментарий современной логистики, выстраивая транспортную инфраструктуру, частью которой являются логистические центры мультимодального типа и транспортные коридоры.

Точкой роста комплексных транспортно-логистических услуг, драйвером развития транспортно-логистической системы страны в целом выступает мультимодальный логопарк на базе международного морского порта Туркменбаши. Развитая логистическая инфраструктура порта уже сейчас создает конкурентоспособные условия для экспортно-импортной активности региона.

Стратегическим для транспортно-логистической системы Туркменистана является Прикаспийский регион, в котором находится международный морской порт Туркменбаши с опорным для логистической инфраструктуры страны и пролегающих по ее территории международных транспортных коридоров, а также и непосредственно мультимодальный логистический центр. В этом центре будут аккумулироваться потоки готовой продукции морского, автомобильного, железнодорожного, авиационного и трубопроводного видов транспорта, обрабатываться

международные, сыпучие, наливные экспортно-импортные и транзитные контейнерные грузы.

Значительная часть перевозок проходит по направлениям до Ашхабада (как до ключевого промышленного и экономического центра страны), затем по приоритетности для грузовладельцев — Туркменобат. Перечисленные логистические объекты работают, как правило, со сборными грузами с последующим распределением по территории страны, активно идет и прямая доставка до Мары, Балканабата, Туркменбаши [25].

Дальнейшее включение Туркменистана в международные организации и последующее с ними сотрудничество определит генерацию мультипликативного эффекта в плане привлечения иностранных инвестиций в сегмент транспортной логистики страны, увеличения размера транзитных грузопотоков, цифровизации и стандартизации транспортной индустрии.

По оценкам экспертов, в ближайшем будущем туркменская терминальная сеть, состоящая из целого ряда перевалочных терминалов, станет ключевым звеном в международной доставке грузов и товаров по наиболее коротким и выгодным транзитным маршрутам.

SWOT-анализ особенностей транспортно-логистической системы Туркменистана

Ниже представлены основные результаты проведенного SWOT-анализа.

Сильные стороны:

- государство состоит в региональных и международных организациях;
- подписано соглашение, подразумевающее активное международное железнодорожное грузовое сообщение;
- наличие 6 подписанных конвенций ЕЭК ООН касательно транспорта;
- большое количество проектов в сфере модернизации транспортно-логистической инфраструктуры.

Слабые стороны:

- отсутствие основных международных конвенций и правовых инструментов в сфере транспортной логистики;
- полное отсутствие определенности касательно утвержденных правил реализации реформ по упрощению и модернизации оформления таможенных документов;
- отсутствие приспособленности пограничных пунктов к осваиваемым объемам транспортных потоков;
- полное отсутствие доверия между агентствами и таможенными службами в области оптимизации процедур торговли и частным сектором;
- большая трудоемкость и длительность оформления перевозочной документации;
- отсутствие цифровой системы представления электронных экспортных и импортных деклараций.

Возможности:

- комплексная реализация стратегии оптимизации транзита и торговли;
- увеличение торговых связей;
- усиление геополитических позиций в сегменте транзитных перевозок;
- рациональная загрузка перегрузочных и логистических мощностей национальной транспортной системы.

Угрозы:

- отсутствие решительности касательно устранения проблем интеграции в международные конвенции по транспорту и торговле;
- увеличение задержек и, соответственно, затрат в связи с несовместимыми решениями пограничных ведомств;
- задержки в реализации цифровых улучшений процедур перегрузки в портовых и терминальных комплексах.

Перспективные треки развития транспортно-логистической системы Туркменистана

По результатам проведенного исследования можно определить следующие треки дальнейшего развития транспортно-логистической системы Туркменистана:

1. Новая геополитическая ситуация трансформирует облик установившихся транспортно-логистических маршрутов, проходящих по территории Туркменистана, и выступает в роли катализатора поиска новых альтернативных маршрутов.

2. Наблюдаемое в настоящее время оживление на транспортно-логистическом рынке Туркменистана определяет необходимость соразмерного темпам наращивания международного транзита и развития соответствующей терминально-логистической инфраструктуры, способной обеспечить соответствующие размеры грузопереработки, в том числе — в мультимодальных системах доставки.

3. Насущной и острой необходимостью является скорейшая цифровизация транспортного сектора, в первую очередь — таможенного документооборота для ускорения прохождения пограничных процедур.

4. Основным направлением совершенствования транспортно-логистической системы является рациональная загрузка перегрузочных и логистических мощностей для обслуживания международного транзита.

5. Наращивание внешних связей регионального и континентального масштаба с наиболее полным использованием транзитного потенциала страны, стратегически важных логистических объектов и оптимальной загрузкой инфраструктуры.

6. Дальнейшая ориентация транспортно-логистической системы Туркменистана на обслуживание мультимодальных грузопотоков, комплексное логистическое обслуживание и на

трансформацию логистических цепей с учетом перенаправления ряда грузовых и товарных потоков в свете геополитических изменений.

Заключение

На основе выполненной работы возможно сделать выводы, свидетельствующие об активном формировании в Республике Туркменистан собственной открытой транспортно-логистической системы, дальнейшее развитие которой будет гарантом эффективного развития евразийского товарообмена. Туркменистан имеет значительный энергетический и природно-ресурсный потенциал, уникальные транспортные коммуникации и играет ключевую роль в евразийской геополитике, поэтому реализуемые им логистические масштабные проекты являются фактором обеспечения стабильности на Евразийском континенте.

Следует также отметить, что транспортно-логистическая инфраструктура позволяет реализовывать оптимальные решения на территории государства, а также на территориях сопредельных государств оптимальных логистических схем с учетом требуемых параметров, с применением собственной развитой терминальной сети на условиях гарантии безопасности, обеспеченной политической и экономической стабильностью рынка.

Ключевыми точками роста выступают мультимодальные транспортно-логистические объекты в центрах тяготения к маршрутам международных транспортных коридоров, инфраструктуру которых можно рассматривать как логистический каркас терминальной сети Туркменистана.

Библиографический список

1. Rozin M. Stereotypes of Transport Logistics in Geopolitical Analytics / M. Rozin, V. Ryabtsev, V. Svechkarev // *Transportation Research Procedia*. — 2022. — Vol. 61. — Pp. 285–288. — ISSN 2352-1465. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.047>.

2. Hickson A. Supply chain intermediaries study / A. Hickson, B. Wirth, G. Morales. — University of Manitoba Transport Institute, 2008. — 56 p.
3. Бауэрсокс Д. Д. Логистика: интегрированная цепь поставок / Д. Д. Бауэрсокс, Д. Д. Клосс. — М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2010. — 640 с.
4. MHL Staff. How Will Industry 4.0 Affect the Supply Chain? — Sep 16, 2015. — URL: <http://mhlnews.com/global-supply-chain/how-will-industry-40-affectsupply-chain> (дата обращения: 02.05.2022).
5. Куренков П. В. Внешнеторговые перевозки в смешанном сообщении: экономика, логистика, управление / П. В. Куренков, А. Ф. Котляренко. — Самара: СамГАПС, 2003. — 636 с.
6. Куренков П. В. Концептуально новая транспортно-технологическая система работы с контейнерами на транспорте / П. В. Куренков, О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева // Бюллетень транспортной информации. — 2009. — № 1(163). — С. 22–25.
7. Куренков П. В. Задачи ситуационно-процессного управления сортировочной станцией / П. В. Куренков, М. А. Нехаев // Железнодорожный транспорт. — 2012. — № 4. — С. 29–31.
8. Куренков П. В. Моделирование работы сортировочной станции в интеллектуальной системе управления перевозками / П. В. Куренков, М. А. Нехаев // Железнодорожный транспорт. — 2012. — № 9. — С. 20–22.
9. Куренков П. В. Синхромодальные и КО-модальные перевозки, А-модальный букинг и тримодальные терминалы как перспективные направления развития транспортной логистики / П. В. Куренков, Д. А. Преображенский, А. В. Астафьев и др. // Логистика. — 2018. — № 12. — С. 34–39.
10. Куренков П. В. Инфраструктура железных дорог России и регулирование вагонных парков / П. В. Куренков, Ф. И. Хусаинов // Экономика железных дорог. — 2013. — № 9. — С. 35–48.
11. Мохонько В. П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // Транспорт: наука, техника, управление: сб. ОИ ВИНТИ. — 2004. — № 11. — С. 14–16.
12. Покровская О. Д. Формирование терминальной сети региона для организации перевозок грузов: научная монография / О. Д. Покровская. — М., 2012. — 189 с.
13. Pokrovskaya O. Evolutionary-Functional Approach to Transport Hubs Classification / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2020. — Vol. 982. — Pp. 356–365.
14. 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.
15. Покровская О. Д. Международная логистика Транссибирской магистрали: использование транзитного потенциала России / О. Д. Покровская, В. М. Самуйлов // Инновационный транспорт. — 2016. — № 3(21). — С. 3–7.
16. Покровская О. Д. Определение параметров терминальной сети региона (на примере Кемеровской области) / О. Д. Покровская // Транспорт Урала. — 2012. — № 1(32). — С. 93–97.
17. Покровская О. Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России / О. Д. Покровская // Инновационный транспорт. — 2015. — № 1(15). — С. 13–23.
18. Туркменистан — сердце Великого Шелкового пути. — URL: <https://turkmenportal.com/blog/13091/turkmenistan--serdce-velikogo-shelkovogo-puti> (дата обращения: 02.05.2022).
19. Туркменистан становится важным звеном в транспортно-логистической системе региона. — URL: <https://turkmenportal.com/blog/20601/sahra-amanova-turkmenistan-stanovitsya-vazhnym-zvenom-v-transportnologisticheskoi-sisteme-regiona> (дата обращения: 02.05.2022).
20. Логистические процессы и морские магистрали II. Проект мастер-плана «LOGMOS». Обзор страны. — URL: http://www.traceca-org.org/fileadmin/fm-dam/TAREP/65ta/Master_Plan/MPA9.1TMRU.pdf (дата обращения: 02.05.2022).
21. Грузоперевозки между Россией и Туркменистаном. — URL: <https://sbcargo.ru/poleznaya-informatsiya/gruzoperevozki-mezhdu-rossiey-i-turkmenistanom> (дата обращения: 02.05.2022).

22. Самуйлов В. М. Концепция «Новый шелковый путь» (Китай, Россия, Германия) / В. М. Самуйлов, О. Д. Покровская, Ц. Цяо // *Инновационный транспорт*. — 2017. — № 4(26). — С. 26–28. — ISSN 2311–164X.

23. «Turkmenemiryollary»: investments in infrastructure. — URL: <https://turkmenistan.gov.tm/en/post/61366/turkmenemiryollary-investments-infrastructure> (дата обращения: 02.05.2022).

24. Из Туркменистана в Китай через Казахстан прибыл первый контейнерный поезд. — URL: <https://turkmenportal.com/blog/45547/iz-turkmenistana-v-kitai-cherez-kazahstan-pribyl-pervyi-konteinernyi-poezd> (дата обращения: 02.05.2022).

25. Туркменистан развивает современную систему логистики — эксперт. — URL: <https://sng.today/>

ashkhabad/7256-turkmenistan-razvivaet-sovremennuyu-sistemu-logistiki-ekspert.html (дата обращения: 02.05.2022).

Дата поступления: 02.05.2022

Решение о публикации: 18.05.2022

Контактная информация:

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна — д-р техн. наук, и. о. заведующего кафедрой «Управление эксплуатационной работой»; pokrovskaya@pgups.ru

ЁЛДАШОВ Зыярат Наркулыевич — студент

МАРЧЕНКО Максим Александрович — аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой»

ШЕВЕРДОВА Мария Вячеславовна — аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой»

Transport and Logistics System of Turkmenistan

O. D. Pokrovskaya, Z. N. Eldashov, M. A. Marchenko, M. V. Sheverdova

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

For citation: Pokrovskaya O. D., Eldashov Z. N., Marchenko M. A., Sheverdova M. V. Transport and Logistics System of Turkmenistan // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 305–318. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-305-318

Summary

Purpose: To conduct an analytical study of the current state of Turkmenistan transport and logistics system, taking into account the geopolitical situation, including the questions of the development of logistics infrastructure and international transport corridors and ongoing large-scale transport-logistics projects. **Methods:** The method of analytical review of the state of transport and logistics system of the Republic of Turkmenistan is applied. **Results:** The characterization of the development of transport modes, of established trade-economic and transport links is given. The analysis of existing logistics infrastructure is carried out. The key features of Turkmenistan transport and logistics system are established. Promising target development tracks are formulated. **Practical significance:** An analytical review of the current state, trends and prospects for the development of Turkmenistan transport and logistics system has been carried out. It has been established that Turkmen transport and logistics system works with cargo flows through almost all transport modes. The country develops modern logistics tools, building modern competitive transport macrostructure, which includes the system of international transport corridors and multimodal type logistics centers, and pursues policy of open transport-logistic space and integration. Based on the study results, the key distinctive features of transport-logistic system existing image were formulated, SWOT analysis of transport-logistics system features was performed, as well as promising tracks of the system development were defined.

Keywords: Transport-logistics system, geopolitics, large-scale projects, logistic infrastructure.

References

1. Rozin M., Ryabtsev V., Svechkarev V. Stereotypes of Transport Logistics in Geopolitical Analytics. *Transportation Research Procedia*, Vol. 61, 2022, pp. 285-288. ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.047>.
2. Hickson A., Wirth B., Morales G. Supply chain intermediaries study, University of Manitoba Transport Institute, 2008. 56 p.
3. Bauersoks D. D., Kloss D. D. *Logistika: integrirovannaya tsep' postavok* [Logistics: integrated supply chain]. Moscow: «Olimp-Biznes» Publ., 2010. 640 p. (In Russian)
4. MH&L Staff. How Will Industry 4.0 Affect the Supply Chain? Sep 16, 2015. Available at: <http://mhlnews.com/global-supply-chain/how-will-industry-40-affectsupply-chain>. (accessed: May 02, 2022).
5. Kurenkov P. V., Kotlyarenko A. F. *Vneshnetorgovye perevozki v smeshannom soobshchenii: ekonomika, logistika, upravlenie* [Foreign trade transportation in mixed traffic: economics, logistics, management]. Samara: SamGAPS Publ., 2003. 636 p. (In Russian)
6. Kurenkov P. V., Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E. Kontseptual'no novaya transportno-tehnologicheskaya sistema raboty s konteynerami na transporte [Conceptually new transport and technological system for working with containers in transport]. *Byulleten' transportnoy informatsii* [Bulletin of transport information.]. 2009, I. 1 (163), pp. 22-25. (In Russian)
7. Kurenkov P. V., Nekhaev M. A. Zadachi situatsionno-protsessnogo upravleniya sortirovochnoy stantsii [Problems of situational-process management of a marshalling yard]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2012, I. 4, pp. 29-31. (In Russian)
8. Kurenkov P. V., Nekhaev M. A. Modelirovanie raboty sortirovochnoy stantsii v intellektual'noy sisteme upravleniya perevozkami [Modeling of marshalling yard operation in an intelligent transportation management system]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2012, I. 9, pp. 20-22. (In Russian)
9. Kurenkov P. V., Preobrazhenskiy D. A., Astaf'ev A. V., Safronova A. A., Kakhrianova D. G. Sinkhromodal'nye i KO-modal'nye perevozki, A-modal'nyy buking i trimodal'nye terminaly kak perspektivnye napravleniya razvitiya transportnoy logistiki [Synchronomodal and CO-modal transportation, A-modal booking and trimodal terminals as promising areas for the development of transport logistics]. *Logistika* [Logistics]. 2018, I. 12, pp. 34-39. (In Russian)
10. Kurenkov P. V., Khusainov F. I. Infrastruktura zheleznikh dorog Rossii i regulirovanie vagonnykh parkov [Infrastructure of Russian Railways and Regulation of Carriage Facility]. *Ekonomika zheleznikh dorog* [Economics of Railways]. 2013, I. 9, pp. 35-48. (In Russian)
11. Mokhon'ko V. P., Isakov V.S., Kurenkov P. V. Situatsionnoe upravlenie perevozhnym protsessom [Situational management of the transportation process]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management]. VINITI Publ. 2004, I. 11, pp. 14-16. (In Russian)
12. Pokrovskaya O. D. *Formirovanie terminal'noy seti regiona dlya organizatsii perevozk gruzov* [Forming the terminal network of the region for the organization of cargo transportation]. Moscow, 2012. 189 p. (In Russian)
13. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Evolutionary-functional approach to transport hubs classification // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 982, pp. 356-365.
14. Titova T. S., Pokrovskaya O. D. Mezhdistsiplinarnoe polozhenie teorii terminalistiki [Interdisciplinary status of the theory of terminalistics]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. 2018, vol. 15, I. 2, pp. 248-260. (In Russian)
15. Pokrovskaya O. D., Samuylov V. M. Mezhdunarodnaya logistika transsibirskoy magistrali: ispol'zovanie tranzitno potentsiala rossii [International logistics of the transsiberian line: use of the transit potential of russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2016, I. 3 (21), pp. 3-7. (In Russian)
16. Pokrovskaya O. D. Opredelenie parametrov terminal'noy seti regiona (na primere kemerovskoy oblasti) [Determination of the parameters of the regional terminal network (by the example of the kemerovsk region)]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2012, I. 1 (32), pp. 93-97. (In Russian)

17. Pokrovskaya O. D. Sostoyanie transportno-logisticheskoy infrastruktury dlya ugol'nykh perevozok v rossii [State of transport and logistics infrastructure for coal transportation in russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2015, I. 1 (15), pp. 13-23. (In Russian)

18. *Turkmenistan – serdtse Velikogo Shelkovogo puti* [Turkmenistan is the heart of the Great Silk Road]. Available at: <https://turkmenportal.com/blog/13091/turkmenistan--serdtse-velikogo-shelkovogo-puti>. (accessed: May 02, 2022). (in Russian)

19. *Turkmenistan stanovitsya vazhnym zvenom v transportno-logisticheskoy sisteme regiona* [Turkmenistan is becoming an important link in the transport and logistics system of the region]. Available at: <https://turkmenportal.com/blog/20601/sahra-amanova-turkmenistan-stanovitsya-vazhnym-zvenom-v-transportnologisticheskoi-sisteme-regiona> (accessed: May 02, 2022). (In Russian)

20. *Logisticheskie protsessy i morskije magistrali II. Proekt master-plana «LOGMOS». Obzor strany* [Logistics processes and motorways of the sea II. Draft master plan “LOGMOS”. Country overview]. Available at: http://www.traceca-org.org/fileadmin/fm-dam/TAREP/65ta/Master_Plan/MPA9.1TMRU.pdf. (accessed: May 02, 2022). (In Russian)

21. *Gruzoperevozki mezhdru Rossiey i Turkmenistanom* [Cargo transportation between Russia and Turkmenistan]. Available at: <https://sbcargo.ru/poleznaya-informatsiya/gruzoperevozki-mezhdru-rossiey-i-turkmenistanom>. (accessed: May 02, 2022). (In Russian)

22. Samuylov V. M., Pokrovskaya O. D., Tsyao Ts. Kontseptsiya «Novyy shelkovyy put'» (Kitay, Rossiya,

Germaniya) [The concept of the “New Silk Road” (China, Russia, Germany)]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2017, I. 4 (26), pp. 26–28. (In Russian)

23. «Turkmenemiryollary»: investments in infrastructure [Elektronnyy resurs]. Available at: <https://turkmenistan.gov.tm/en/post/61366/turkmenemiryollary-investments-infrastructure>. (accessed: May 02, 2022).

24. *Iz Turkmenistana v Kitay cherez Kazakhstan pribyl pervyy konteynernyy poezd* [The first container train arrived from Turkmenistan to China through Kazakhstan]. Available at: <https://turkmenportal.com/blog/45547/iz-turkmenistana-v-kitai-cherez-kazakhstan-pribyl-pervyi-konteyneryi-poezd>. (accessed: May 02, 2022). (In Russian)

25. *Turkmenistan razvivaet sovremennuyu sistemu logistiki – ekspert* [Turkmenistan develops a modern logistics system - expert]. Available at: <https://sng.today/ashkhabad/7256-turkmenistan-razvivaet-sovremennuyu-sistemu-logistiki-ekspert.html> (accessed: May 02, 2022). (In Russian)

Received: May 02, 2022

Accepted: May 18, 2022

Author's information:

Oksana D. POKROVSKAYA — D. Sci. in Engineering, Acting Head of the Department “Operational Work Management”; pokrovskaya@pgups.ru

Ziyarat N. ELDASHOV — Student

Maxim A. MARCHENKO — Postgraduate Student of the Department “Operational Work Management”

Maria V. SHEVERDOVA, Postgraduate Student of the Department “Operational Work Management”

УДК 556.54(98)

Подготовка изданий Водного кадастра по Арктической зоне Российской Федерации как составляющая обеспечения техносферной безопасности

М. В. Третьяков, А. А. Пискун, Р. А. Терехова

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Российская Федерация, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

Для цитирования: Третьяков М. В., Пискун А. А., Терехова Р. А. Подготовка изданий Водного кадастра по Арктической зоне Российской Федерации как составляющая обеспечения техносферной безопасности // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 319–332. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-319-332

Аннотация

Цель: Оценить состояние и выявить проблемы подготовки материалов к изданию Водного кадастра по Арктической зоне Российской Федерации. **Методы:** Анализ сведений, поступающих в Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт из Мурманского, Северного, Обь-Иртышского, Среднесибирского, Якутского и Чукотского управлений гидрометеослужбы. **Результаты:** Показано, что состояние подготовки изданий Водного кадастра и качество публикуемых наблюдений на территории Арктической зоны РФ не отвечают установленным нормативным требованиям. Это негативно сказывается на результатах инженерных расчетов при гидрологическом обеспечении хозяйственной деятельности в регионе и, как следствие, может понизить уровень техносферной безопасности в Арктике. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволили сформулировать требования для повышения эффективности работ по подготовке изданий Водного кадастра на водных объектах Арктической зоны РФ.

Ключевые слова: Техносферная безопасность, водные объекты, гидрологические наблюдения, Арктическая зона, гидрологические данные, Водный кадастр, подготовка изданий, мостовые переходы.

Введение

Решение социальных, экономических, инфраструктурных задач в Российской Арктике требует реализация масштабных инвестиционных проектов. В частности, одним из таких проектов, имеющих ключевое значение для Арктики, является создание Северного широтного хода — железной дороги в Ямало-Ненецком автономном округе по маршруту Обская — Салехард — Надым — Новый

Уренгой — Коротчаево. Реализация подобных проектов неминуемо сталкивается с необходимостью строительства и эксплуатации различных сооружений на поверхностных водных объектах, главным образом мостовых переходов. Кроме этого, необходимо решать вопросы безопасности систем водозабора и сброса сточных вод от хозяйственной деятельности, объектов береговой линии и гидротехнических сооружений, раз-

ведки и добычи полезных ископаемых, судоходства. Обеспечение техносферной безопасности на поверхностных водных объектах напрямую связано с наличием качественной информации о гидрологическом режиме этого водного объекта. При строительстве железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки до начала изыскательских работ производят сбор и изучение материалов, содержащих сведения о режиме пересекаемой реки и районе перехода [1].

Гидрологический режим рек Российской Федерации изучают на стационарной сети постов и станций Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Росгидромету подчинены региональные управления гидрометеослужбы (УГМС), а им — местные центры по гидрометеорологии и разветвленная сеть гидрометеостанций и постов. В систему Росгидромета входят научно-исследовательские учреждения, которые осуществляют научно-методическое руководство работами в УГМС. Материалы наблюдений на сети Росгидромета приводятся в различных изданиях Водного кадастра (ранее Государственного водного кадастра — ГВК).

Вопросы подготовки изданий Водного кадастра РФ регулируются Водным кодексом РФ, директивными документами Министерств и ведомств Правительства РФ, нормативно-методическими документами Росгидромета [2–28].

В соответствии с утвержденной структурой публикуемой части Водного кадастра Российской Федерации на Росгидромет возложены функции по подготовке и публикации изданий раздела 1 «Поверхностные воды» и объединенного издания «Водные ресурсы и их использование» [13].

Указом президента РФ от 2 мая 2014 г. № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» (с дополнениями 2017 г. и 2019 г.) определены сухопутные территории Арктической зоны РФ [5], в которую полностью или частично входят закрепленные территории

ответственности Мурманского, Северо-Западного, Северного, Обь-Иртышского, Среднесибирского, Якутского и Чукотского УГМС.

Функции Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) по научно-методическому руководству работами в УГМС по Арктической зоне РФ определены Положением о государственной наблюдательной сети [9].

Состояние подготовки изданий Водного кадастра по Арктической зоне РФ

В соответствии с приказом Росгидромета от 17 июня 1996 г. № 83 «О мерах по совершенствованию системы ведения ГВК» функции куратора по ведению работ по подразделу «Арктические моря и устья рек, количественные показатели», научно-методическое руководство работами УГМС и экспертизу материалов Водного кадастра по Арктической зоне на стадии их подготовки к публикации в УГМС выполняет ААНИИ. Подготовку материалов Водного кадастра к публикации по Арктической зоне осуществляют УГМС [6].

Подготовка ежегодных и многолетних данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши (ЕДС и МДС) и о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек (ЕДМ и МДМ) выполняется в УГМС в соответствии с Методическими указаниями по ведению ГВК, утвержденных Росгидрометом [15–18].

Приказом Росгидромета от 4 июня 2012 г. № 307 с 1 сентября 2012 г. введен в действие РД 52.10 764-2012 «Водный кадастр Российской Федерации. Методические указания по составлению и подготовке к изданию многолетних данных о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек» [19].

Распределение ответственности между УГМС за подготовку изданий Водного кадастра по Арктической зоне Российской Федерации регламентируется нормативно-методическими документами [14, 15, 18, 19] и приведено в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Распределение ответственности между УГМС за подготовку изданий Водного кадастра по Арктической зоне РФ

| Бассейн моря | Издания по бассейну моря (том, выпуск, часть) | УГМС — редактор по бассейну моря (территориальный уровень) | УГМС — редактор и издатель (бассейновый уровень) |
|----------------|--|---|---|
| Баренцево море | ЕДМ и МДМ том 3, часть 1 «Баренцево море» | Мурманское УГМС — Баренцево море (западная часть моря) | Мурманское УГМС |
| | ЕДМ и МДМ том 3, часть 2 «Устья рек бассейна Баренцева моря» | Северное УГМС — Баренцево море (восточная часть моря) | Северное УГМС |
| Белое море | ЕДС и МДС том 1, выпуск 6 | Северное УГМС — Устьевая область р. Печоры | Северное УГМС |
| | ЕДС и МДС том 1, выпуск 9 | Мурманское УГМС — Бассейны рек и озер Кольского полуострова | Мурманское УГМС |
| Белое море | ЕДМ и МДМ том 2, часть 1 «Белое море» | Северное УГМС — Бассейн р. Печоры | Северное УГМС |
| | ЕДМ и МДМ том 2, часть 2 «Устья рек бассейна Белого моря» | Северное УГМС — Белое море (кроме побережья Кольского полуострова) | Северное УГМС |
| Карское море | ЕДС и МДС том 1, выпуск 8 | Мурманское УГМС — Белое море (побережье Кольского полуострова) | Северное УГМС |
| | ЕДМ и МДМ том 4, часть 1 «Карское море» | Северное УГМС — Устьевые области рек Онеги, Северной Двины, Мезени и др. | Северное УГМС |
| Карское море | ЕДМ и МДМ том 4, часть 2 «Устья рек бассейна Карского моря» | Северное УГМС — Карское море | Северное УГМС |
| | ЕДС и МДС том 1, выпуск 10 | Северное УГМС — Устье р. Кары, устьевые области рек Оби, Енисея, Пясины, Нижней Таймыры | Северное УГМС |
| Море Лаптевых | ЕДС и МДС том 1, выпуск 12 | Обь-Иртышское УГМС — Устьевые области рек Оби, Надьма, Пура, Таза, Гыды | Обь-Иртышское УГМС |
| | ЕДМ и МДМ том 5, часть 1 «Море Лаптевых» | Среднесибирское УГМС — Устьевые области рек Енисея, Пясины, Нижней Таймыры | Среднесибирское УГМС |
| Море Лаптевых | ЕДМ и МДМ том 5, часть 2 «Устья рек бассейна моря Лаптевых» | Обь-Иртышское УГМС — Бассейны рек Оби, Надьма, Пура, Таза и др. | Обь-Иртышское УГМС |
| | ЕДС и МДС том 1, выпуск 16 «Бассейны рек Хатанги, Анабара, Оленька, Лены, Индигирки» | Среднесибирское УГМС — Бассейны рек Енисея, Пясина и др. | Среднесибирское УГМС |
| Море Лаптевых | ЕДМ и МДМ том 5, часть 1 «Море Лаптевых» | Северное УГМС — Море Лаптевых (западная часть) | Северное УГМС |
| | ЕДМ и МДМ том 5, часть 2 «Устья рек бассейна моря Лаптевых» | Тиксинский филиал Якутского УГМС — Море Лаптевых (центральная и восточная части) | Тиксинский ЦГМС — отв. редактор. Издатель — Якутское УГМС |
| Море Лаптевых | ЕДМ и МДМ том 5, часть 2 «Устья рек бассейна моря Лаптевых» | Северное УГМС — Устьевая область р. Хатанги | Северное УГМС |
| | ЕДС и МДС том 1, выпуск 16 «Бассейны рек Хатанги, Анабара, Оленька, Лены, Индигирки» | Тиксинский филиал ЯГУГМС — Устьевые области рек Анабара, Оленька, Лены, Яны и др. | Тиксинский филиал ЯГУГМС — Устьевые области рек Анабара, Оленька, Лены, Яны и др. |
| Море Лаптевых | ЕДС и МДС том 1, выпуск 16 «Бассейны рек Хатанги, Анабара, Оленька, Лены, Индигирки» | Среднесибирское и Северное УГМС — Бассейн р. Хатанги | Среднесибирское и Северное УГМС |
| | ЕДМ и МДМ том 5, часть 2 «Устья рек бассейна моря Лаптевых» | Якутское УГМС и Тиксинский филиал ЯГУГМС — Бассейны рек Оленька, Лены, Яны и др. | Якутское УГМС и Тиксинский филиал ЯГУГМС — Бассейны рек Оленька, Лены, Яны и др. |

Окончание табл. 1

| Бассейн моря | Издания по бассейну моря (том, выпуск, часть) | УГМС — редактор по бассейну моря (территориальный уровень) | УГМС — редактор и издатель (бассейновый уровень) |
|-------------------------|--|---|--|
| Восточно-Сибирское море | ЕДМ и МДМ том 6, часть 1 «Восточно-Сибирское море» | Тиксинский филиал Якутского УГМС — Восточно-Сибирское море (западная часть) | Чукотское УГМС |
| | ЕДМ и МДМ том 6, часть 2 «Устья рек бассейна Восточно-Сибирского моря» | Чукотское УГМС — Восточно-Сибирское море (центральная и восточная части) | |
| | ЕДС и МДС том 1, выпуск 16 | Якутское УГМС и Тиксинский филиал ЯГУГМС — Устьевые области рек Индигирки, Алазеи, Колымы | Якутское УГМС |
| | ЕДС и МДС том 1, выпуск 17 | Чукотское УГМС — Устьевая область р. Колымы | |
| Чукотское море | ЕДМ и МДМ том 7, части 1 и 2 «Чукотское море и устья рек» | Якутское УГМС и Тиксинский филиал ЯГУГМС — Бассейны рек Индигирки, Алазеи и др. | Якутское УГМС |
| | ЕДС и МДС том 1 выпуск 17 | Якутское УГМС и Тиксинский филиал ЯГУГМС — Бассейн р. Колымы (среднее и нижнее течение) | |
| Берингово море | ЕДМ и МДМ том 8, часть 1 «Берингово море», часть 2 «Устья рек бассейна Берингова моря» | Колымское УГМС — Бассейн р. Колымы (верхнее течение) и др. | Колымское УГМС |
| | ЕДС и МДС том 1, выпуск 17 | Чукотское УГМС — Чукотское море Устья рек бассейна Чукотского моря | |
| | | | Чукотское УГМС — Бассейны рек Чукотского АО |
| | | Чукотское УГМС — часть 1 «Берингово море», часть 2 «Устьевая область р. Анадыря» и др. | Камчатское УГМС |
| | | Чукотское УГМС — бассейны р. Анадыря и др. | Колымское УГМС |

Анализ состояния подготовки изданий Водного кадастра по Арктической зоне РФ выполнен по бассейновому принципу с использованием результатов научно-методических инспекций ААНИИ и экспертизы материалов на стадии подготовки к изданию ЕДМ и МДМ в 2006–2022 гг.

Бассейн Белого моря

В соответствии со структурой Водного кадастра РФ [13, 14] основными изданиями режимной гидрологической информации по бассейну Белого моря в Арктической зоне ответственности Мурманского и Северного УГМС являются:

- ЕДМ и МДМ том 2, часть 1 «Белое море»;
- ЕДМ и МДМ том 2, часть 2 «Устья рек бассейна Белого моря»;
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 8 «Бассейны рек Онеги, Сев. Двины, Мезени» и др.

Подготовку и редакцию материалов ЕДМ том 2, часть 1 по морской береговой сети Белого моря на территориальном уровне осуществляют Северное и Мурманское УГМС согласно территории ответственности в Арктической зоне. Компонировку и подготовку к публикации материалов ЕДМ том 2, часть 1 с комплексным анализом данных на бассейновом уровне выполняет Северное УГМС. Подготовка этих изданий происходит своевременно в соответствии с требованиями нормативных документов. Северное УГМС приступило к подготовке рядов МДМ том 2, частей 1 и 2.

Подготовку к публикации ЕДС и МДМ том 1, выпуск 8 на территориальном и бассейновом уровнях осуществляет Северное УГМС. Подготовка изданий ЕДМ происходит своевременно в соответствии с требованиями нормативных документов. Многолетние ряды для МДС планируются подготовить в электронном виде.

Бассейн Баренцева моря

В соответствии со структурой Водного кадастра РФ [13, 14] основными изданиями режим-

ной гидрологической информации по бассейну Баренцева моря в Арктической зоне ответственности Мурманского и Северного УГМС являются:

- ЕДМ и МДМ том 3, часть 1 «Баренцево море»;
- ЕДМ и МДМ том 3, часть 2 «Устья рек бассейна Баренцева моря»;
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 6, часть 1 «Реки Кольского полуострова»;
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 6, часть 2 «Озера и водохранилища Кольского полуострова»;
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 9, часть 1 «Бассейн р. Печоры».

Подготовку и редакцию материалов ЕДМ том 3, часть 1 по морской береговой сети Баренцева моря на территориальном уровне осуществляют Мурманское (западная часть моря и архипелаг Шпицберген) и Северное УГМС (восточная часть моря). Компонировку и подготовку к публикации материалов ЕДМ том 3, часть 1 с комплексным анализом данных на бассейновом уровне выполняет Мурманское УГМС. Подготовка этих изданий происходит своевременно. Подготовка МДМ том 3, часть 1 по Баренцеву морю в Мурманском и Северном УГМС до настоящего времени не осуществляется.

Подготовку к публикации ЕДМ том 3, часть 2 (устьевая область р. Печоры) на территориальном и бассейновом уровнях осуществляет Северное УГМС. Подготовка этих изданий происходит своевременно. Подготовка МДМ том 3, часть 2 до настоящего времени не осуществляется.

Подготовку к публикации ЕДС том 1, выпуск 6, часть 1 (реки) и часть 2 (озера и водохранилища) Кольского полуострова и архипелага Шпицберген на территориальном и бассейновом уровнях осуществляет Мурманское УГМС. Подготовка этих изданий происходит своевременно. Многолетние справочные издания МДС том 1, выпуск 6, часть 1 (реки и каналы) и часть 2 (озера

и водохранилища) за 1981–2010 гг. подготовлены в рукописном виде. ГГИ выполнена экспертиза многолетних рядов гидрологических наблюдений за период 1980–2000 гг.

Подготовку к публикации ЕДС том 1, выпуск 9 (бассейн р. Печора) на территориальном и бассейновом уровнях осуществляет Северное УГМС. Подготовка этих изданий происходит своевременно. Многолетние ряды наблюдений для МДС том 1, выпуск 9 за 1981–2010 гг. подготовлены в рукописном и планируются в электронном виде.

Бассейн Карского моря

В соответствии со структурой Водного кадастра РФ [13, 14] основными изданиями гидрологической информации по бассейну Карского моря в Арктической зоне ответственности Северного, Обь-Иртышского и Среднесибирского УГМС являются:

- ЕДМ и МДМ том 4, часть 1 (Карское море);
- ЕДМ и МДМ том 4, часть 2 (Устья рек бассейна Карского моря);
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 10, часть 1 (Бассейны рек Оби, Надыма, Пура, Таза и др.);
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 12, часть 1 (бассейн р. Енисей и др.);
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 12, часть 2 (озера и водохранилища).

В связи с неоднократной передачей в 1980–2000 гг. методических и сетевых подразделений Арктической зоны РФ бывших Амдерминского, Таймырского и Диксонского УГМС в Северное, Обь-Иртышское и Среднесибирское УГМС нарушена система методического руководства сетью [8], в связи с чем образовалась значительная задержка с подготовкой изданий Водного кадастра по сети бассейна Карского моря.

Комплексный анализ данных, редакцию и подготовку к публикации материалов ЕДМ том 4, часть 1 по морской береговой и островной сети Карского моря на территориальном и бассейновом уровнях осуществляет Северное УГМС. Под-

готовленные к публикации издания за 1990–2019 гг. не прошли экспертизу в ААНИИ и не изданы. Подготовка МДМ том 4, часть 1 до настоящего времени не осуществлялась.

Анализ данных, редакцию и подготовку к публикации ЕДМ том 4, часть 2 на территориальном уровне осуществляет Северное и Обь-Иртышское УГМС (Устья рек Оби, Надыма, Пура, Таза и др.) и Среднесибирское УГМС (Устья рек Енисей, Пясины, Таймыры и др.).

Комплексный анализ данных на бассейновом уровне и публикацию осуществляет Северное УГМС. Подготовленные к публикации издания за 1990–2019 гг. находятся на экспертизе в ААНИИ. Предварительная экспертиза материалов ЕДМ том 4, часть 2 выполнена ААНИИ за 1990–2018 гг. Разрешение на публикацию ЕДМ том 4, часть 2 за эти годы не дано ввиду невыполнения предложений инспекций и экспертной комиссии ААНИИ.

Работы по составлению и подготовке к изданию многолетних данных о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек (РД 52.10.764-2012) бассейна Карского моря в Северном, Обь-Иртышском и Среднесибирском УГМС до настоящего времени не ведутся.

Подготовку к публикации ЕДС том 1, выпуск 10 на территориальном и бассейновом уровнях осуществляет Обь-Иртышское УГМС. Публикации этих изданий за период 2009–2012 гг. до настоящего времени не было. Экспертиза этих изданий не проводилась.

Подготовку к публикации ЕДС том 1, выпуск 12 на территориальном и бассейновом уровнях осуществляет Среднесибирское УГМС. Подготовка этих изданий происходит своевременно. Экспертиза материалов ЕДС том 1, выпуск 12 не проводилась с 1980 г.

Материалы многолетних гидрологических данных МДС том 1, выпуск 10 за 1981–2015 гг. подготовлены в рукописном виде и не опубликованы ввиду отсутствия экспертизы.

Материалы многолетних гидрологических данных МДС том 1, выпуск 12 за 1981–2015 гг. подготовлены в рукописном виде и не опубликованы ввиду отсутствия экспертизы.

При подготовке Среднесибирским УГМС ежегодных и многолетних данных по устьевой сети к публикации не соблюдается условие идентичности [15] согласно территории ответственности в Арктической зоне в изданиях ЕДС (МДС) том 1, выпуск 12, часть 1 (реки) и ЕДМ (МДМ) том 4, часть 2 (устья рек).

Сведения о стоке воды по замыкающим створам устьевой области реки Обь — г. Салехард и устьевой области реки Енисей — г. Игарка публикуются в межведомственном издании Водного кадастра РФ «Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество» (табл. 4 «Водные ресурсы рек»). В ААНИИ выполнен анализ этих сведений за 2011–2015 гг. с использованием графических и табличных материалов для подсчета стока воды согласно действующим нормативным документам Росгидромета [24, 25] согласно территории ответственности в Арктической зоне. По замыкающему створу р. Енисей — г. Игарка ААНИИ дано отрицательное заключение на публикацию сведений ввиду отсутствия измерений для обоснования расчетов стока воды.

Бассейн моря Лаптевых

В соответствии со структурой Водного кадастра РФ [13, 14] основными изданиями режимной гидрологической информации по бассейну моря Лаптевых в Арктической зоне ответственности Северного и Якутского УГМС являются:

- ЕДМ и МДМ том 5, часть 1 (Море Лаптевых);
- ЕДМ и МДМ том 5, часть 2 (Устья рек Хатанги, Анабара, Оленька, Лены, Омолоя и Яны);
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 16 (Бассейны рек Хатанги, Анабара, Оленька, Лены и Яны).

В связи с передачей в 1990–2000 гг. методических и сетевых подразделений Арктической

зоны РФ бывшего Тиксинского УГМС в Якутское УГМС нарушена система методического руководства сетью [8], в том числе по подготовке изданий Водного кадастра.

Тиксинский филиал Якутского УГМС (правопреемник Тиксинского УГМС) является ответственным редактором и осуществляет компоновку и подготовку к публикации материалов ЕДМ и МДМ том 5, части 1 и 2 с выполнением комплексного анализа данных морской и устьевой сети на бассейновом уровне. После экспертизы ААНИИ материалы направляются в Гидрометцентр Якутского УГМС (ГМЦ ЯУГМС) для дублирования в ЕДС и МДС том 1, выпуск 16. Тиксинский филиал выполняет анализ материалов, подготовленных на территориальном уровне Северным УГМС по действующей и закрытой сети восточной части бассейна моря Лаптевых. Публикацию изданий ЕДМ и МДМ том 5, части 1 и 2 осуществляет Якутское УГМС. Подготовка материалов многолетних данных МДМ тома 5, часть 1 бассейна моря не осуществляется ввиду отсутствия в Якутском УГМС электронных архивов многолетних рядов, которые тем не менее имеются во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации — Мировом центре данных (ВНИИГМИ-МЦД0). Погодичные данные для МДМ тома 5, часть 2 бассейна моря Лаптевых по 2010 г. подготовлены в электронном виде.

Гидрометцентр ЯУГМС осуществляет редакцию и подготовку к публикации материалов ЕДС и МДС том 1, выпуск 16 по постам, не входящим в ЕДМ и МДМ по бассейну моря Лаптевых. Подготовка ЕДМ том 5, часть 1 и 2 происходит своевременно. Данные наблюдений по замыкающим устьевым створам рек подготовлены ГМЦ ЯУГМС для публикации в МДС том 1, выпуск 16 в электронном и бумажном виде по 2010 год. Экспертизу в ААНИИ эти материалы не проходили.

Сведения о стоке воды по замыкающему створу устьевой области реки р. Лена — с. Кюсюр публи-

куются в межведомственном издании Водного кадастра РФ «Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество» (табл. 4 «Водные ресурсы рек»). В ААНИИ выполнен анализ этих сведений за 2011–2018 гг. с использованием графических и табличных материалов для подсчета стока воды согласно действующим нормативным документам Росгидромета. По посту р. Лена — с. Кюсюр ААНИИ подготовлено отрицательное заключение на публикацию сведений ввиду отсутствия измерений в период открытого русла для обоснования расчетов стока воды.

Бассейн Восточно-Сибирского моря

В соответствии со структурой Водного кадастра РФ [13, 14] основными изданиями режимной гидрологической информации по бассейну Восточно-Сибирского моря в Арктической зоне ответственности Якутского и Чукотского УГМС являются:

- ЕДМ и МДМ том 6, часть 1 (Восточно-Сибирское море)
- ЕДМ и МДМ том 6, часть 2 (Устья рек Индигирки, Алазеи, Колымы и др.)
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 16 (Бассейны рек Индигирки, Алазеи и др.)
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 17 (Бассейн р. Колымы и др.)

В связи с передачей в 1990–2000 гг. методических и сетевых подразделений бывшего Тиксинского УГМС в Якутское УГМС нарушена система методического руководства сетью [8] по наблюдениям и подготовке изданий ЕДМ том 6 на водных объектах бассейна Восточно-Сибирского моря.

Ответственным редактором и издателем материалов ЕДМ и МДМ тома 6, части 1 по Восточно-Сибирскому морю является Чукотское УГМС. Задолженность по ЕДМ том 6, часть 1 с 2007 г. Подготовка материалов многолетних данных МДМ тома 6, части 1 бассейна Восточно-Сибир-

ского моря не осуществляется ввиду отсутствия у УГМС электронных архивов многолетних рядов, которые имеются во ВНИИГМИ-МЦД.

Тиксинский филиал Якутского УГМС является ответственным редактором и осуществляет компоновку и подготовку к публикации материалов ЕДМ и МДМ том 6, часть 2 с выполнением комплексного анализа данных устьевой сети на бассейновом уровне. После экспертизы ААНИИ материалы направляются в ГМЦ ЯУГМС для дублирования в ЕДС и МДС том 1, выпуск 16 и в Колымское УГМС для дублирования в ЕДС и МДС том 1, выпуск 17 по пунктам наблюдений бассейна р. Колымы.

Публикацию изданий ЕДМ и МДМ том 6, часть 2 осуществляет Якутское УГМС. Подготовка изданий ЕДМ том 6, часть 2 происходит своевременно. Погодичные данные для МДМ тома 6, части 2 бассейна Восточно-Сибирского моря по 2010 год подготовлены Тиксинским филиалом в электронном виде.

Гидрометцентр осуществляет редакцию и подготовку к публикации материалов ЕДС и МДС том 1, выпуск 16 по постам, не входящим в ЕДМ и МДМ по бассейну Восточно-Сибирского моря. Подготовка изданий ЕДС происходит своевременно.

Подготовку и публикацию ежегодных и многолетних данных по бассейну р. Колымы в ЕДС и МДС том 1, выпуск 17 осуществляют Якутское и Колымское УГМС. Ответственным редактором и издателем является Колымское УГМС.

Данные наблюдений для МДС том 1, выпуск 16 и 17 по замыкающим устьевым створам рек подготовлены ГМЦ ЯУГМС в электронном и бумажном виде по 2010 г. Экспертизу в ААНИИ эти материалы не проходили.

Бассейн Чукотского моря

В соответствии со структурой Водного кадастра РФ [13, 14] основными изданиями режим-

ной гидрологической информации по бассейну Чукотского моря в Арктической зоне ответственности Чукотского УГМС являются:

- ЕДМ и МДМ том 7, часть 1 (Чукотское море);
- ЕДМ и МДМ том 7, часть 2 (Устья рек бассейна Чукотского моря);
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 17 (Реки и озера бассейна Чукотского моря).

Ответственным редактором и издателем материалов ЕДМ и МДМ тома 7, части 1 по Чукотскому морю является Чукотское УГМС, задолженность по этому изданию с 2007 г.

Подготовка к публикации изданий ЕДМ и МДМ том 7, часть 2 не осуществлялась.

Подготовка материалов многолетних данных МДМ тома 7, частей 1 и 2 бассейна Чукотского моря до настоящего времени не осуществлялась.

Чукотское УГМС осуществляет подготовку к публикации материалов ЕДС том 1, выпуск 17 по гидрологической сети бассейна Чукотского моря.

Ответственным редактором и издателем ЕДС и МДС том 1, выпуск 17 по бассейну р. Колымы, бассейнам рек Чукотского АО является Колымское УГМС. Подготовка изданий ЕДС происходит своевременно.

Бассейн Берингова моря

В соответствии со структурой Водного кадастра РФ [13, 14] основными изданиями режимной гидрологической информации по бассейну Берингова моря в Арктической зоне ответственности Чукотского УГМС являются:

- ЕДМ и МДМ том 8, часть 1 (Берингово море);
- ЕДМ и МДМ том 8, часть 2 (Устья рек бассейна Берингова моря);
- ЕДС и МДС том 1, выпуск 17 (Реки и озера бассейна Берингова моря).

За подготовку и редакцию материалов ЕДМ и МДМ том 8 по морской и устьевой сети бассейна Берингова моря на территориальном уровне в пределах Чукотского АО отвечает Чукотское

УГМС. Ответственным редактором и издателем материалов ЕДМ и МДМ том 8 в целом по бассейну Берингова моря является Камчатское УГМС. Подготовка Чукотским УГМС материалов ЕДМ часть 1 к изданию с 2007 г. не осуществляется. Подготовка к публикации изданий ЕДМ том 8, часть 2, а также многолетних данных МДМ тома 8, частей 1 и 2 бассейна Берингова моря до настоящего времени не осуществлялась.

Чукотское УГМС осуществляет подготовку к публикации материалов ЕДС том 1, выпуск 17 по гидрологическим постам на реках и озерах бассейна Берингова моря в пределах Чукотского АО. Ответственным редактором и издателем ЕДС и МДС том 1, выпуск 17 по бассейнам рек Берингова моря является Колымское УГМС. Подготовка этих изданий происходит своевременно.

Результаты экспертизы материалов, подготовленных для изданий ВК

По результатам экспертизы материалов ЕДМ и МДМ томов 3–7 частей 1 и 2 на стадии их подготовки в УГМС к изданию и научно-методических инспекций ААНИИ по вопросам ведения Водного кадастра, выполненной в соответствии с нормативными требованиями [6, 9], выявлены существенные недостатки по подготовке и состоянию материалов изданий, а также надежности результатов наблюдений:

- не обеспечено соблюдение нормативных требований по выполнению наблюдений и обработке результатов;
- значительная задержка в подготовке ежегодных и многолетних изданий;
- не обеспечено единство методов измерений и сопоставимость результатов;
- не обеспечен контроль качества наблюдений и публикуемых данных;
- не обеспечена достоверность и однородность результатов наблюдений;

– не обеспечен пространственно-временной анализ результатов наблюдений;

– не обеспечена непрерывность наблюдений (наличие пропусков).

По результатам экспертизы материалов ЕДМ отмечены пропуски наблюдений за уровнем и температурой воды, толщиной льда и ледовыми явлениями, длительные перерывы или отсутствие измерений расходов воды и взвешенных наносов на замыкающих створах крупных и средних рек: Онега (с. Порог), Печора (с. Оксина), Енисей (г. Игарка), Хатанга (с. Хатанга), Анабар (с. Саскылах), Лена (с. Кюсюр), Яна (Юбилейная), Индигирка (пос. Чокурдах), Алазея (с. Андриюшкино), Колыма (с. Колымское).

К основным причинам выявленных недостатков нужно отнести низкий уровень оперативно-методического руководства сетевыми подразделениями со стороны УГМС:

– недостаточный геодезический контроль за состоянием высотной основы;

– недостаточный уровень технического (первичного) контроля;

– недостаточный уровень критического (смыслового) контроля;

– недостаточный уровень анализа надежности и однородности наблюдений;

– сокращение состава и программы наблюдений сетевых подразделений;

– сокращение стандартных сроков гидрологических наблюдений.

В рамках научно-методического руководства проведена проверка выполнения предложений и рекомендаций по результатам экспертизы материалов ВК и планов мероприятий УГМС по результатам инспекций ААНИИ по ведению и подготовке изданий Водного кадастра РФ в Арктической зоне деятельности Мурманского, Северного, Обь-Иртышского, Среднесибирского, Якутского и Чукотского УГМС. В результате анализа выявлено неполное выполнение предложе-

ний и рекомендаций в Мурманском, Северном, Среднесибирском и Якутском УГМС. Полностью выполнены все рекомендации только в Обь-Иртышском УГМС.

Оценка выполнения плановых работ и качества наблюдений сетевых подразделений Северного, Среднесибирского и Якутского УГМС проводится с нарушением основного критерия выполнения плана и качества наблюдений — обеспечение полноты и качества (надежности) наблюдений, подготовленных к публикации в изданиях Водного кадастра согласно РД 52.19.751—2010 «Оценка гидрометеорологических наблюдений и работ» [11].

Заключение

Состояние подготовки изданий Водного кадастра и качество публикуемых наблюдений на территории Арктической зоны РФ не отвечает установленным нормативным требованиям, что создает угрозу для обеспечения техносферной безопасности. Для повышения эффективности работ УГМС по подготовке изданий Водного кадастра на водных объектах Арктической зоны РФ необходимо:

1. Обеспечить соблюдение нормативных требований по выполнению и обработке результатов гидрологических наблюдений [7, 15–28].

2. Совершенствовать систему оперативно-методического руководства сетью по наблюдениям и повысить уровень подготовки изданий ВК в УГМС [4, 8, 15, 18].

3. Ликвидировать отставание в подготовке изданий ВК [6, 19].

4. Обеспечить соблюдение порядка публикации данных наблюдений в изданиях ВК [15].

5. Провести пространственно-временной анализ основных гидрологических характеристик и оценить надежность и однородность многолетних данных с учетом многолетнего анализа устойчивости высотной основы сетевых подразделений [3, 4, 9, 15].

6. Обеспечить подготовку изданий МДМ томов 3–8 на основе РД 52.10.764—2012 «Методические указания по составлению и подготовке к изданию многолетних данных о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек» [19] и провести экспертизу материалов наблюдений на стадии их подготовки к изданию [6].

7. Обеспечить сохранность архива наблюдений в УГМС по сети АЗРФ [10].

Выполнение рекомендаций позволит хозяйствующим субъектам в Арктике использовать качественную гидрологическую информацию в целях выполнения изыскательских работ и обеспечения техносферной безопасности на водных объектах при реализации мероприятий по устойчивому развитию Арктической зоны Российской Федерации.

Библиографический список

1. Пособие к СНиП 2.05.03—84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автомобильных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91)/ Транстрой. — М.: ПКТИТранстрой, 1992. — 412 с.
2. Водный кодекс РФ № 74-ФЗ от 3 июня 2006 г. Принят ГД ФС РФ 12 апреля 2006 г. (редакция от 31 октября 2016 г.). — 52 с.
3. Приказ Росгидромета от 25 мая 2007 г. № 179 «О выполнении постановления Правительства РФ от 28 апреля 2007 № 253 «О порядке ведения государственного водного реестра». — 1 с.
4. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (редакция 2016). — 29 с.
5. Указ Президента Российской Федерации от 2 мая 2014 г. № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации». — 2 с.
6. Приказ Росгидромета от 17 июня 1996 г. № 83 «О мерах по совершенствованию системы ведения ГВК». — 6 с.
7. РД 52.10.324—92 МУ «Гидрологические наблюдения и работы на гидрометеорологической сети в устьевых областях рек». ГОИН, 1993. — 188 с.
8. РД 52.04.576—97 Положение о методическом руководстве наблюдениями за состоянием и загрязнением окружающей среды. Общие требования. — 24 с.
9. РД 522.04.567—2003 Положение о государственной наблюдательной сети. Росгидромет, 2003 г., Изменение 1 от 1 декабря 2008 г. — 45 с.
10. РД-52.19.143—2010 Перечень документов архивного фонда данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении. Обнинск, 2010. — 114 с.
11. РД 52.19.751—2010 Оценка гидрометеорологических наблюдений и работ. Обнинск, 2011. — 108 с.
12. РД 52.18.5—2012 Перечень нормативных документов (по состоянию на 01.08.2012). — 268 с.
13. Структура публикуемой части ГВК. — М., 1979. — 16 с.
14. Методические указания по ведению ГВК, раздел 1, выпуск 1, Общие положения. ГГИ, 1984. — 34 с.
15. Методические указания по ведению ГВК, раздел 1, выпуск 3, часть 1 «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши». ГГИ, 1979. — 164 с.
16. Дополнения и изменения к Методическим указаниям по ведению ГВК, раздел 1, выпуск 3, ч. 1 «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши». ГГИ, 1980. — 80 с.
17. Методические указания по ведению ГВК. Раздел 1, выпуск 4, часть 1 «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши». ГГИ, 1981. — 80 с.
18. Методические указания по ведению ГВК, раздел 1, выпуск 3, часть 5 «Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек». ГОИН, 1979. — 131 с.
19. РД 52.10.764—2012 Методические указания по составлению и подготовке к изданию многолетних данных о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. Обнинск, 2012. — 156 с.
20. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам выпуск 2, часть 2. Гидрологические наблюдения на постах. ГГИ, 1975. — 264 с.
21. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам выпуск 6, часть 1. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. ГГИ, 1978. — 384 с.

22. Дополнение к Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам выпуск 6, часть 1. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. ГГИ, 1990. — 92 с.
23. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам выпуск 6, часть II. Гидрологические наблюдения и работы на малых реках. ГГИ, 1972. — 268 с.
24. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам выпуск 6, часть III. Составление и подготовка к печати гидрологического ежегодника. ГГИ, 1958. — 292 с.
25. Дополнения и изменения к наставлению гидрометеорологическим станциям и постам выпуск 6, часть III. Составление и подготовка к печати гидрологического ежегодника (изд. 1958 г.). ГГИ, 1966. — 55 с.
26. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам выпуск 9, часть I. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах. ГОИН, 1984. — 312 с.
27. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов ГКИНП (ГНТА)-03-010-02. М.: ЦНИИГАиК, 2003. — 145 с.
28. РД 52.10.768—2012 «Нивелирование морских уровенных постов». ГОИН. 2012. — 60 с.

Дата поступления: 26.04.2022

Решение о публикации: 10.05.2022

Контактная информация:

ТРЕТЬЯКОВ Михаил Вячеславович — канд. геогр. наук;
tmv@aari.ru

ПИСКУН Александр Александрович — канд. техн. наук;
piskun@aari.ru

ТЕРЕХОВА Раиса Анатольевна — науч. сотр.;
gwk_rt@aari.ru

Preparation of Water Cadastre Publications on the Arctic Zone of the Russian Federation as a Constituent of Technosphere Safety Support

M. V. Tretiakov, A. A. Piskun, R. A. Terekhova

Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Bering ul., Saint Petersburg, 199397, Russian Federation

For citation: Tretiakov M. V., Piskun A. A., Terekhova R. A. Preparation of Water Cadastre Publications on the Arctic Zone of the Russian Federation as a Constituent of Technosphere Safety Support // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 319–332. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-319-332

Summary

Purpose: To assess the state and to identify the problems of preparing materials for the publication of the Water Cadastre for the Arctic zone of the Russian Federation. **Methods:** Analysis of information received by the Arctic and Antarctic Research Institute from the Murmansk, Northern, Ob-Irtysh, Central Siberian, Yakutsk and Chukotka hydrometeorological departments. **Results:** It is shown that the state of preparation of the Water Cadastre publications and the quality of published observations on the territory of the Arctic zone of the RF do not meet set regulatory requirements. This negatively affects the results of engineering calculations for hydrological support of economic activity in the region and, as a result, may reduce the level of technospheric safety in the Arctic. **Practical significance:** The results obtained made it possible to formulate the requirements for improving work efficiency in the preparation of publications of the Water Cadastre for water objects of the RF Arctic zone.

Keywords: Technosphere safety, water objects, hydrological observations, Arctic zone, hydrological data, Water cadastre, preparation of publications, bridge crossings.

References

1. Posobie k SNiP 2.05.03-84 “Mosty i truby” po izyskaniyam i proektirovaniyu zheleznodorozhnykh i avtodorozhnykh mostovykh perekhodov cherez vodotoki (PMP-91) [Manual to SNiP 2.05.03-84 “Bridges and pipes” for surveys and design of railway and road bridge crossings over watercourses (PMP-91)]. *Transstroy* [Transstroy]. Moscow: PKTItransstroy Publ., 1992. 412 p. (In Russian)
2. *Vodnyy kodeks RF № 74-FZ ot 03.06.2006. Prinyat GD FS RF 12.04.2006 (redaktsiya ot 31.10.2016)* [Water Code of the Russian Federation No. 74-FZ of 06/03/2006. Adopted by the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation on April 12, 2006]. 52 p. (In Russian)
3. *Prikaz Rosgidrometa ot 25.05.2007 g. № 179 «O vypolnenii postanovleniya Pravitel'stva RF ot 28.04.07 № 253 «O poryadke vedeniya gosudarstvennogo vodnogo reestra»* [Order of Roshydromet dated May 25, 2007 No. 179 “On the implementation of the Decree of the Government of the Russian Federation dated April 28, 2007 No. 253 “On the procedure for maintaining the state water register”]. 1 p. (In Russian)
4. *Federal'nyy zakon ot 26.06.2008 N 102-FZ “Ob obespechenii edinstva izmereniy” (redaktsiya 2016)* [Federal Law No. 102-FZ of June 26, 2008 “On Ensuring the Uniformity of Measurements” (Edition 2016)]. 29 p. (In Russian)
5. *Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 02.05.2014 goda № 296 «O sukhoputnykh territoriyakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii»* [Decree of the President of the Russian Federation dated May 2, 2014 No. 296 “On land territories of the Arctic zone of the Russian Federation”]. 2 p. (In Russian)
6. *Prikaz Rosgidrometa ot 17.06.1996 g. № 83 «O merakh po sovershenstvovaniyu sistemy vedeniya GVK»* [Order of Roshydromet dated June 17, 1996 No. 83 “On measures to improve the system of conducting GVK]. 6 p. (In Russian)
7. *RD 52.10.324-92 MU «Gidrologicheskie nablyudeniya i raboty na gidrometeorologicheskoy seti v ust'evykh oblastyakh rek»* [RD 52.10.324-92 MU “Hydrological observations and work on the hydrometeorological network in the mouth areas of rivers”]. GOIN Publ., 1993. 188 p. (In Russian)
8. *RD 52.04.576-97 Polozhenie o metodicheskoy rukovodstve nablyudeniymi za sostoyaniem i zagryazneniem okruzhayushchey sredy. Obshchie trebovaniya* [RD 52.04.576-97 Regulations on the methodological guidance for monitoring the state and pollution of the environment. General requirements]. 24 p. (In Russian)
9. *RD 522.04.567-2003 Polozhenie o gosudarstvennoy nablyudatel'noy seti. Rosgidromet, 2003 g.* [RD 522.04.567-2003 Regulations on the state observation network. Roshydromet, 2003]. 45 p. (In Russian)
10. *RD-52.19.143-2010 Perechen' dokumentov arkhivnogo fonda dannykh o sostoyanii okruzhayushchey sredy, ee zagryaznenii* [RD-52.19.143-2010 List of documents of the archival fund of data on the state of the environment, its pollution]. Obninsk, 2010. 114 p. (In Russian)
11. *RD 52.19.751-2010 Otsenka gidrometeorologicheskikh nablyudeniya i rabot* [RD 52.19.751-2010 Assessment of hydrometeorological observations and works]. Obninsk, 2011. 108 p. (In Russian)
12. *RD 52.18.5-2012 Perechen' normativnykh dokumentov (po sostoyaniyu na 01.08.2012)* [RD 52.18.5-2012 List of regulatory documents (as of 01.08.2012)]. 268 p. (In Russian)
13. *Struktura publikuemoy chasti GVK* [Structure of the published part of the GVK]. Moscow, 1979. 16 p. (In Russian)
14. *Metodicheskie ukazaniya po vedeniyu GVK, razdel 1, vypusk 1, Obshchie polozheniya* [Guidelines for maintaining GVK, section 1, issue 1, General provisions]. GGI Publ., 1984. 34 p. (In Russian)
15. *Metodicheskie ukazaniya po vedeniyu GVK, razdel 1, vypusk 3, chast' 1 «Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi»* [Guidelines for the maintenance of GVK, section 1, issue 3, part 1 “Annual data on the regime and resources of land surface waters”]. GGI Publ., 1979. 164 p. (In Russian)
16. *Dopolneniya i izmeneniya k Metodicheskim ukazaniyam po vedeniyu GVK, razdel 1, vypusk 3, ch. 1 «Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi»* [Additions and amendments to the Guidelines for the maintenance of GVK, section 1, issue 3, part 1 “Annual

data on the regime and resources of land surface waters”]. GGI Publ., 1980. 80 p. (In Russian)

17. *Metodicheskie ukazaniya po vedeniyu GVK. Razdel 1, vypusk 4, chast' 1 «Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushy»* [Guidelines for maintaining GVK. Section 1, issue 4, part 1 “Long-term data on the regime and resources of land surface waters”]. GGI Publ., 1981. 80 p. (In Russian)

18. *Metodicheskie ukazaniya po vedeniyu GVK, razdel 1, vypusk 3, chast' 5 «Ezhegodnye dannye o rezhime i kachestve vod morey i morskikh ust'e rek»* [Guidelines for the maintenance of GVC, section 1, issue 3, part 5 “Annual data on the regime and quality of the waters of the seas and sea estuaries”]. GOIN Publ., 1979. 131 p. (In Russian)

19. *RD 52.10.764–2012 Metodicheskie ukazaniya po sostavleniyu i podgotovke k izdaniyu mnogoletnikh dannykh o rezhime i kachestve vod morey i morskikh ust'ev rek* [RD 52.10.764–2012 Guidelines for the compilation and preparation for publication of long-term data on the regime and quality of the waters of the seas and sea estuaries]. Obninsk, 2012. 156 p. (In Russian)

20. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam vypusk 2, chast' 2. Gidrologicheskie nablyudeniya na postakh* [Manual for hydrometeorological stations and posts, issue 2, part 2. Hydrological observations at posts]. GGI Publ., 1975. 264 p. (In Russian)

21. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam vypusk 6, chast' 1. Gidrologicheskie nablyudeniya i raboty na bol'shikh i srednikh rekakh* [Manual for hydrometeorological stations and posts, issue 6, part 1. Hydrological observations and work on large and medium rivers]. GGI Publ., 1978. 384 p. (In Russian)

22. *Dopolnenie k Nastavleniyu gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam vypusk 6, chast' 1. Gidrologicheskie nablyudeniya i raboty na bol'shikh i srednikh rekakh* [Supplement to the Manual for hydrometeorological stations and posts, issue 6, part 1. Hydrological observations and work on large and medium rivers]. GGI Publ., 1990. 92 p. (In Russian)

23. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam vypusk 6, chast' II. Gidrologicheskie nablyudeniya i*

raboty na malykh rekakh [Manual for hydrometeorological stations and posts, issue 6, part II. Hydrological observations and work on small rivers]. GGI Publ., 1972. 268 p. (In Russian)

24. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam vypusk 6, chast' III. Sostavlenie i podgotovka k pechati gidrologicheskogo ezhegodnika* [Manual for hydrometeorological stations and posts, issue 6, part III. Compilation and preparation for printing of the hydrological yearbook]. GGI Publ., 1958. 292 p. (In Russian)

25. *Dopolneniya i izmeneniya k nastavleniyu gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam vypusk 6, chast' III. Sostavlenie i podgotovka k pechati gidrologicheskogo ezhegodnika (izd.1958 g.)* [Additions and changes to the manual for hydrometeorological stations and posts, issue 6, part III. Compilation and preparation for printing of a hydrological yearbook (ed. 1958)]. GGI Publ., 1966. 55 p. (In Russian)

26. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam vypusk 9, chast' I. Gidrologicheskie nablyudeniya na beregovykh stantsiyakh i postakh* [Manual for Hydrometeorological Stations and Posts Issue 9, Part I. Hydrological Observations at Coastal Stations and Posts]. GOIN Publ., 1984. 312 p. (In Russian)

27. *Instruktsiya po nivelirovaniyu I, II, III i IV klassov GKINP (GNTA)-03-010-02* [Instruction for leveling I, II, III and IV classes GKINP (GNTA) -03-010-02]. Moscow, TsNIIGAiK Publ., 2003. 145 p. (In Russian)

28. *RD 52.10.768–2012 «Nivelirovanie morskikh urovennykh postov»* [D 52.10.768-2012 “Leveling offshore level posts”]. GOIN Publ. 2012. 60 p. (In Russian)

Received: April 26, 2022

Accepted: May 10, 2022

Author's information:

Mikhail V. TRETIAKOV — PhD in Geography;
tmv@aari.ru

Alexander A. PISKUN — PhD in Engineering;
piskun@aari.ru

Raisa A. TEREKHOVA — Researcher; gwk_rt@aari.ru

УДК 656.078.11

Формирование конкурентной среды на примере транспортного потенциала методом организации поточного следования пассажиров на основе принципа «сухие ноги»

Т. М. Шманёв^{1,2}, В. И. Ульяницкая³, М. С. Горбунова^{1,3}, А. Ю. Ситников^{1,4},
Н. Б. Федорова¹

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

² Северо-Западный региональный центр информационно-справочного сопровождения клиентов дирекции железнодорожных вокзалов, Российская Федерация, 195112, Санкт-Петербург, Заневский пр., 73

³ Октябрьская региональная служба развития пассажирских сообщений и предоставления доступа к инфраструктуре, Российская Федерация, 191036, Санкт-Петербург, Невский пр., 85 корп. Д

⁴ Куйбышевская региональная служба развития пассажирских сообщений и предоставления доступа к инфраструктуре, Российская Федерация, 443030, Самара, ул. Товарный двор, 18

Для цитирования: Шманёв Т. М., Ульяницкая В. И., Горбунова М. С., Ситников А. Ю., Федорова Н. Б. Формирование конкурентной среды на примере транспортного потенциала методом организации поточного следования пассажиров на основе принципа «сухие ноги» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 333–344. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-333-344

Аннотация

Цель: Формирование системы транспортного потенциала и универсализация железнодорожной и городской (муниципальной) транспортной системы поточного следования пассажира по принципу «сухие ноги». **Методы:** Основными инструментами анализа и управления пассажирского комплекса при осуществлении постоянной деятельности служат: причинно-следственные связи, алгоритмизация, картирование, анализ данных и др. **Результаты:** Представлен вариант организации и реализации эргономичного и рационального планирования пространства железнодорожной и городской среды методом организации поточного следования пассажиров на основе принципа «сухие ноги». **Практическая значимость:** На примере полученного алгоритма (последовательности) обеспечить клиенту беспрепятственный и комфортный пропуск по всему маршруту следования: от начала маршрута, в пути следования, при пересадках и окончании маршрута, независимо от используемого вида транспорта.

Ключевые слова: Принцип «сухие ноги», пассажир, транспортный потенциал, поточное следование пассажира, инфраструктура, комфорт.

Введение

Под качеством понимается: «Степень достоинства, ценности, пригодности вещи, действия и т. п., соответствия тому, какими они должны быть» [1]. Качество предоставляемой услуги является одним из важнейших свойств клиентоориентированности. В настоящее время ведение хозяйственной деятельности участников транспортного рынка происходит в конкурентной борьбе как между видами транспорта, так и во внутривидовой среде. И в этой конкурентной борьбе чаще побеждает тот, кто больше внимания уделяет качеству предоставляемой услуги.

В основе классического представления о конкуренции между видами транспорта и перевозчиками лежит постулат, что «спрос рождает предложение». То есть применительно к железнодорожному транспорту задачи перевозчика в данном случае — оперативно реагировать на изменение системы, анализировать потенциальные потребности пассажиров, обеспечив ему отклик на необходимую потребность. Однако в настоящее время в условиях глобализации и стратегического планирования на длительный период, которые осуществляют компании-перевозчики, тезис «спрос рождает предложение» целесообразно (а иногда даже необходимо) применять с точностью до наоборот: «предложение рождает спрос». Идеология при этом такова, что с ростом количества предложений у потребителя появляется право большего выбора, расширяя границы возможных условий и запросов на комфорт и безопасность.

Применение «форсайт технологии» (взгляд из будущего), которая фактически является разработкой долгосрочной стратегии компаний, учитывает и определяет перспективный спрос клиента (в нашем случае пассажира) и позволяет компании просчитать предложение на этот спрос заблаговременно. Такой подход позволяет конкретной компании перевозчику создавать благоприятную среду для своих клиентов заблаговре-

менно, применяя не «реактивный» подход, когда пытаются дать предложения уже на возникший спрос, а «проактивный» подход, когда этот спрос еще не возник, но уже просчитан заранее и есть возможность для его своевременного воплощения в жизнь [2, 3]. Применение этого подхода позволяет компании быть более конкурентоспособной на рынке транспортных услуг, так как такой подход, по своей сути, является клиентоориентированным, у компании возникает больше возможностей сохранить своих клиентов и привлечь новых.

Говоря о практической точке зрения, для расчета перспективного спроса и, соответственно, формирования мероприятий для его воплощения в жизнь, необходимо делать следующее. Первое — сформулировать это предложение на потенциальный спрос в виде концепции, определив следующий постулат пассажира: «как хотелось бы, чтобы было», т. е. каких критериев необходимо придерживаться [4–6]. Второе — для воплощения этой концепции в жизнь разрабатывается стратегия, основанная уже на анализе внешней и внутренней траектории развития компании, с определением конкретных и обоснованных программ. И третье — разрабатываются непосредственно сами программы реализации предложения. Под спросом мы подразумеваем не только услугу (товар), которая необходима клиенту, но и качество как самостоятельную характеристику услуги (товара). А качество, в свою очередь, включает в себя многие критерии: внешний вид, производительность, срок службы или долговечность, соответствие требованиям, надежность, комфорт, удобство обслуживания, эстетика, эргономика, то есть все характеристики, определяющие тот или иной товар или услугу как качественные [7, 8]. В данной статье рассматривается повышение качества услуги (на примере реализации на полигоне железнодорожного транспорта общего пользования) через такой критерий, как комфорт.



Рис. 1. Кроссплатформенная пересадочная станция «Кунцевская» (в трехпутном исполнении) в Москве

Источник: <https://russos.livejournal.com/1404856.html?replyto=89416632&format=light>

Новые принципы формирования комфортной среды

В последние десятилетия на российском и международном рынках пассажирских перевозок наблюдается отчетливая тенденция на развитие «мультимодальных» (в том числе «интермодальных») перевозок. За счет интеграции транспортных сетей происходит перераспределение пассажиропотоков, которое успешно решается путем внедрения транспортных пересадочных узлов (далее — ТПУ) на разных уровнях — начиная от отдельных, в городских агломерациях, и заканчивая национальными (международными).

Необходимо отметить, что термины «мультимодальный» и «интермодальный» применительно к железнодорожным пассажирским перевозкам не закреплены — а именно не установлены границы их применения. В настоящее время закреплено понятие «прямое смешанное сообщение», которое трактуется как планирование пассажиром поездки на весь маршрут следования и только в рамках смены географического перемещения, которое не учитывает удобство, комфорт, сервис как в пути следования, так и на стыках и пересадках

(внутритранспортных и между другими видами транспорта) [9, 10]. В данной статье ТПУ рассматривается как обязательный элемент организации сквозного маршрута пассажира, когда маршрут следования пассажира из пункта «А» в пункт «Б» состоит из нескольких отрезков, состыкованных между собой, в рамках как одной, так и нескольких транспортных систем (видов транспорта). «Мультимодальность» и «интермодальность» должны подразумевать стыкование всех этих элементов в процессе следования пассажира, через ТПУ и учитывать географическую и временную привязанности между элементами. Эти привязанности должны быть минимальными как по времени ожидания, так и по расстоянию (рис. 1).

Но практически, как правило, происходит разрыв в географической и временной привязанностях. И если временную привязанность достаточно просто сократить за счет организационных мероприятий, то географическую можно сократить не только при новом строительстве, реконструкции, но и путем организации временных функциональных и комфортных зон для пересадки (в том числе и ТПУ). Однако существующая организация пере-



Рис. 2. Алгоритм реализации в типовом исполнении

возки пассажиров в современных рыночных условиях, основанная на принципах конкуренции, не мотивирует развивать комфортный переход в пунктах пересадки (стыковки элементов маршрута), так как зачастую балансодержатель инфраструктуры не задумывается о логистике, комфорте и безопасности клиента вне своего объекта.

Уровень понимания этой проблемы позволяет говорить, что необходимо менять такой подход. Пока решения идут двумя путями: первый — это побуждение заказчика транспортного заказа (субъект РФ, например Москва), второе — «внутреннее» побуждение компании (крупный перевозчик, например ОАО «РЖД», аэропорты). Такой принцип применялся в период функционирования плановой экономики, когда единым собственником на средства производства (в том числе различных видов транспорта) выступало государство.

Подходы к организации пассажирских перевозок между видами транспорта различаются значительно и зависят не только от иерархии конкурентоспособности субъектов рынка транспортных услуг, но и от сформированного спектра услуг для пассажиров [11]. Под иерархией конкурентоспособности субъектов рынка подразумеваются определенные ресурсы: клиентская база (пассажиобразование и пассажиропотоки), материальная база (наличие инфраструктуры и подвижного состава), характеристики маршрута (дальность,

стоимость, время в пути и другие) и т. д. В текущих условиях отношений «пассажир — перевозчик» качество условий пересадки не в полной мере отвечает запросам клиента, так как поточное следование, «без разрыва», пассажира на всем маршруте следования текущей транспортной системы по большей части невозможно.

Вместе с тем в статье мы рассматриваем качественные характеристики условий совершения поездки (пересадки) как основу части общего маршрута передвижения, которое должно учитываться при формировании концепта комфортной и безопасной среды [12–16]. Такое трактование позволяет трансформировать запрос клиента и предоставить пассажиру оптимальные условия для пересадки (подсадки), удовлетворяя запросы в процессе оказания услуг при организации «поточного» следования пассажиров на основе принципа «сухие ноги». Под принципом «сухие ноги» нами подразумевается организация процессов ожидания, перехода, подсадки, высадки пассажиров в защищенных от воздействия внешних негативных погодных условий (снег, дождь, солнце, ветер) местах.

Рассмотрим алгоритм реализации данного принципа, от выбора направления концепции до конкретной программы и проекта (рис. 2).

Основная цель предлагаемого алгоритма состоит в уходе от разрозненного и хаотичного



Рис. 3. Фотографии решений на вокзальном комплексе Московского вокзала:
 а — 1948 г., прибытие поезда «Красная стрела» на Московский вокзал. Навес отсутствует;
 б — 1977–1978 гг., реконструкция пассажирских платформ и сооружение металлических фронтонов
 и навесов над перронами; в — платформа Московский вокзал в текущее время; г — проектное
 решение прилегающей территории Московского вокзала при строительстве высокоскоростной
 железнодорожной магистрали «Москва — Санкт-Петербург»

Источники: а — <https://www.gudok.ru/content/passengertrans/1498317/>; б — <https://lgt.ru/projects/vokzaly-transportno-peresadochnye-uzly/rekonstrukciya-moskovskogo-vokzala-v-sankt/>; в — https://www.tripadvisor.ru/LocationPhotoDirectLink-g298484-d2263785-i233500156-High_Speed_Train_Sapsan-Moscow_Central_Russia.html; г — <https://www.fontanka.ru/2021/11/23/70271564/>

применения крытого пространства на вокзальных комплексах и остановочных пунктах железнодорожного транспорта. А в дальнейшем и на всем маршруте. Идея состоит не в локальном применении, а в организации планирования изменений инфраструктуры на основе принципа «поточного» следования, т. е. на всем маршруте, которая складывается из эргономичного и рационального планирования пространства в целом, не только для пассажирского транспорта, но и других объектов социального назначения, такие как торго-

вые комплексы, спортивные комплексы, крытые авто паркинги и другое.

Как пример неконструктивности реактивного подхода рассмотрим организацию крытого пространства во времени на примере Московского вокзала, которая растянулась более чем на полвека и окончательно не решена до сих пор. Так, вся пригородная зона, включая платформы, распределительную площадку, маршрут прохода от общественного городского транспорта, до сих пор остаются не защищенными от негативных погод-

ных условий. Исторически Московский вокзал в Санкт-Петербурге является одним из основополагающих объектов пассажирского транспортного узла России, при этом являясь еще объектом культурного наследия. Поэтому и выбор приоритета на Московском вокзале организации крытого пространства за счет внедрения передовых тенденций и фокуса на клиентоориентированность стал первым шагом к организации качественной корреспонденции пассажиров на железнодорожном транспорте. Масштабная реконструкция и перестройка вокзала начались в 1968 г. в связи со значительно возросшим пассажиропотоком, но только спустя десять лет, в 1978 г., установили металлические навесы над двумя центральными платформами и распределительной площадкой. Над платформами 6 и 7 только в 2003 г. были установлены навесы, а пригородная зона, платформы 1, 2 и 3, не накрыты до сих пор (за это время платформу 2 уже вывели с эксплуатации) (рис. 3) [17–20]. Так, мы наблюдаем, что перемены инициируются внутренними факторами (развитием экономики, технологий, конкуренцией, инновациями и т. д.), но отложенное принятие решения по модернизации (реконструкции) приводит к тому, что без наличия стратегии, на основе концепции, ведет к частичной или незаконченной реализации проектных работ (рис. 2).

В итоге отсутствие единого подхода к формированию и реализации проектов, затягивание временных рамок и решений приводят к отсутствию последовательности работ на всех стадиях запланированных и принимаемых решений и, как следствие, индекс удовлетворенности падает и перевозчик проигрывает в конкуренции на рынках транспортных услуг. Поэтому до сих пор пригородные платформы Московского вокзала, на которых скапливается существенная часть пассажиропотока, не защищены навесами от воздействия погодных условий (снег, дождь, солнце, ветер).

Если рассматривать с практической точки зрения предложенные нами алгоритм и процесс соз-

дания крытой зоны (как часть принципа «сухие ноги»), можно сделать выводы, что отсутствие выбранной программы (как итог работы алгоритма) реализации концепции приводит к тому, что процесс внедрения принципа «сухие ноги» ведется бессистемно и не доводится не локально, не на маршруте, организованного по принципу «поточного» следования (например: Московский вокзал как локальный объект и часть маршрута) (рис. 4).

В результате чего положительный эффект, который могли бы оценить клиенты (в том числе пассажиры) оказывается «размыт». Целые сегменты клиентов до сих пор не могут оценить достоинства потраченных средств и времени на реализацию. Так, огромный пригородный пассажиропоток и поток потенциальных пассажиров, приобретающих билеты в дальнее сообщение, а также при посещении Московского вокзала не могут оценить данный критерий — качество услуги (комфорт). Это около 5 млн пассажиров в год.

Правильнее было бы сначала выработать концепцию (проактивное видение) и затем реализовать ее, применив разработанные программы, то есть реализовав алгоритм решений. И таким образом потраченные средства имели бы больший мультипликативный эффект, то есть были бы оценены и замечены клиентами (в том числе пассажирами) при выборе перевозчика или соответствующего вида транспорта.

По такому пути пошли VR-групп, модернизовав вокзал Хельсинки за достаточно короткий период времени, создав крытое пространство над всеми перронными путями, решив вопрос создания комфортной среды по принципу «сухие ноги» как в локальном пункте формирования максимального пассажиропотока, так и замкнув контур маршрутов пассажиров по принципу «сухие ноги» (рис. 5).

Целесообразно принцип «сухие ноги» совмещать с принципом «поточного» следования пассажиров (то есть увязывая реализацию на локальных объектах) в единое «пространство».



Рис. 4. Варианты выбора алгоритма: существующий (неправильный выбор) и перспективный (правильный выбор)



Рис. 5. Железнодорожный вокзал Хельсинки

Источник: <https://www.sputnik8.com/ru/helsinki/sights/zheleznodorozhnyy-vokzal-helsinki/info>

Заключение

Создание транспортной схемы маршрута начинает формироваться у пассажира еще на этапе планирования поездки, когда потенциальным пассажиром анализируется весь спектр услуг и условий маршрута. При правильном построении алгоритма выбора воплощения концепции в виде конкретной программы необходимое качество услуги будет достигнуто в короткие сроки и с ожидаемым клиентами эффектом. На основании вышеизложенного можно рассмотреть третий вариант организации качественного обслуживания пассажиров, когда в обязательном порядке при проектировании, реконструкциях и новом строительстве используется алгоритм внедрения принципа «сухие ноги», а до этого должны вырабатываться программы организации временных функциональных и комфортных зон для пересадки (в том числе и ТПУ).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение проактивного подхода (единовременной реализации крытого пространства Московского вокзала и прилегающих территорий) послужило бы залогом (гарантией) приумножения или сохранения клиентской базы и предусматривало бы то качество услуги, которое дает нам преимущество в условиях работы в конкурентной среде.

Библиографический список

1. Словарь русского языка: в 4 т. / РАН, Ин-т лингвистич. исследований; под ред. А. П. Евгеньевой. — 4-е изд., стер. — М.: Русс. яз.; Полиграфресурсы. — 1999.
2. Охтилев М. Ю. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами / М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов // Известия ЮФУ. Тех. науки. — 2015. — № 1(162). — С. 162–174. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-i-tehnologicheskie-osnovy-kontseptsii-proaktivnogo-monitoringa-i-upravleniya-slozhnyimi-obektami> (дата обращения: 15.03.2022).
3. Безденежных В. М. Проактивный риск-ориентированный подход в сценарном планировании деятельности хозяйствующих субъектов // В. М. Безденежных, А. С. Родионов // Экономика. Налоги. Право. — 2017. — № 6. — С. 76–83. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proaktivnyu-risk-orientirovannyy-podhod-v-stsenarnom-planirovanii-deyatelnosti-hozyaystvuyuschih-subehtov> (дата обращения: 15.03.2022).
4. Фурсов В. А. Когнитивный маркетинг как методология формирования моделей потребления / В. А. Фурсов, Н. В. Лазарева // Kant. — 2015. — № 3(6). — С. 101–107. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kognitivnyu-marketing-kak-metodologiya-formirovaniya-modeley-potrebleniya> (дата обращения: 28.03.2022).
5. Юлдашева О. У. Когнитивный подход к формированию потенциального спроса на товары и услуги фирмы / О. У. Юлдашева // Вестн. СПб. универ. Менеджмент. — 2006. — № 2 — С. 130–149. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kognitivnyu-podhod-k-formirovaniyu-potentsialnogo-sprosa-na-tovary-i-uslugi-firmy-1> (дата обращения: 23.11.2022).
6. Эминова Н. Э. Маркетинговые инновации — эффективный путь повышения конкурентоспособности товаров на рынке / Н. Э. Эминова // Российское предпринимательство. — 2010. — № 8(1). — С. 51–55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/marketingovye-innovatsii-effektivnyu-put-povysheniya-konkurentosposobnosti-tovarov-na-rynke> (дата обращения: 23.11.2022).
7. Петров С. В. Повышение качества товаров и услуг: командообразование / С. В. Петров // Компетентность. — 2020. — № 7. — С. 48–52. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-kachestva-tovarov-i-uslug-komando-obrazovanie> (дата обращения: 15.03.2022).
8. Иванченко О. В. Вопросы взаимосвязи качества продукта и конкурентоспособности компании / О. В. Иванченко // Архивариус. — 2016. — № 1(5). — С. 62–65. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-vzaimosvyazi-kachestva-produkta-i-konkurentosposobnosti-kompanii> (дата обращения: 23.03.2022).
9. Малевич В. Д. Сущность интермодальных перевозок / В. Д. Малевич, М. С. Пономарева // Достижения

науки и образования. — 2018. — № 7(29). — С. 34–35. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/suschnost-intermodalnyh-perevozok> (дата обращения: 28.03.2022).

10. Зохидов А. А. Современные логистические центры: сущность, особенности и тенденции развития / А. А. Зохидов // ЭВР. — 2012. — № 1(31). — С. 214–220. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-logisticheskie-tsentry-suschnost-osobennosti-i-tendentsii-razvitiya> (дата обращения: 28.03.2022).

11. Лысенко Т. А. Основные направления повышения конкурентоспособности ОАО «Российские железные дороги» / Т. А. Лысенко // Науч. вестн. ЮИМ. — 2018. — № 1. — С. 19–23. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-napravleniya-povysheniya-konkurentosposobnosti-oao-rossiyskie-zheleznye-dorogi> (дата обращения: 05.04.2022).

12. Милованова Е. А. Постановка задачи рационализации транспортных связей / Е. А. Милованова, А. А. Милованов, А. И. Милованов // СПТКР. — 2013. — № 3. — С. 49–57. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/postanovka-zadachi-ratsionalizatsii-transportnyh-svyazey> (дата обращения: 01.04.2022).

13. Выскребенцев И. С. Анализ факторов, влияющих на прогнозирование пассажиропотока и спрос на пассажирские перевозки / И. С. Выскребенцев // Московский экономический журнал. — 2020. — № 12. — С. 789–796. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-faktorov-vliyayuschih-na-prognozirovanie-passazhiropotoka-i-sprosa-na-passazhirskie-perevozki> (дата обращения: 07.03.2022).

14. Паспорт стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации // Министерство транспорта Российской Федерации. — 2021. — 128 с. — URL: <https://mintrans.gov.ru/file/467810> (дата обращения: 01.04.2022).

15. Покровская О. Д. Исследование эволюции транспортных узлов как логистических объектов / О. Д. Покровская // Известия Транссиба. — 2017. — № 2(30). — С. 146–158. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/>

[issledovanie-evolyutsii-transportnyh-uzlov-kak-logisticheskikh-obektov](https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-evolyutsii-transportnyh-uzlov-kak-logisticheskikh-obektov) (дата обращения: 27.03.2022).

16. Малахова Т. А. Перспективы развития мультимодальных перевозок в дальнем пассажирском сообщении / Т. А. Малахова, Я. В. Кукушкина // Транспортные системы и технологии. — 2019. — № 4. — С. 146–158. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-multimodalnyh-perevozok-v-dalнем-passazhirskom-soobscenii> (дата обращения: 28.03.2022).

17. Тархов С. А. Эволюция транспортных сообщений между Москвой и Санкт-Петербургом / С. А. Тархов // Экономический журнал. — 2015. — № 1(37). — С. 177–188. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-transportnyh-soobscheniy-mezhdu-moskvoy-i-sankt-peterburgom> (дата обращения: 29.03.2022).

18. Википедия. Свободная энциклопедия. — URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Московский_вокзал_\(Санкт-Петербург\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Московский_вокзал_(Санкт-Петербург)) (дата обращения: 29.03.2022).

19. Куценков В. И. Эргономика и организация пространства интерьера // В. И. Куценков // Эргодизайн. — 2020. — № 1(7). — С. 38–41. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ergonomika-i-organizatsiya-prostranstva-interiera> (дата обращения: 29.03.2022).

20. Батырев В. М. Вокзалы / В. М. Батырев. — М.: Стройиздат, — 1988. — 214 с.

Дата поступления: 10.04.2022

Решение о публикации: 27.04.2022

Контактная информация:

ШМАНЁВ Тимофей Михайлович — канд. техн. наук, доц.; t.schmaniov@yandex.ru

УЛЬЯНИЦКАЯ Виктория Игоревна — ulyanickaya_viktoriya@mail.ru

ГОРБУНОВА Марина Сергеевна — I_PuhovaMS@orw.rzd

СИТНИКОВ Алексей Юрьевич — aysitnikov@inbox.ru

ФЕДОРОВА Наталия Борисовна — natbor65@mail.ru

Formation of a Competitive Environment on the Example of Transport Potential by the Method of Organizing Passenger Flow Based on “Dry Feet” Principle

T. M. Shmanev^{1,2}, V. I. Ulyanitskaya³, M. S. Gorbunova^{1,3},
A. Yu. Sitnikov^{1,4}, N. B. Fedorova¹

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

²North-Western Regional Center for Information and Reference Support for Clients of the Directorate of Railway Stations, Russian Federation, 195112, St. Petersburg, Zanevsky pr., 73

³Oktyabrskaya Regional Service for the Development of Passenger Communications and Providing Access to Infrastructure, Russian Federation, 191036, St. Petersburg, Nevsky pr., 85 bldg. D

⁴Kuibyshevskaya Regional Service for the Development of Passenger Communications and Providing Access to Infrastructure, Russian Federation, 443030, Samara, st. Tovarny yard, 18

For citation: Shmanev T. M., Ulyanitskaya V. I., Gorbunova M. S., Sitnikov A. Yu., Fedorova N. B. Formation of a Competitive Environment on the Example of Transport Potential by the Method of Organizing Passenger Flow Based on “Dry Feet” Principle // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 333–344. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-333-344

Summary

Purpose: Formation of the system of transport potential and universalization of a railway and urban (municipal) transport system for a passenger flow according to “dry feet” principle. **Methods:** The main tools for the analysis and management of a passenger complex at implementation of ongoing activities are: cause-and-effect links, algorithmization, mapping, data analysis, etc. **Results:** Variant for organization and implementation of ergonomic and rational planning of space of railway and urban environment by the method of passenger flow organization based on the principle of “dry feet” is presented. Practical importance: using the obtained algorithm (sequence) as an example, to provide a client with an unhindered and comfortable pass along an entire route: from a route beginning, along a route, during transfers and a route end regardless of transport mode used.

Keywords: “Dry feet” principle, passenger, transport potential, passenger flow, infrastructure, comfort.

References

1. Slovar' russkogo yazyka [Dictionary of the Russian language]. *RAN, In-t lingvistich. Issledovaniy* [RAS, Institute of Linguistics]. Moscow: Rus.yaz.; Poligrafresursy Publ. 1999. (In Russian)

2. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy kontseptsii proaktivnogo monitoringa i upravleniya slozhnymi ob'ektami [Theoretical and technological foundations of the concept of proactive monitoring and control of complex objects].

Izvestiya YuFU. Tekh. Nauki [Izvestiya SFU. Those. Sciences]. 2015, I. 1 (162), pp. 162–174. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-i-tehnologicheskie-osnovy-kontseptsii-proaktivnogo-monitoringa-i-upravleniya-slozhnymi-obektami> (accessed: March 15, 2022). (In Russian)

3. Bezdenezhnykh V. M., Rodionov A. S. Proaktivnyy risk-orientirovannyy podkhod v stsennarnom planirovaniy deyatelnosti khozyaystvuyushchikh sub'ektov [Proactive risk-based approach in scenario planning of activities of

economic entities]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo* [Economics. Taxes. Right]. 2017, I. 6, pp. 76–83. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/proaktivnyy-risk-orientirovanny-podhod-v-stsenarnom-planirovanii-deyatelnosti-hozyaystvuyuschih-subektov> (accessed: March 15, 2022). (In Russian)

4. Fursov V. A., Lazareva N. V. Kognitivnyy marketing kak metodologiya formirovaniya modeley potrebleniya [Cognitive marketing as a methodology for the formation of consumption models]. *Kant* [Kant]. 2015, I. 3 (6), pp. 101–107. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kognitivnyy-marketing-kak-metodologiya-formirovaniya-modeley-potrebleniya> (accessed: March 28, 2022). (In Russian)

5. Yuldasheva O. U. Kognitivnyy podkhod k formirovaniyu potentsial'nogo sprosa na tovary i uslugi firmy [Cognitive approach to the formation of potential demand for goods and services of the company]. *Vestn. SPb. univer. Menedzhment* [Vestn. SPb. University. Management]. 2006, I. 2, pp. 130–149. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kognitivnyy-podhod-k-formirovaniyu-potentsialnogo-sprosa-na-tovary-i-uslugi-firmy-1> (accessed: November 23, 2022). (In Russian)

6. Eminova N. E. Marketingovye innovatsii - effektivnyy put' povysheniya konkurentosposobnosti tovarov na rynke [Marketing innovations - an effective way to increase the competitiveness of goods on the market]. *Rossiyskoe predprinimatel'stvo* [Russian Entrepreneurship]. 2010, I. 8 (1), pp. 51–55. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/marketingovye-innovatsii-effektivnyy-put-povysheniya-konkurentosposobnosti-tovarov-na-rynke> (accessed: November 23, 2022). (In Russian)

7. Petrov S. V. Povyshenie kachestva tovarov i uslug: komandoobrazovanie [Improving the quality of goods and services: team building]. *Kompetentnost'* [Competence]. 2020, I. 7, pp. 48–52. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-kachestva-tovarov-i-uslug-komando-obrazovanie> (accessed: March 15, 2022). (In Russian)

8. Ivanchenko O. V. Voprosy vzaimosvyazi kachestva produkta i konkurentosposobnosti kompanii [Questions of the relationship between the quality of the product and the

competitiveness of the company]. *Arkhivarius* [Archivarius]. 2016, I. 1 (5), pp. 62–65. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-vzaimosvyazi-kachestva-produkta-i-konkurentosposobnosti-kompanii> (accessed: March 23, 2022). (in Russian)

9. Malevich V. D., Ponomareva M. S. Sushchnost' intermodal'nykh perevozok [The essence of intermodal transportation]. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya* [Achievements of science and education]. 2018, I. 7 (29), pp. 34–35. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/suschnost-intermodalnyh-perevozok> (accessed: March 28, 2022). (In Russian)

10. Zokhidov A. A. Sovremennye logisticheskie tsentry: sushchnost', osobennosti i tendentsii razvitiya [Modern logistics centers: essence, features and development trends]. *EVR* [EVR]. 2012, I. 1 (31), pp. 214–220. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-logisticheskie-tsentry-suschnost-osobennosti-i-tendentsii-razvitiya> (accessed: March 28, 2022). (In Russian)

11. Lysenko T. A. Osnovnye napravleniya povysheniya konkurentosposobnosti OAO "Rossiyskie zheleznye dorogi" [The main directions of increasing the competitiveness of JSC "Russian Railways"]. *Nauch. vestn. YuIM* [Nauch. vestn. YuIM]. 2018, I. 1, pp. 19–23. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-napravleniya-povysheniya-konkurentosposobnosti-oao-rossiyskie-zheleznye-dorogi> (accessed: April 05, 2022). (In Russian)

12. Milovanova E. A., Milovanov A. A., Milovanov A. I. Postanovka zadachi ratsionalizatsii transportnykh svyazey [Statement of the problem of rationalization of transport links]. *SPTKR* [SPTKR]. 2013, I. 3, pp. 49–57. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/postanovka-zadachi-ratsionalizatsii-transportnyh-svyazey> (accessed: April 01, 2022). (In Russian)

13. Vyskrebentsev I. S. Analiz faktorov, vliyayushchikh na prognozirovaniye passazhiropotoka i sprosa na passazhirskie perevozki [Analysis of factors influencing the forecasting of passenger traffic and the demand for passenger transportation]. *Moskovskiy ekonomicheskoy zhurnal* [Moscow Economic Journal]. 2020, I. 12, pp. 789–796. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-faktorov-vliyayuschih-na>

prognozirovanie-passazhiropotoka-i-spros-na-passazhirskie-perevozki (accessed: March 07, 2022). (In Russian)

14. Pasport strategii tsifrovoy transformatsii transportnoy otrasli Rossiyskoy Federatsii [Passport of the strategy of digital transformation of the transport industry of the Russian Federation]. *Ministerstvo transporta Rossiyskoy Federatsii* [Ministry of Transport of the Russian Federation]. 2021. 128 p. Available at: <https://mintrans.gov.ru/file/467810> (accessed: April 01, 2022). (In Russian)

15. Pokrovskaya O. D. Issledovanie evolyutsii transportnykh uzlov kak logisticheskikh ob'ektov [Study of the evolution of transport hubs as logistics objects]. *Izvestiya Transsiba* [Izvestiya Transsib]. 2017, I. 2 (30), pp. 146–158. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-evolyutsii-transportnykh-uzlov-kak-logisticheskikh-obektov> (accessed: March 27, 2022). (In Russian)

16. Malakhova T. A., Kukushkina Ya. V. Perspektivy razvitiya mul'timodal'nykh perevozok v dal'nem passazhirskom soobshchenii [Prospects for the development of multimodal transportation in long-distance passenger traffic]. *Transportnye sistemy i tekhnologii* [Transport systems and technologies]. 2019, I. 4, pp. 146–158. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-multimodalnykh-perevozok-v-dalnem-passazhirskom-soobsc-enii> (accessed: March 29, 2022). (In Russian)

17. Tarkhov S. A. Evolyutsiya transportnykh soobshcheniy mezhdru Moskvoy i Sankt-Peterburgom [Evolution of transport communications between Moscow and St. Petersburg].

Ekonomicheskij zhurnal [Economic Journal]. 2015, I. 1 (37), pp. 177–188. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-transportnykh-soobshcheniy-mezhdu-moskvoy-i-sankt-peterburgom> (accessed: March 29, 2022). (In Russian)

18. *Elektronnyy resurs: Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya* [Electronic resource: Wikipedia. Free Encyclopedia]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Московский_вокзал_\(Санкт-Петербург\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Московский_вокзал_(Санкт-Петербург)) (accessed: March 29, 2022). (In Russian)

19. Kukenkov V. I. Ergonomika i organizatsiya prostranstva inter'era [Ergonomics and organization of interior space]. *Ergodizayn* [Ergodesign]. 2020, I. 1 (7), pp. 38–41. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ergonomika-i-organizatsiya-prostranstva-interiera> (accessed: March 29, 2022). (In Russian)

20. Batyrev V. M. *Vokzaly* [Stations]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1988. 214 p. (In Russian)

Received: April 10, 2022

Accepted: April 27, 2022

Author's information:

Timofey M. SHMANEV — PhD in Engineering, Associate Professor; t.schmaniov@yandex.ru

Victoria I. ULYANITSKAYA — ulyanickaya_viktoriya@mail.ru

Marina S. GORBUNOVA — 1_PuhovaMS@orw.rzd

Alexey Yu. SITNIKOV — aysitnikov@inbox.ru

Natalia B. FEDOROV — natbor65@mail.ru



УДК 656.072.23

Совершенствование системы управления транспортно-пересадочными узлами

М. С. Горбунова^{1,2}, А. В. Новичихин¹

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

²Октябрьская региональная служба развития пассажирских сообщений и предоставления доступа к инфраструктуре, Российская Федерация, 191036, Санкт-Петербург, Невский пр., 85 корп. Д

Для цитирования: Горбунова М. С., Новичихин А. В. Совершенствование системы управления транспортно-пересадочными узлами // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 345–358. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-345-358

Аннотация

Цель: Повышение эффективности мультимодальных пассажирских перевозок на основе совершенствования системы управления транспортно-пересадочными узлами в агломерациях. **Методы:** Проведен аналитический обзор нормативных документов, федеральных законов и теоретических положений, анализ пассажиропотока и пассажирооборота в России, применен синергетико-логистический подход. **Результаты:** Разработана концепция совершенствования транспортно-пересадочных узлов и комплекс мероприятий, их обеспечивающих, предложен новый синергетико-логистический подход в управлении транспортно-пересадочными узлами, установлены элементы взаимодействия транспортно-пересадочных узлов для удовлетворения спроса пассажиров, представлены теоретические основы и концептуальная структура методологического подхода. **Практическая значимость:** Предложенный синергетико-логистический подход позволит повысить заинтересованность пассажиров в железнодорожных перевозках, эффективность функционирования транспортно-пересадочных узлов, развитие мультимодальных пассажирских перевозок, оптимизацию и перераспределения пассажиропотоков.

Ключевые слова: Пассажир, транспортно-пересадочный узел, мультимодальная пассажирская перевозка, концепция, система управления, железнодорожный транспорт.

Введение

Расширение площади городов, плотности и численности населения способствует увеличению пассажиропотока в транспортно-пересадочных узлах. В связи с чем транспортно-пересадоч-

ные узлы меняют свой статус в городской среде, увеличивая свои размеры и значение.

Транспортно-пересадочный узел (ТПУ) — это один из основных элементов системы городского общественного транспорта, состоящий из

комплекса объектов недвижимого имущества, предназначенный для безопасного и комфортного обслуживания пассажиров, который обеспечивает перераспределение пассажиропотоков между различными видами транспорта и направлениям движения.

Становление транспортно-пересадочных узлов требует улучшения улично-дорожной сети, для этого необходимо развитие различных видов транспорта, входящих в транспортно-пересадочные узлы — данный факт приводит к усложнению транспортной логистики внутри ТПУ.

Железнодорожный транспорт является основополагающим элементом единой транспортной системы, и на него приходится более 40 % (как для перевозки пассажиров, так и грузов) от всего транспорта Российской Федерации [1].

Следовательно, особое внимание в данной статье уделено железнодорожному пассажирскому транспорту.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью соответствия современным требованиям и потребностям пассажиров в перевозках железнодорожным транспортом и цифровизации, внедрением инновационно-логистических технологий, развитием транспортно-пересадочных узлов. Это обеспечит комфорт проживания населения в городе и, соответственно, удовлетворенность пассажиров. Следовательно, формирование современных транспортно-пере-

садочных узлов занимает ключевое положение в транспортной системе города.

Транспортно-пересадочные узлы в условиях агломерации и их классификация

Размер ТПУ в зависимости от пассажиропотока [2]:

- «малый» (районного значения);
- «средний» (окружного значения);
- «крупный» (городского значения).

Категория ТПУ в зависимости от количества видов транспорта в ТПУ [2] представлена в табл. 1.

Для эффективного функционирования транспортно-пересадочных узлов условиями организации работы (независимо от размера и категории ТПУ) являются: логистическая доступность передвижения пассажиров на разных видах транспорта, высокий уровень сервиса и возможность гибкого планирования поездки, информационная доступность и экономическая прозрачность [3].

В настоящее время формирование транспортных узлов часто происходит на основе железнодорожных узлов, где железнодорожные сети взаимодействуют с другими видами транспорта. В большинстве случаев это остановочные пункты, зонные станции и головные пассажирские станции.

Объектом перевозки в транспортной системе и потребителем транспортных услуг является пассажир.

ТАБЛИЦА 1. Категории транспортно-пересадочных узлов в зависимости от видов транспорта

| | Простой | Базовый | Сложный |
|--|---------|---------|---------|
| Метрополитен | + | + | + |
| Пригородные электрички и экспрессы | + | + | + |
| Городской наземный общественный транспорт: автобусы, троллейбусы | + | + | + |
| Личный автотранспорт, перехватывающие парковки | | + | + |
| Коммерческий транспорт: маршрутки, такси | | | + |
| Пригородные автовокзалы | | | + |
| Внеуличный общественный транспорт: легкое метро, монорельс, скоростной трамвай | | | + |

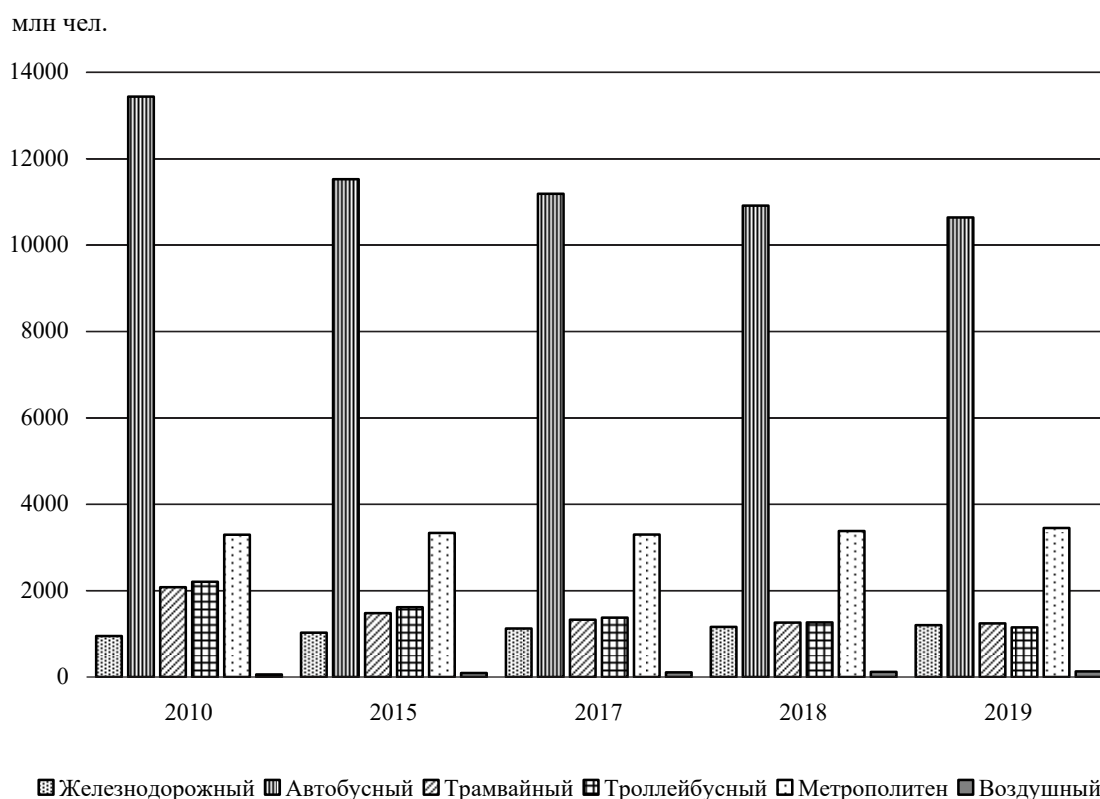


Рис. 1. Динамика перевезенных пассажиров по видам транспорта общего пользования в России с 2010 по 2019 г. [5]

ТАБЛИЦА 2. Количество перевезенных пассажиров с 2010 по 2019 г., млн человек [5]

| Вид транспорта | 2010 г. | 2015 г. | 2017 г. | 2018 г. | 2019 г. |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|---------|
| Железнодорожный | 947 | 1025 | 1121 | 1160 | 1201 |
| Автобусный | 13 434 | 11 523 | 11 185 | 10 912 | 10 637 |
| Трамвайный | 2079 | 1478 | 1327 | 1259 | 1240 |
| Троллейбусный | 2206 | 1616 | 1376 | 1263 | 1148 |
| Метрополитен | 3294 | 3336 | 3298 | 3381 | 3451 |
| Морской | 1,5 | 9,6 | 11,7 | 7,5 | 6 |
| Внутренний водный | 16 | 14 | 13 | 12 | 11 |
| Воздушный | 59 | 94 | 108 | 118 | 131 |
| Итого | 22 036,5 | 19 095,6 | 18 439,7 | 18 112,5 | 17 825 |

Пассажиры несут важную роль в перевозке, ведь они сами выбирают желаемый маршрут и могут при необходимости изменить его во время поездки [4].

В соответствии со Стратегией [1] на подходах к железнодорожным узлам Москвы и Санкт-Петербурга до 2030 г. ожидаются высокие темпы роста перевозок пассажиров.

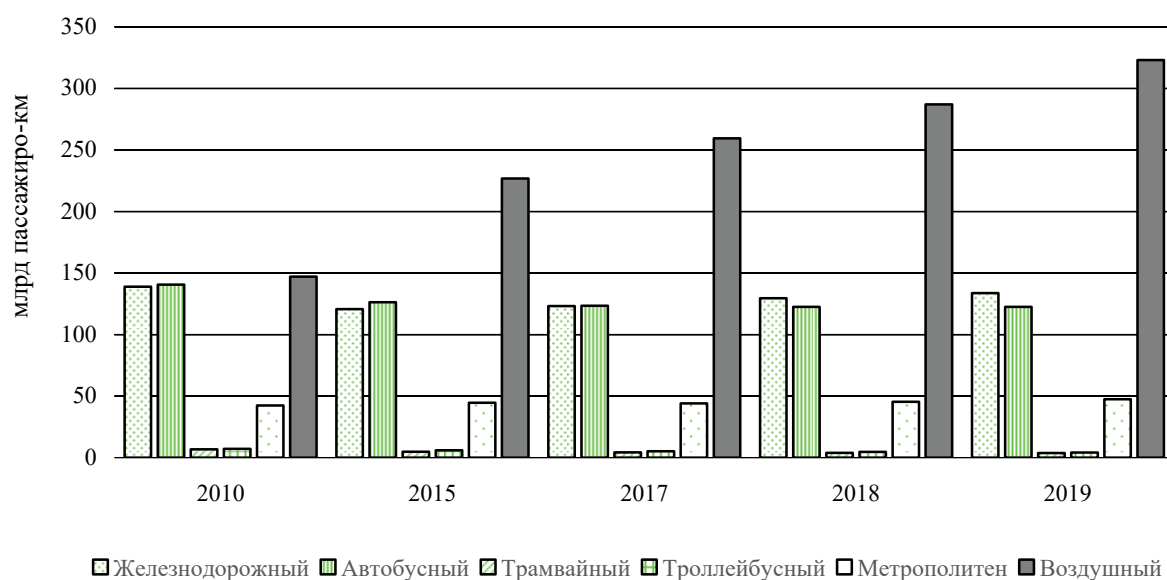


Рис. 2. Динамика пассажирооборота по видам транспорта общего пользования в России с 2010 по 2019 г. [5]

ТАБЛИЦА 3. Пассажирооборот с 2010 по 2019 г., млрд пассажиро-км [5]

| Вид транспорта | 2010 г. | 2015 г. | 2017 г. | 2018 г. | 2019 г. |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Железнодорожный | 138,9 | 120,6 | 123,1 | 129,5 | 133,6 |
| Автобусный | 140,6 | 126,3 | 123,4 | 122,5 | 122,5 |
| Трамвайный | 6,7 | 4,8 | 4,3 | 3,9 | 3,8 |
| Троллейбусный | 7,1 | 6 | 5,2 | 4,7 | 4,2 |
| Метрополитен | 42,4 | 44,6 | 44,1 | 45,4 | 47,4 |
| Морской | 0,06 | 0,06 | 0,08 | 0,06 | 0,05 |
| Внутренний водный | 0,8 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Воздушный | 147,1 | 226,8 | 259,4 | 286,9 | 323 |
| Итого | 483,66 | 529,66 | 560,18 | 593,56 | 635,15 |

На рис. 1 представлена динамика перевезенных пассажиров различными видами транспорта общего пользования в России с 2010 по 2019 г. В связи с пандемийной ситуацией в стране и мире было определено, что 2020 и 2021 гг. показательными не являются.

В табл. 2 приведены данные о количестве перевезенных пассажиров с 2010 по 2019 г. различными видами транспорта в России.

Из данных, представленных на рис. 1 и в табл. 2, следует, что в общей структуре пере-

возок пассажиров преобладает автотранспорт. За 2010 г. было перевезено 13 434 млн пассажира автобусным видом транспорта, что на 21 % выше, чем в 2019 г. Анализируя общий вид транспорта — метрополитен, можно сделать вывод, что с 2010 к 2019 г. количество перевезенных пассажиров выросло на 5 %, несмотря на спад в 2015 г. Трамвайный и троллейбусный вид транспорта с 2010 до 2019 г. терпит снижение количества перевезенных пассажиров. Это объясняется тем, что данные виды транспорта в основном

выполняют ежедневные массовые перевозки пассажиров в пределах городов. Несмотря на то, что железнодорожным видом транспорта перевезено меньшее количество пассажиров, по сравнению вышеупомянутыми, ежегодно количество перевезенных пассажиров железнодорожным видом транспорта увеличивается.

На рис. 2 представлена динамика пассажирооборота на различных видах транспорта общего пользования в России с 2010 по 2019 г.

В табл. 3 приведены данные о пассажирообороте на различных видах транспорта в России в период с 2010 по 2019 г.

Пассажирооборот на воздушном транспорте (рис. 2) постоянно увеличивается в период 2010–2019 гг., что также объясняется интенсивным ростом перевозок на дальних маршрутах. Высокая доля пассажирооборота приходится на железнодорожный транспорт ввиду больших значений средней дальности поездок пассажиров. Автобусный транспорт также занимает лидирующую позицию по пассажирообороту, но с меньшим значением, чем на железнодорожном транспорте, это обусловлено небольшой средней дальностью перевозки пассажиров. Наиболее показательным по пассажирообороту годом для железнодорожного и автобусного транспорта является 2010. В связи с дальнейшим спадом, после 2010 г., пассажирооборот к 2019 г. максимально приблизился к значениям 2010 г. Проведя анализ по пассажирообороту в целом за исследуемый период с 2010 по 2019 г., можно сделать вывод, что, несмотря на скачки пассажирооборота по отдельным видам транспорта, в сумме пассажирооборот в России растет, а следовательно, повышается заинтересованность пассажиров в перевозках общественными видами транспорта.

Мультимодальные пассажирские перевозки

Одним из направления развития транспортного комплекса Российской Федерации является

развитие мультимодальных транспортных технологий и инфраструктуры для обеспечения мультимодальных перевозок [6].

Также одной из ключевых задач ОАО «РЖД» в пригородном сообщении является развитие мультимодального сообщения (с возможностью построения комплексных маршрутов нескольких видов транспорта) [7].

В законодательстве Российской Федерации понятие «мультимодальная пассажирская перевозка» не закреплено. Вместо этого используется термин «прямое смешанное сообщение».

В соответствии со статьей 788 ГК РФ «прямое смешанное сообщение» — это взаимоотношения транспортных организаций при перевозке грузов, пассажиров и багажа разными видами транспорта по единому транспортному документу (прямое смешанное сообщение), а также порядок организации этих перевозок, определяются соглашениями между организациями соответствующих видов транспорта, заключаемыми в соответствии с законом о прямых смешанных (комбинированных) перевозках [8].

В данной работе в используем следующее определение:

«Мультимодальная пассажирская перевозка» — перевозка пассажиров одним или несколькими видами транспорта, которая предполагает наличие единого транспортного оператора или одного перевозчика, ответственного за безопасность пассажиров на всем участке маршрута, при котором перевозка пассажиров осуществляется по единому транспортному билету для всех используемых видов транспорта.

Произведен аналитический обзор нормативных документов [9–12] для основных видов транспорта, имеющих наибольший пассажирооборот, входящих в транспортно-пересадочные узлы.

Организация пассажирских перевозок на различных видах осуществляется Федеральным

исполнительным органом — субъектом Российской Федерации, а управление происходит на каждом из видов транспорта в отдельности, в соответствии с принятой структурой.

Рассмотрены следующие подходы к управлению транспортно-пересадочными узлами:

- процессный;
- проектный;
- функциональный.

Основной базой для формирования современных подходов к управлению является процессный подход [13]. Процессный подход подразумевает под собой определение системы бизнес-процессов и работу с ними в дальнейшем.

Проектный подход предполагает реализацию специального проекта с целью пересмотра некоторых процессов, которые не соответствуют современным требованиям. При этом используются такие инструменты проекта, как: разработка концепции проекта, подготовка проектного задания, декомпозиция целей проекта; сокращение матрицы ответственности, график-бюджет проекта [14, 15].

Функциональный подход к управлению в классическом понимании базируется в первую очередь на организационно-управленческой структуре компании, по принципу управления организационными единицами (элементами) [16].

Концепция совершенствования системы транспортно-пересадочных узлов

Эффективное управление транспортно-пересадочными узлами обеспечивается конкретизацией разработанного синергетико-логистического подхода, учитывающего изменение структуры пассажиропотоков и пропускной способности элементов инфраструктуры, взаимодействие различных перевозчиков, позволяющего декомпозировать и синтезировать транспортные решения, а также идентифицировать их поведение с позиций современных задач разви-

тия транспорта и максимизации логистического эффекта функционирования.

Сущностью предлагаемого подхода является интегрирование инструментов управления для достижения эффективных результатов функционирования транспортно-пересадочных узлов на основе поэтапного устранения внутренних и внешних неопределенностей посредством комбинированного моделирования и оптимизации для достижения синергетического эффекта их развития.

В целях совершенствования системы управления транспортно-пересадочных узлов разработана концепция (рис. 3), действие которой направлено на повышение эффективности пассажирских перевозок, степени взаимодействия между различными видами транспорта и повышение качества обслуживания пассажиров.

Предложенная концептуальная структура состоит из эмпирических основ и предпосылок, теоретических основ, реализации и критериев достоверности.

Указанные предпосылки приводят к функционированию транспортно-пересадочных узлов на уровне, не соответствующем современным требованиям, что влечет за собой неудовлетворенность потребностей пассажиров в железнодорожном транспорте. Решения указанных проблем основаны на теоретических положениях совершенствования системы транспортно-пересадочных узлов, представленных в концепции.

Одним из результатов достижения поставленных целей является набор показателей оценки эффективности функционирования транспортно-пересадочных узлов.

Критерии достоверности разработанной концепции:

1. Предметность — теоретические основы, направленные на совершенствование системы ТПУ.
2. Проверяемость — результаты работы, модели возможно сопоставить с существующими объектами.

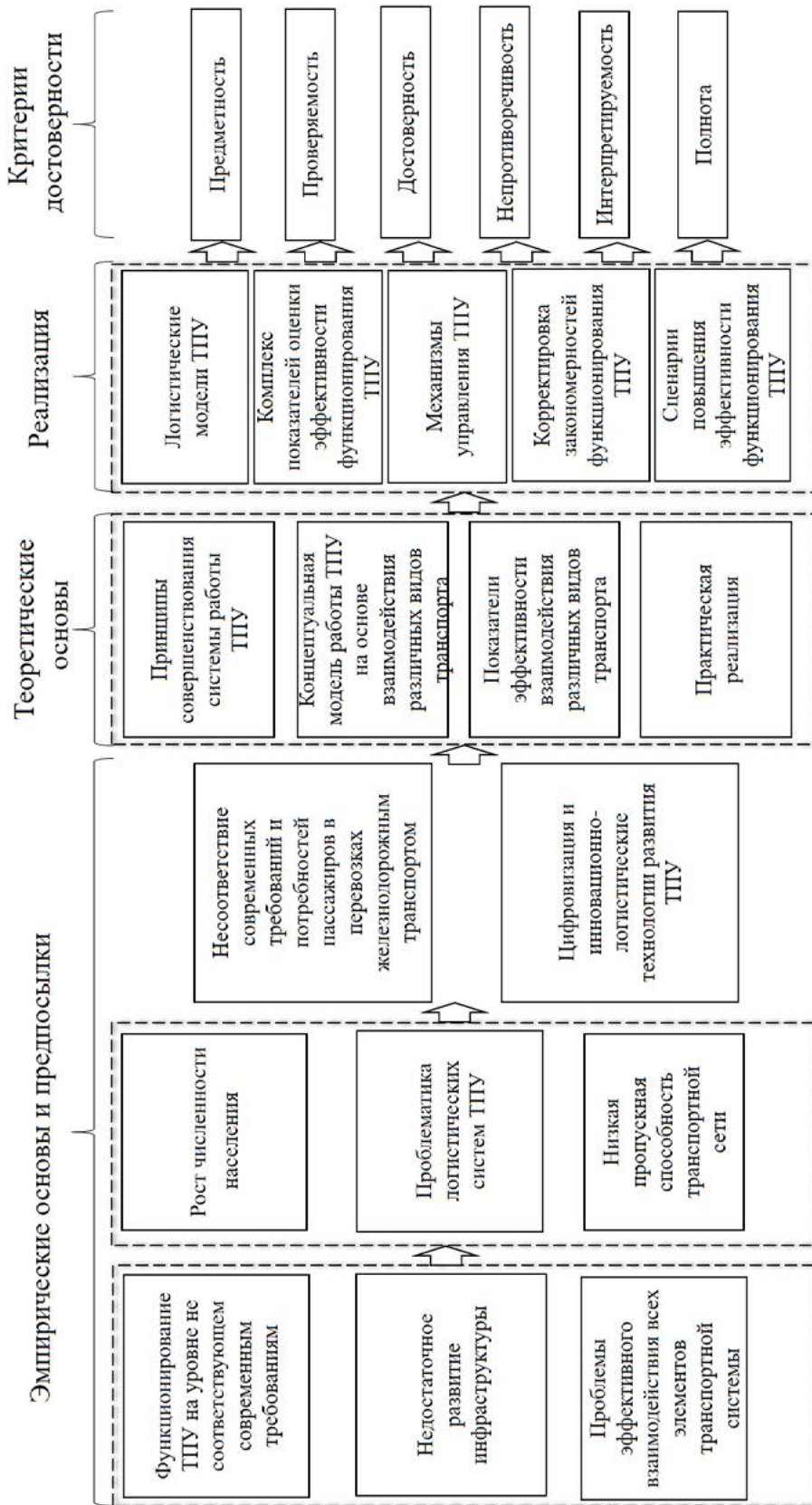


Рис. 3. Концепция совершенствования системы транспортно-пересадочных узлов

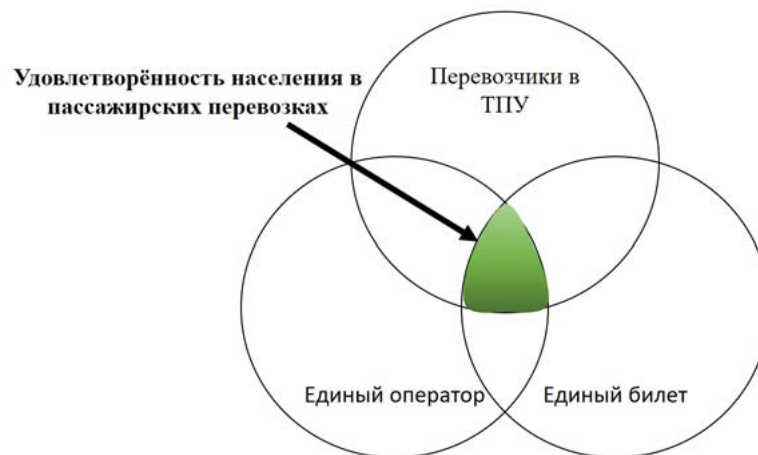


Рис. 4. Концептуальная модель организации мультимодальной пассажирской перевозки в ТПУ

3. Достоверность — комплекс показателей, отражающий изменения в работе ТПУ, направленный на улучшение работы.

4. Непротиворечивость — результаты реализации и изменения, не противоречащие друг другу.

5. Интерпретируемость — наличие расчетных значений.

6. Полнота — эффективное взаимодействие всех элементов транспортной системы.

Для достижения удовлетворенности населения в пассажирских перевозках в ТПУ разработана концептуальная модель организации мультимодальной пассажирской перевозки (рис. 4).

Данная концептуальная модель представлена как взаимодействие в транспортно-пересадочном узле перевозчиков различных видов транспорта, единого оператора и единого билета на перевозку пассажира.

В целях эффективной работы транспортно-пересадочных узлов в условиях возрастающего пассажиропотока необходим инструментарий управления ТПУ, с выделением объекта управления и управляющей системы [17].

Разработана схема системы управления транспортно-пересадочными узлами, направленная на повышение эффективности функционирования транспортно-пересадочных узлов в агломера-

циях, с учетом максимально возможной загруженности транспортно-пересадочных узлов (рис. 5) и улучшения структурных взаимодействий между различными видами транспорта и пассажирами.

На входе системы вектор $S(t)$ характеризует параметры потребностей пассажиров в перевозках. Выход системы представлен вектором $Si(t)$, характеризующим показатели удовлетворенности пассажиров в перевозках.

Объект управления — транспортно-пересадочные узлы, включающие в себя систему продаж билетов, зоны посадки, пассажирскую логистику, безопасность и автоматизацию процессов.

Объект управления представлен векторами входных $L(t)$ и выходных величин $R(t)$, состояний объекта $V(t)$. Управляющая система характеризуется вектором управляющих воздействий $X(t)$ (с согласованными между структурными элементами управления ТПУ и органами исполнительной власти).

Цель управления $W(t)$ — удовлетворенность спроса пассажиров, повышение эффективности функционирования транспортно-пересадочных узлов и повышение доходности, оценка вектора контролируемых внешних воздействий $Lk(t)$ и вектора контролируемых переменных состояний объекта $Rk(t)$.

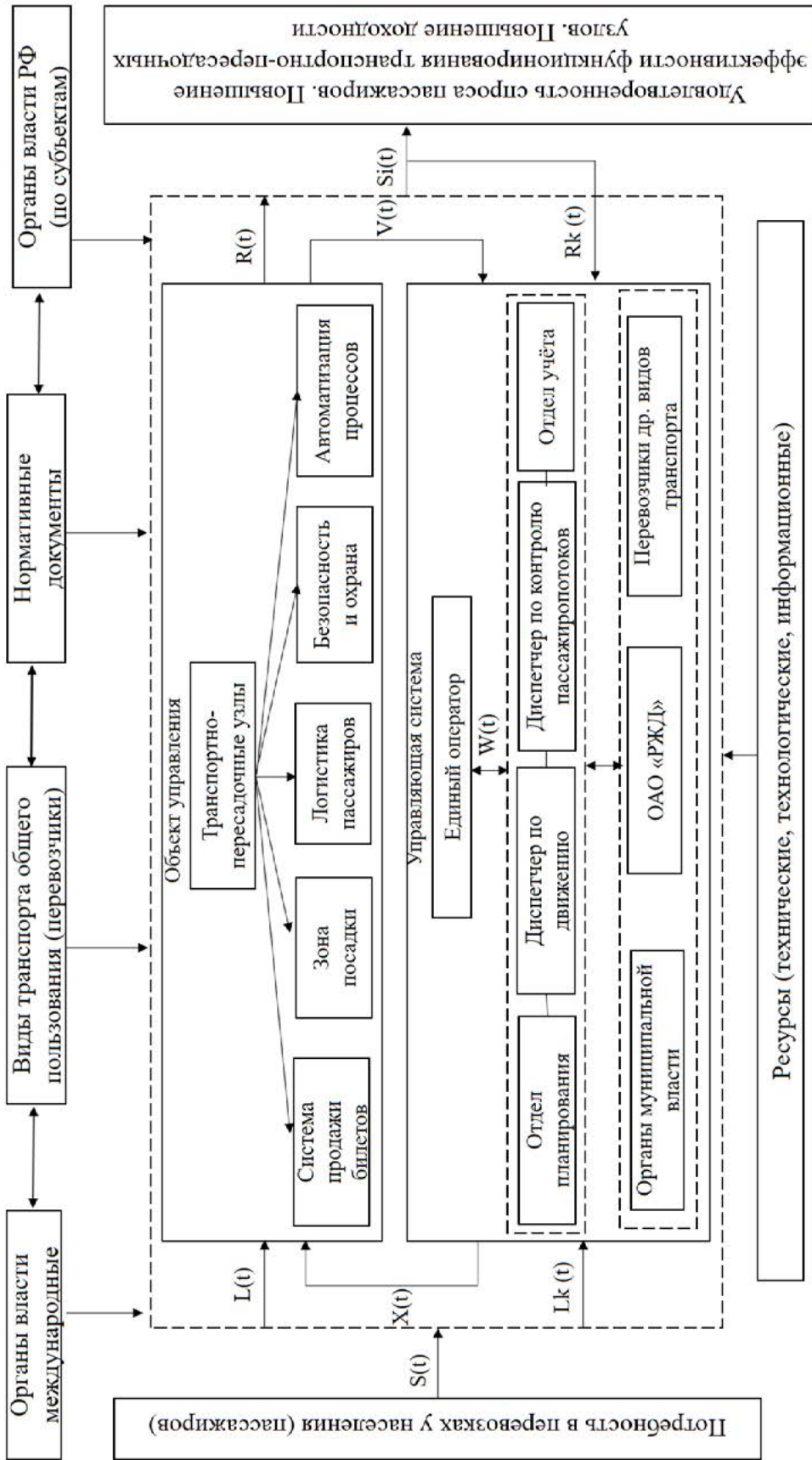


Рис. 5. Схема системы управления транспортно-пересадочными узлами при выделении объектов управления и управляющей системы

В системе управления транспортно-пересадочными узлами основные функции находятся у единого оператора, который является обязательным условием мультимодальных пассажирских перевозок, организация которых позволит довести до высокого уровня соответствие железнодорожных перевозок современным требованиям и потребностям пассажиров.

Заключение

На основе разработанного инструментария управления предлагается комплекс мероприятий по совершенствованию работы транспортно-пересадочных узлов:

1. Организация движения пешеходных потоков.
 2. Организация транспортных потоков.
 3. Учет планировочных решения для нужд МГН [18, 19].
 4. Организация в ТПУ объектов транспортного назначения (перехватывающие парковки, отстойно-разворотные площадки, пассажирские платформы и т. д.).
 5. Накрытие посадочных перронов навесами, защищающими пассажиров от атмосферных осадков.
 6. Упорядочение объектов мелкорозничной торговли в ТПУ.
 7. Создание пространственно-функциональной взаимосвязи между отдельными элементами ТПУ.
 8. Учет экологических факторов, таких как — уменьшение загрязнения природной среды, уменьшение уровня шума, соблюдение санитарных норм.
 9. Цифровизация и инновационно-логистические технологии развития.
- Новизной предлагаемых мероприятий является оптимизация и перераспределение пассажиропотоков на основе логистических моделей и современных цифровых методов.

Новый предложенный подход позволит реализовать функцию единого оператора в мультимодальных пассажирских перевозках в транспортно-пересадочных узлах и решать проблемы управления.

Установлены элементы взаимодействия транспортно-пересадочных узлов, представлены теоретические основы и концептуальная структура методологического подхода.

Результатом исследования является разработка решения комплексной задачи эффективного функционирования и развития методологии управления перевозками в транспортно-пересадочных узлах при взаимодействии различных видов транспорта.

Библиографический список

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 г. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р.
2. Башкаев Т. И. Типология и классификация современных транспортно-пересадочных узлов / Т. И. Башкаев // Архитектура и строительство России. — 2011. — № 5 — С. 23–29.
3. Вакуленко С. П. Техническое оснащение и технология работы транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта: учебное пособие / С. П. Вакуленко, Н. Ю. Евреенкова. — М.: МИИТ, 2015. — 195 с.
4. Шманев Т. М. Повышение эффективности работы в пассажирском комплексе Октябрьской железной дороги за счет использования алгоритма принятия решений с помощью аналитических инструментов качества / Т. М. Шманев, В. И. Ульяницкая, М. С. Пухова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 2. — С. 188–200.
5. Транспорт в России. 2020: Стат. сб. / Росстат. М., 2020. — 108 с.
6. Транспортная Стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 г. Утверждена

распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.

7. Набирая скорость. Годовой отчет 2019. Пассажирские перевозки. — URL: https://ar2019.rzd.ru/download/full-reports/ar_ru_annual-report_spreads_rzd_2019.pdf (дата обращения: 13.04.2022).

8. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 26 января 1996 г. № 14-ФЗ (ред. от 1 июля 2021 г., с изм. от 8 июля 2021 г.) (с изм. и доп., вступ. в силу с 1 января 2022 г.).

9. Федеральный закон «Об организации регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 13 июля 2015 г. № 220-ФЗ.

10. Федеральный закон «О внеуличном транспорте и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 29 декабря 2017 г. № 442-ФЗ.

11. Федеральный закон от 10 января 2003 г. № 18-ФЗ (ред. от 2 июля 2021 г.) «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации».

12. Приказ Минтранса России от 28 июня 2007 г. № 82 (ред. от 15 сентября 2020 г.) «Об утверждении Федеральных авиационных правил “Общие правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов и требования к обслуживанию пассажиров, грузоотправителей, грузополучателей”».

13. Репин В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В. В. Репин, В. Г. Елиферов. — М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. — 544 с.

14. Мишурова И. В. Декомпозиция целей проекта как метод выбора стратегии инновационного развития. Развитие промышленного потенциала в условиях импортозамещения: технологии менеджмента и маркетинга. Материалы международной научно-практической конференции. 18 мая 2017 года / И. В. Мишурова, Н. В. Николаева; под ред. Ю. С. Руденко, М. Я. Парфенова,

М. С. Рубана, Ю. Е. — М.: ЧОУВО «МУ им. С. Ю. Витте», 2017. — С. 497–503.

15. Николаева Н. В. Проектный подход к стратегическому управлению организацией / Н. В. Николаева // Государственное и муниципальное управление. Ученые записи СКАГС. — 2015. — № 2.

16. Родионова Л. Н. Управление инновациями: экономические аспекты / Л. Н. Родионова, С. Т. Пашин и др. — Уфа: ГУП РБ УПК, 2009. — 248 с.

17. Ковалев К. Е. Развитие научно-технических основ повышения эффективности функционирования транспортной системы при взаимодействии интенсивных и малодетальных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 2. — С. 169–176.

18. Шманев Т. М. Пути повышения эффективности капитальных вложений в инфраструктуру с целью ее адаптации для обеспечения доступной среды / Т. М. Шманев, В. И. Ульяницкая, И. В. Ванюшин и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 4. — С. 591–600.

19. Шманев Т. М. Условия соответствия требованиям обеспечения доступности транспортных объектов ОАО «РЖД» через промежуточные решения и принятие компенсирующих мер для обслуживания маломобильных групп населения, в том числе инвалидов / Т. М. Шманев, В. И. Ульяницкая, М. С. Пухова и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 3. — С. 340–352.

Дата поступления: 27.04.2022

Решение о публикации: 18.05.2022

Контактная информация:

ГОРБУНОВА Марина Сергеевна — аспирант;

marinka96puhova@gmail.com

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук,

доц.; novitchihin@bk.ru

Improving the Management System of Transport Hubs

M. S. Gorbunova^{1,2}, A. V. Novichikhin¹

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

²Octyabrskaya Regional Service for the Development of Passenger Services and Access to Infrastructure, Russian Federation, 191036, St. Petersburg, Nevsky Ave., 85 bldg. D

For citation: Gorbunova M. S., Novichikhin A. V. Improving the Management System of Transport Hubs // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 345–358. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-345-358

Summary

Purpose: To increase the efficiency of multimodal passenger transportation based on improving the management system of transport hubs in agglomerations. **Methods:** An analytical review of regulatory documents, federal laws and theoretical provisions, an analysis of passenger traffic and passenger turnover in Russia, a synergetic and logistic approach was applied. **Results:** The concept of improving transport hubs and a set of measures to ensure such hubs has been developed, a new synergetic-logistic approach in the management of transport hub has been proposed, the elements of interaction of transport hubs to meet passenger demand are established, the theoretical bases and conceptual structure of the methodological approach are presented. **Practical significance:** The proposed synergetic and logistic approach will increase the interest of passengers in rail transportation, the efficiency of the functioning of transport hubs, the development of multimodal passenger transportation, optimization and redistribution of passenger traffic.

Keywords: Passenger, transport interchange hub, multimodal passenger transportation, concept, management system, railway transport.

References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v RF do 2030 goda Utverzhdena Rasporyazheniem Pravitel'stva RF 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]. (In Russian)

2. Bashkaev T. I. Tipologiya i klassifikatsiya sovremennykh transportno-peresadochnykh uzlov [Typology and classification of modern transport hubs]. *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii* [Architecture and construction of Russia]. 2011, I. 5, pp. 23-29. (In Russian)

3. Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu. *Tekhnicheskoe osnashchenie i tekhnologiya raboty transportno-peresadochnykh uzlov, formiruemykh s uchastiem*

zheleznodorozhnogo transporta [Technical equipment and technology of operation of transport interchange hubs formed with the participation of railway transport]. Moscow: MIIT Publ., 2015. 195 p. (In Russian)

4. Shmanev T. M., Ul'yanitskaya V. I., Pukhova M. S. Povyshenie effektivnosti raboty v passazhirskom komplekse Oktyabr'skoy zheleznoy dorogi za schet ispol'zovaniya algoritma prinyatiya resheniy s pomoshch'yu analiticheskikh instrumentov kachestva [Improving the efficiency of work in the passenger complex of the Oktyabrskaya Railway through the use of a decision-making algorithm with the help of analytical quality tools]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Izvestiya Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, I. 2, pp. 188–200. (In Russian)

5. *Transport v Rossii. 2020* [Transport in Russia. 2020]. Moscow, 2020. 108 p. (in Russian)
6. *Transportnaya Strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 27 noyabrya 2021 g. № 3363-r* [Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r.]. (In Russian)
7. *Nabiraya skorost'. Godovoy otchet 2019. Passazhirskie perezovozki* [Picking up speed. Annual report 2019. Passenger transportation]. Available at: https://ar2019.rzd.ru/download/full-reports/ar_ru_annual-report_spreads_rzd_2019.pdf (accessed April 13, 2022). (In Russian)
8. *"Grazhdanskiy kodeks Rossiyskoy Federatsii (chast' vtoraya)" ot 26.01.1996 N 14-FZ* ["Civil Code of the Russian Federation (Part Two)" dated 01/26/1996 N 14-FZ]. (In Russian)
9. *Federal'nyy zakon "Ob organizatsii regulyarnykh perezovozok passazhirov i bagazha avtomobil'nym transportom i gorodskim nazemnym elektricheskim transportom v Rossiyskoy Federatsii i o vnesenii izmeneniy v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii" ot 13.07.2015 N 220-FZ* [Federal Law No. 220-FZ dated July 13, 2015 "On the Organization of Regular Transportation of Passengers and Luggage by Motor Transport and Urban Surface Electric Transport in the Russian Federation and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation"]. (In Russian)
10. *Federal'nyy zakon "O vneulichnom transporte i o vnesenii izmeneniy v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii" ot 29.12.2017 N 442-FZ* [Federal Law "On off-street transport and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation" dated December 29, 2017 N 442-FZ]. (In Russian)
11. *Federal'nyy zakon ot 10.01.2003 N 18-FZ (red. ot 02.07.2021) "Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiyskoy Federatsii"* [Federal Law No. 18-FZ of January 10, 2003 (as amended on July 2, 2021) "Charter of Railway Transport of the Russian Federation"]. (In Russian)
12. *Prikaz Mintransa Rossii ot 28.06.2007 N 82 (red. ot 15.09.2020) "Ob utverzhdenii Federal'nykh aviatsionnykh pravil "Obshchie pravila vozdushnykh perezovozok passazhirov, bagazha, gruzov i trebovaniya k obsluzhivaniyu passazhirov, gruzootpraviteley, gruzopoluchateley"* [Order of the Ministry of Transport of Russia dated June 28, 2007 N 82 (as amended on September 15, 2020) "On approval of the Federal Aviation Rules" General rules for the air transportation of passengers, baggage, cargo and requirements for servicing passengers, consignors, consignees"]. (In Russian)
13. Repin V. V., Eliferov V. G. *Protsessnyy podkhod k upravleniyu. Modelirovanie biznes-protsessov* [Process approach to management. Modeling of business processes]. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber Publ., 2013. 544 p. (In Russian)
14. Mishurova I. V. Nikolaeva N. V. *Dekompozitsiya tseley projekta kak metod vybora strategii innovatsionnogo razvitiya. Razvitie promyshlennogo potentsiala v usloviyakh importozameshcheniya: tekhnologii menedzhmenta i marketinga. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 18 maya 2017 goda* [Decomposition of project goals as a method for choosing an innovative development strategy. Development of industrial potential in the conditions of import substitution: technologies of management and marketing. Materials of the international scientific-practical conference. May 18, 2017]. Moscow: ChOUVO «MU im. S.Yu. Vitte» Publ., 2017, pp. 497- 503. (In Russian)
15. Nikolaeva N. V. *Proektnyy podkhod k strategicheskomu upravleniyu organizatsiey* [Project approach to the strategic management of an organization]. *Gosudarstvennoe i munitsipal'noe upravlenie. Uchenye zapisi SKAGS* [State and municipal management. SKAGS scholarly records]. 2015, I. 2. (In Russian)
16. Rodionova L. N., Pashin S. T. *Upravlenie innovatsiyami: ekonomicheskie aspekty* [Management of innovations: economic aspects]. Ufa: GUP RB UPK Publ., 2009. 248 p. (In Russian)
17. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. *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]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, I. 2, pp. 169–176. (In Russian)

18. Shmanev T. M., Ul'yanitskaya V. I., Vanyushin I. V., Pukhova M. S., Sitnikov A. Yu. Puti povysheniya effektivnosti kapital'nykh vlozheniy v infrastrukturu s tsel'yu ee adaptatsii dlya obespecheniya dostupnoy sredy [Ways to improve the efficiency of capital investments in infrastructure in order to adapt it to provide an accessible environment]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Izvestia of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, I. 4, pp. 591–600. (In Russian)

19. Shmanev T. M., Ul'yanitskaya V. I., Pukhova M. S., Panov P. S., Sitnikov A. Yu. Usloviya sootvetstviya trebovaniyam obespecheniya dostupnosti transportnykh

ob'ektov OAO «RZhD» cherez promezhutochnye resheniya i prinyatie kompensiruyushchikh mer dlya obsluzhivaniya malomobil'nykh grupp naseleniya, v tom chisle invalidov [Conditions for compliance with the requirements for ensuring the availability of transport facilities of Russian Railways through intermediate solutions and the adoption of compensatory measures for services for people with limited mobility, including disabled people]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Izvestia of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, I. 3, pp. 340–352. (In Russian)

Received: April 27, 2022

Accepted: May 18, 2022

Author's information:

Marina S. GORBUNOVA — Postgraduate Student;
marinka96puhova@gmail.com

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

УДК 624.14

Параметры мерзлых грунтов при численном моделировании теплофизических задач

К. В. Сливец, С. С. Колмогорова, И. А. Коваленко

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

Для цитирования: Сливец К. В., Колмогорова С. С., Коваленко И. А. Параметры мерзлых грунтов при численном моделировании теплофизических задач // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 359–366. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-359-366

Аннотация

Цель: В настоящее время наиболее распространенные зарубежные геотехнические программные комплексы (Midas GTS NX, Plaxis) имеют в своем составе модули для теплофизического моделирования. Теплофизическое моделирование особенно важно при проектировании и строительстве на основаниях, сложенных мерзлыми грунтами. При проведении численных расчетов важным является этап верификации моделей, в данном случае теплофизических моделей, мерзлых грунтов на предмет их соответствия теоретическим основам и расчетным предпосылкам, заложенным в отечественных нормах. С этой целью было выполнено сравнение теоретических предпосылок в зарубежных геотехнических комплексах с предпосылками, заложенными в пакете Termoground, созданном при участии специалистов ФГБОУ ВО ПГУПС (С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов). Данный пакет имеет длительный опыт успешного использования в практике расчетов и проектирования, реализованные в нем теоретические предпосылки верифицированы и полностью соответствуют требованиям отечественных норм. **Методы:** Проведение теоретического анализа нормативных и технических документов зарубежных программных комплексов. Выполнение численного моделирования реальных теплофизических задач. **Результаты:** Установлено, что зависимости, лежащие в основе зарубежных геотехнических комплексов, в целом имеют те же теоретические предпосылки, что и отраженные в отечественных нормативных документах, также при численном моделировании отмечена удовлетворительная сходимость расчетных температурных полей в массиве грунта для реальных задач строительства сооружений на мерзлых грунтах. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы в практике проектирования и строительства для задания теплофизических параметров грунтов основания при проведении численного моделирования теплофизических задач и анализа геокриологической ситуации в условиях Крайнего Севера.

Ключевые слова: Численное моделирование, теплофизическое моделирование, мерзлый грунт, многолетнемерзлые грунты, теплоемкость грунта, теплопроводность грунта, midas.

Введение

Следует отметить, что процессы теплопереноса в мерзлых грунтах несколько сложнее, чем в конструкционных материалах, и имеют ряд существенных особенностей. Прежде всего это связано с тем, что грунт — это многофазная среда, включающая воду, для которой необходимо вводить описание фазовых превращений [1, 2], поэтому теплофизическое моделирование грунтов требует отдельной верификации. В настоящее время моделирование теплофизических задач производится с применением численных методов, среди которых наиболее распространенным является метод конечных элементов [3–6].

С этой целью было выполнено сравнение теоретических предпосылок в зарубежных геотехнических комплексах и с предпосылками, заложенными в пакете Termoground, созданном при участии специалистов ФГБОУ ВО ПГУПС [5, 6]. Данный модуль является частью программного комплекса FEM models и имеет длительный опыт успешного использования в практике расчетов и проектирования, реализованные в нем теоретические предпосылки верифицированы и полностью соответствуют требованиям отечественных норм.

В отечественных нормах [7, 8] объемная теплоемкость складывается из двух компонент:

$$c_{v,eff} = c_v + c_{v,фаз}, \quad (1)$$

где $c_v, c_{v,фаз}$ — объемная эффективная теплоемкость и объемная теплота фазовых превращений.

Выражение для объемной эффективной теплоемкости получается на основании нахождения средневзвешенного значения удельных теплоемкостей компонент (фаз) грунта:

$$c = (c_s m_s + c_w m_w + c_i m_i) / m, \quad (2)$$

где c_s, c_w, c_i — удельная теплоемкость твердых частиц, воды и льда соответственно, m — масса выделенного объема грунта.

После ряда преобразований выражение для объемной теплоемкости грунта можно свести к виду, который и используется в нормах, а именно:

$$c_{v,eff} = c_s + c_w w_w + c_i (w_{tot} - w_w) \rho_{d,f}, \quad (3)$$

где $\rho_{d,f}$ — плотность сухого мерзлого или талого грунта; w_{tot} — суммарная влажность мерзлого грунта; w_w — влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды, определяемая на основании зависимости.

В зарубежных программных комплексах [9, 10] используется следующее выражение для суммарной объемной теплоемкости:

$$c_v = c\rho = (1-n)\rho_s c_s + n[\rho_w c_w + L_0 df_u / dT], \quad (4)$$

где ρ_s, ρ_w, ρ_i — плотность твердых частиц, воды и льда соответственно, $f_u = w_w / w_{tot}$ — функция относительного содержания незамерзшей воды в зависимости от температуры, n — пористость грунта.

Из выражения (2) эффективная объемная теплоемкость (при условии полного водонасыщения пор грунта $S = 1$) может быть записана в виде:

$$c_{v,eff} = c\rho = (1-n)\rho_s c_s + n\rho_w c_w. \quad (5)$$

Функция w_w до начала замерзания воды в порах грунта принимает значение $w_w = w_{tot}$ в дальнейшем на основании зависимости:

$$w_w = k_w w_p, \quad (6)$$

где k_w — коэффициент, принимаемый для глинистых грунтов в зависимости от числа пластичности и температуры грунта по [7]; w_p — влажность на границе раскатывания.

В модели промерзания и оттаивания грунта программного модуля Termoground теплофизические параметры определяются интерполяцией для различных диапазонов температур [5, 6].

Диапазоном температур от положительной $T_{th} = +0^\circ\text{C}$ до температуры начала замерзания грунта T_{bf} , соответствующей началу замерзания свободной поровой влаги в крупных порах (Зона I). Диапазоном температур от T_{bf} до температуры начала замерзания связанной воды $T_{3,c}$ (Зона II). Зона II соответствует диапазон от $T_{3,c}$ до температуры мерзлого состояния грунта T_f . И зона IV практически мерзлого грунта с температурой от T_f и ниже.

В зоне талого грунта (Зона I), $T_{th} > T_{bf}$. Объемная теплоемкость принимается постоянной, равной значению для талого грунта, C_{th} принимается постоянной $c_{v,I} = c_{v,th} = \text{const}$.

В зоне замерзания (оттаивания) свободной воды (Зона II). $c_{v,II}$ принимаются переменными, зависящими от температуры грунта T_{th} ($T_{bf} \leq T = T_{th} \leq T_{3,c}$):

$$c_{v,II} = c_{v,eff}(T) + c_{\text{фаз}} = c_{th} - \frac{(c_{th} - c_f)(T_{bf} - T_{th})}{T_{bf} - T_f} + \frac{L_0 \rho_d (w_{tot} - w_w)}{T_{bf} - T_{3,c}}. \quad (7)$$

В зоне промерзающего (оттаивающего) грунта (Зона III) и замерзания (оттаивания) связанной воды ($T_{3,c} < T = T_{th} < T_f$) определяются на основании зависимости

$$c_{v,III} = c_{v,eff}(T) + c_{\text{фаз}} = c_f + \frac{(c_{th} - c_f)(T_{th} - T_f)}{T_{bf} - T_f} + L_0 \rho_d \frac{dw_w}{dT}. \quad (8)$$

Анализ выражения для эффективной теплоемкости грунта (формула 5) позволяет сделать вывод о том, что в зарубежных программах не учитывается изменение теплоемкости за счет изменения соотношения фаз при промерзании — оттаивании. В пакете Termoground изменение

эффективной теплоемкости учитывается путем интерполяции крайних значений на различных участках температур. Следует отметить, что для большинства реальных грунтов изменение эффективной теплоемкости за счет изменения соотношения фаз крайне мало в сравнении со второй определяющей компонентой теплоемкости талого или мерзлого грунта — теплоты фазовых превращений. Скрытая теплота фазовых переходов в интервале отрицательных температур равна теплоте, поглощенной или отданной грунтом из-за изменений фазы поровой воды. В зарубежных программных комплексах (см. выражение 2) обычно представляется в виде:

$$c_{\text{фаз}} = L_0 w_{tot} \frac{df_u}{dT}, \quad (9)$$

где $L_0 = 335 \cdot 10^6$ Дж/м³ — теплота фазовых превращений вода-лед. Данное выражение можно привести к виду:

$$c_{\text{фаз}} = L_0 \rho_d \frac{dw_w}{dT}. \quad (10)$$

Анализ зависимостей (9) и (10) показывает, что при определении теплоемкости для фазовых переходов используются одинаковые предпосылки. Основным вопросом является отыскание функции относительного содержания незамерзшей воды f_u . Для ее нахождения могут быть использованы имеющиеся в литературе многочисленные эмпирические зависимости. С точки зрения соответствия отечественным нормам следует принять функцию f_u по значениям коэффициента k_w . В этом случае существенных различий по величине общей объемной теплопроводности при теплофизическом моделировании мерзлых грунтов не ожидается.

В зарубежных геотехнических комплексах для нахождения коэффициента теплопроводности грунта используются формулы на основе соотношения компонент грунта, аналогичные формуле (2):

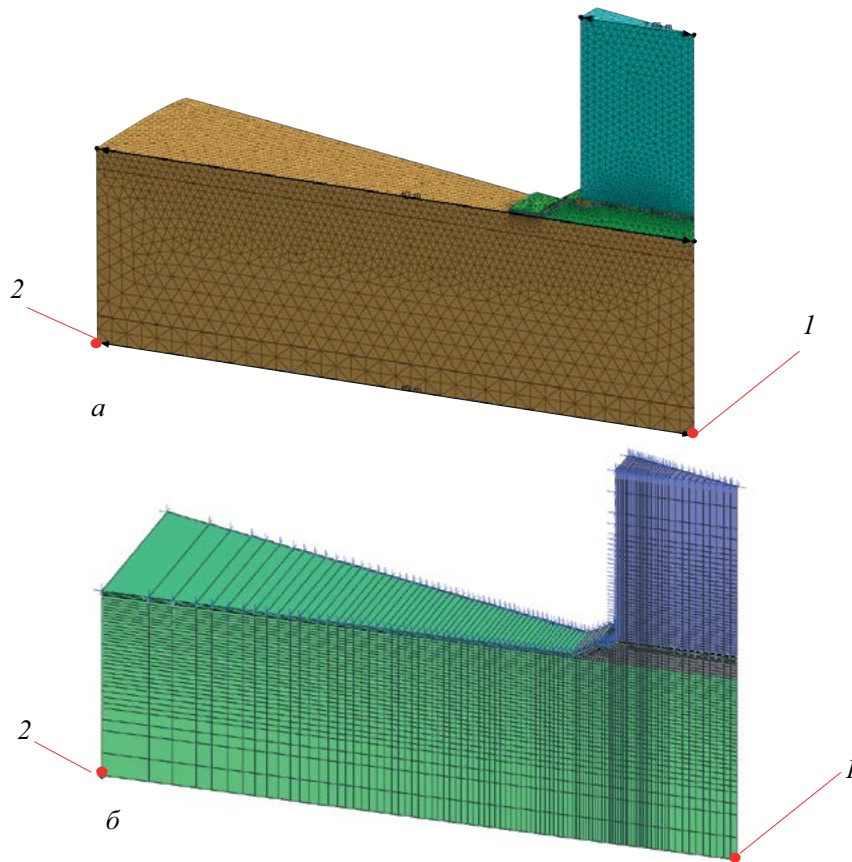


Рис. 1. Коэффициенты теплопроводности мерзлого и талого грунтов:
a — в программе Midas GTS NX; *б* — в программе Termoground; *1* — расположение точки № 1;
2 — расположение точки № 2

$$\lambda_{fT} = (1-n)\lambda_s + nS[(1-f_u)\lambda_i + f_u\lambda_w] + n(1-S)\lambda_v, \quad (11)$$

где $\lambda_s, \lambda_w, \lambda_i, \lambda_v$ — коэффициент теплопроводности материала твердых частиц, воды, льда и пара соответственно.

Вычисление теплопроводности по соотношению компонент грунта не совсем верно с точки зрения физики процесса, поскольку кроме процентного состава грунта на перенос тепла влияют его структура и текстура. В массиве грунта имеют место конвекция и излучение помимо кондуктивного переноса, поэтому реальные зависимости носят весьма сложный характер [11]. В

соответствии с отечественными нормами определение коэффициента теплопроводности осуществляется в зависимости от плотности сухого грунта и его влажности на основе специальных таблиц [7]. Данный подход реализован в пакете Termoground, в котором аналогично эффективной теплоемкости для различных диапазонов температур (Зоны I–IV) производится аппроксимация табулированных величин теплопроводности грунта в талом λ_{th} и мерзлом λ_f состоянии аналогично зависимостям для теплоемкости.

Следует отметить, что до настоящего времени отсутствует завершенная теория, позволяющая учесть и оценить вклад каждого из факторов, которые влияют на теплопроводность грунта,

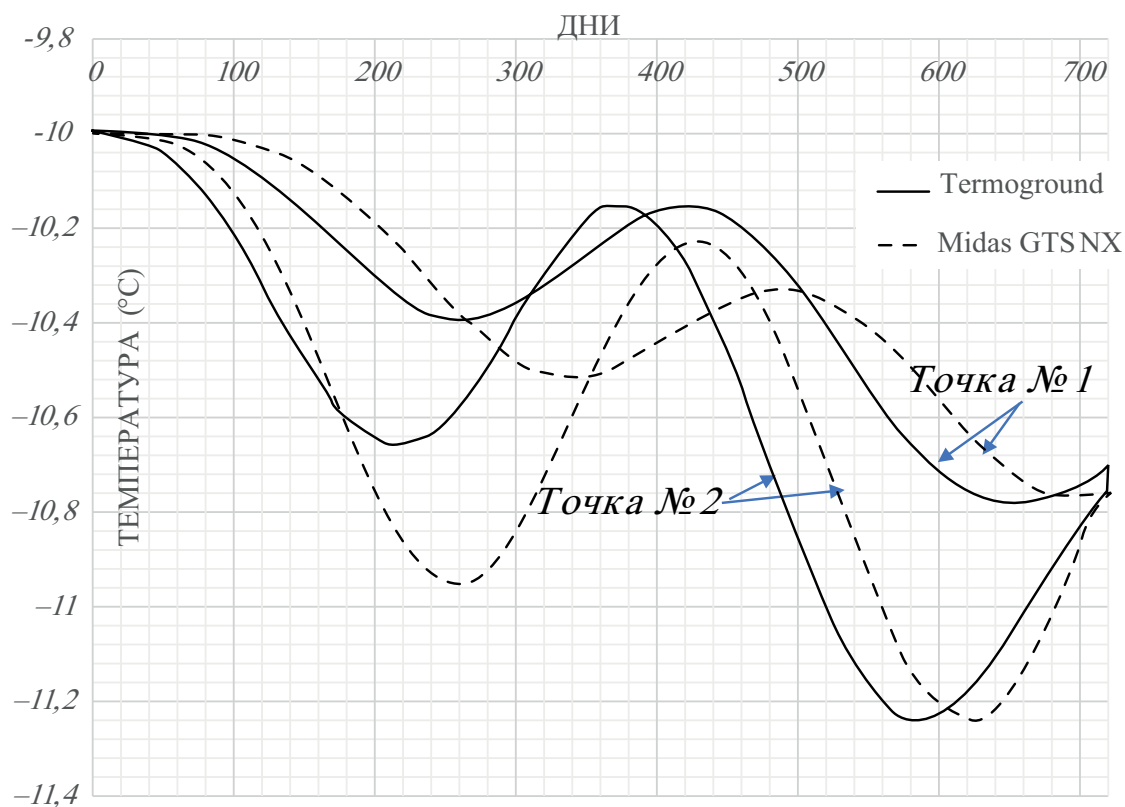


Рис. 2. Графики изменения расчетных температур в характерных точках во времени

можно предположить, что некоторые отличия в определении теплопроводности мерзлого грунта не сильно повлияют на результаты расчета температурных полей в грунте.

Для финальной оценки выполним сопоставление результатов для реальной задачи на основе замечаний, указанных выше. В задаче моделировался резервуар для хранения топлива, устраиваемый на мерзлом грунте. Подушка в основании резервуара имеет несколько слоев различных материалов, в том числе утеплителя.

Грунт основания имеет следующие физические характеристики: температура начала замерзания $T_{bf} = 0$ °C, теплопроводность талого и мерзлого грунта 175 кДж/(сут · м · °C); теплоемкость талого и мерзлого грунта 1700 кДж/(м³ · °C) Плотность скелета 1 г/см³, влажность $w_{tot} = 0,238$, граница раскатывания $w_p = 0,197$, число пластич-

ности $I_p = 0,106$, плотность минеральных частиц 2,66 г/см³.

Из рис. 2 видно хорошую сходимость результатов. Таким образом, можно заключить, что общие теоретические предпосылки, используемые в расчетах мерзлых грунтов с учетом фазовых переходов, весьма схожи, поэтому зарубежные геотехнические программы применимы при моделировании температурных задач в мерзлых грунтах.

Библиографический список

1. Невзоров А. Л. Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах: учебное пособие / А. Л. Невзоров. — М.: АСВ, 2000. — 152 с.
2. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. — М.: Высш. школа, 1973. — 448 с.
3. Кроник Я. А. Термомеханические модели мерзлых грунтов и криогенных процессов / Я. А. Кроник //

Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. — М.: Наука, 1982. — С. 200–211.

4. Кроник Я. А. Расчеты температурных полей и напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений методом конечных элементов / Я. А. Кроник, И. И. Демин. — М.: МИСИ, 1982. — 102 с.

5. Кудрявцев С. А. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечноэлементные расчеты) / С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов. — СПб.: Группа компаний «Геореконструкция», 2014.

6. Парамонов М. В. Напряженно-деформированное состояние системы «основание — сооружение» при неоднородном промерзании. автореф. дисс. канд. техн. наук / М. В. Парамонов. — СПб., 2013. — 12 с.

7. СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04—88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». — Утв. Министром строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ № 915/пр от 30 декабря 2020 г. — М.: ФАУ «ФЦС», 2020 — 135 с.

8. РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. — Утв. Постановление Государственного комитета РСФСР по делам строительства №152 от 20.08.1987 г. — М.: Госстрой РСФСР, 1987 — 80 с.

9. MIDAS. — URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qdm1ZqeC67s> (дата обращения: 13.05.2022).

10. Вавринюк Т. С. Примеры температурных расчетов в ПК PLAXIS / Т. С. Вавринюк // XIII конференция пользователей PLAXIS, октябрь 2020 / ООО «НИП-Информатика». Систем. Требования: PowerPoint. — URL: <https://www.plaxis.ru/content/uploads/2020/11/RPUM-2020-Вавринюк-Т-С.pdf> (дата обращения: 13.05.2022).

11. Ильичев В. А. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / В. А. Ильичев, Р. А. Мангушев. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2014. — 728 с.

Дата поступления: 06.05.2022

Решение о публикации: 24.05.2022

Контактная информация:

СЛИВЕЦ Константин Владимирович — канд. техн. наук, доц.; kslivez@yandex.ru

КОЛМОГорова Светлана Сергеевна — канд. техн. наук, доц.; kolmogorovsg@list.ru

КОВАЛЕНКО Илья Александрович — аспирант; ilyako27@mail.ru

Frozen Soil Parameters at Numerical Simulation of Thermophysical Tasks

K. V. Slivec, S. S. Kolmogorova, I. A. Kovalenko

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

For citation: Slivec K. V., Kolmogorova S. S., Kovalenko I. A. Frozen Soil Parameters at Numerical Simulation of Thermophysical Tasks // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 359–366. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-359-366

Summary

Purpose: Currently, the most prevalent foreign geotechnical software systems (Midas GTS NX, Plaxis) include modules for thermophysical modeling. Thermophysical modeling is especially important in the design and construction on foundations composed of frozen soils. When carrying out numerical calculations, an important stage is the verification of models, here thermophysical models, of frozen soils for their compliance with theoretical bases and calculation prerequisites, underlying in domestic standards. For this purpose, a comparison was made of theoretical prerequisites in foreign geotechnical complexes with prerequisites underlying in Termoground package which was created with the participation of specialists from the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Petersburg State Transport University, PGUPS [Kudryavtsev S.A., Sakharov I.I., Paramonov V.N.]. This package has a long background of successful use in the practice of calculations and projection; the theoretical premises, implemented therein, are verified and fully comply with the requirements of domestic standards. **Methods:** Conducting theoretical analysis of regulatory and technical documents of foreign software systems. Performing numerical simulation of real thermophysical problems. **Results:** It has been established that dependences underlying foreign geotechnical complexes, in general, have the same theoretical prerequisites as those reflected in domestic regulatory documents; also, at numerical modeling, a satisfactory convergence of the calculated temperature fields in a soil mass for building construction real tasks on frozen ground was noted. **Practical importance:** The obtained results can be used in the practice of design/construction for to set thermophysical parameters for foundation soils in the course of numerical modeling of thermophysical tasks and analysis of geocryological situation of the Far North conditions.

Keywords: Numerical modeling, thermophysical modeling, frozen soil, permafrost soils, soil heat capacity, soil thermal conductivity, midas.

References

1. Nevzorov A. L. *Fundamenty na sezonno-promerzayushchikh gruntakh* [Foundations on seasonally freezing soils]. Moscow: ASV Publ., 2000. 152 p. (In Russian)
2. Tsytoovich N. A. *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Moscow: Vyssh. Shkola Publ., 1973. 448 p. (In Russian)
3. Kronik Ya. A. Termomekhanicheskie modeli merzlykh gruntov i kriogennykh protsessov [Thermomechanical models of frozen soils and cryogenic processes]. *Reologiya gruntov i inzhenernoe merzlotovedenie* [Rheology of soils and engineering permafrost]. Moscow: Nauka Publ., 1982, pp. 200-211. (In Russian)
4. Kronik Ya. A., Demin I. I. Raschety temperaturnykh poley i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntovykh sooruzheniy metodom konechnykh elementov [Calculations of temperature fields and stress-strain state of soil structures by the finite element method]. *MISI* [MISI]. Moscow: 1982. 102 p. (In Russian)

5. Kudryavtsev S. A., Sakharov I. I., Paramonov V. N. *Promerzanie i ottaivanie gruntov (prakticheskie primery i konechnoelementnye raschety): Gruppy kompaniy «Georekonstruktsiya»* [Freezing and thawing of soils (practical examples and finite element calculations): Georeconstruction Group of Companies]. St. Petersburg, 2014. (In Russian)
6. Paramonov M. V. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie sistemy «osnovanie – sooruzhenie» pri neodnomernom promerzanii*. Kand. Diss [Stress-strain state of the "base – structure" system during non-one-dimensional freezing. Cand. Diss]. St. Petersburg, 2013. 12 p. (In Russian)
7. SP 25.13330.2020 «SNiP 2.02.04-88 *Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlykh gruntakh*» – utv. Ministrom stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva RF №915/pr ot 30.12.2020 g. [SP 25.13330.2020 "SNiP 2.02.04-88 Bases and foundations on permafrost soils" – approved. Minister of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation No. 915 / pr dated December 30, 2020]. Moscow: FAU «FTsS» Publ., 2020. 135 p. (In Russian)
8. RSN 67-87. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Sostavlenie prognoza izmeneniy temperaturnogo rezhima vechnomerzlykh gruntov chislennymi metodami* – utv. Postanovlenie Gosudarstvennogo komiteta RSFSR po delam stroitel'stva №152 ot 20.08.1987 g. [RSN 67-87. Engineering surveys for construction. Prediction of changes in the temperature regime of permafrost soils by numerical methods - approved. Decree of the State Committee of the RSFSR for Construction No. 152 dated August 20, 1987]. Moscow: Gosstroy RSFSR Publ., 1987. 80 p. (In Russian)
9. Il'ichev V. A., Mangushev R. A. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenti i podzemnye sooruzheniya* [Handbook of geotechnics. Foundations, foundations and underground structures]. Moscow: Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov Publ., 2014. 728 p. (In Russian)
10. MIDAS. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=qdm1ZqeC67s> (accessed: May 13, 2022).
11. Vavrinyuk T. S. Primery temperaturnykh raschetov v PK PLAXIS. XIII konferentsiya pol'zovateley PLAXIS, oktyabr' 2020 [Examples of temperature calculations in the PLAXIS PC. XIII PLAXIS User Conference, October 2020]. OOO «NIP-Informatika». *Sistem. Trebovaniya: PowerPoint* [NIP-Informatics LLC. System. Requirements: PowerPoint]. Available at: <https://www.plaxis.ru/content/uploads/2020/11/RPUM-2020-Vavrinyuk-T-S.pdf> (accessed: May 13, 2022). (In Russian)

Received: May 06, 2022

Accepted: May 24, 2022

Author's information:

Konstantin V. SLIVETS – PhD in Engineering,
Professor Assistant; kslivez@yandex.ru

Svetlana S. KOLMOGOROVA – PhD in Engineering,
Professor Assistant; kolmogorovsg@list.ru

Ilya A. KOVALENKO – Postgraduate Student;
ilyako27@mail.ru

УДК 624.042.13

Факторы, влияющие на распределение добавочного давления на тоннели метрополитена от наземного строительства

А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков, А. Л. Новиков, А. В. Бенин

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

Для цитирования: Сокорнов А. А., Коньков А. Н., Новиков А. Л., Бенин А. В. Факторы, влияющие на распределение добавочного давления на тоннели метрополитена от наземного строительства // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 367–377. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-367-377

Аннотация

Цель: Выполнить анализ факторов, влияющих на распределение добавочного давления от наземного строительства на обделки перегонных тоннелей метрополитена. **Методы:** Математическое моделирование методом конечных элементов системы, включающей в себя грунтовый массив, обделку перегонного тоннеля и нагрузку от фундамента наземного сооружения. **Результаты:** Установлен вид графика распределения добавочного давления от наземного строительства в ненарушенном массиве и в массиве, напряженно-деформированное состояние которого нарушено проходкой тоннеля. Установлено, что изменение добавочного давления прямо пропорционально изменению нагрузки как по глубине, так и на расстоянии от оси фундамента; этот закон сохраняется при изменении любых других параметров (в ненарушенном грунтовом массиве и в массиве, напряженно-деформированное состояние которого изменено проходкой тоннеля, при разном способе моделирования проходки тоннеля, при использовании разных геомеханических моделей грунта). Установлено, что величина добавочного давления от наземного строительства практически не зависит от способа моделирования проходки тоннеля. Обосновано различие результатов при описании грунта в модели Мора — Кулона и в ее модификации. **Практическая значимость:** Показана возможность достаточно точно определить величину добавочного давления от наземного строительства на обделку тоннеля, не обладая информацией о способе его проходки.

Ключевые слова: Тоннели метрополитена, давление, напряжения, грунтовый массив, метод конечных элементов.

В Санкт-Петербурге, как и в любом крупном городе мира, развитие сети метрополитена сопровождается активным наземным строительством. В некоторых случаях строительство новых жилых и промышленных комплексов затрагивает

территории охранных зон метрополитена. В течение последних лет кафедра «Тоннели и метрополитены» ФГБОУ ВО ПГУПС осуществляла научное сопровождение многих объектов капитального строительства с выполнением геотехнических рас-

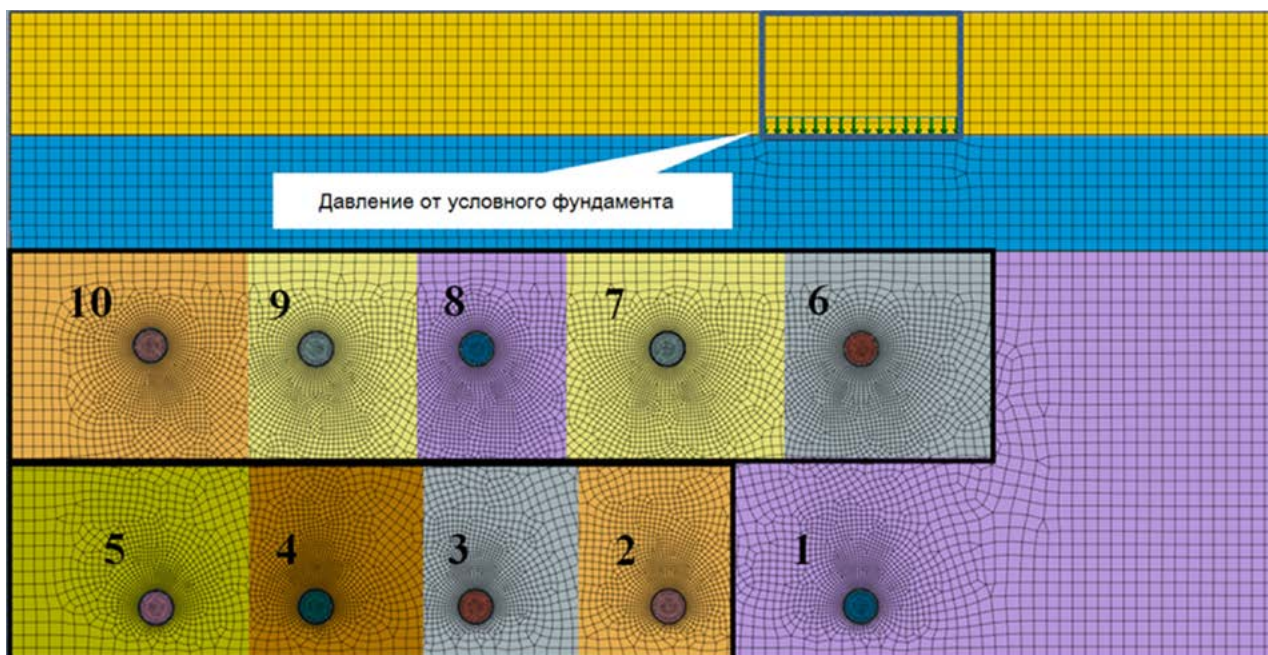


Рис. 1. Общий вид математических моделей

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические характеристики грунтов

| № слоя | Описание грунта | E , МПа | ν | γ , кН/м ³ | C , кПа | ϕ |
|--------|--|-----------|-------|------------------------------|-----------|--------|
| 1 | Мелкие пески и пластичные глины | 12 | 0,3 | 20 | 15 | 19 |
| 2 | Мелкие пески | 28 | 0,2 | 21 | 0 | 34 |
| 3 | Протерозойские синие-зеленые твердые глины | 200 | 0,23 | 22 | 500 | 23 |

четов влияния возводимых зданий на сооружения метрополитена, как с применением аналитических методов, так и с помощью математического моделирования [1, 2]. На данный момент одним из направлений научной деятельности кафедры является установление закономерностей распределения добавочного давления от строящихся зданий на сооружения метрополитена, корректировка или доработка аналитических методик.

Для изучения факторов, влияющих на распределение добавочного давления на тоннели метрополитена от наземного строительства, было рассмотрено одиннадцать плоских математических моделей с расположением перегонного тоннеля на разной глубине и на разном расстоянии от условного фундамента здания (рис. 1). Во всех моделях условный фундамент модели-

ровал работу свайного фундамента в плоской постановке: нагрузка приложена равномерно распределенной непосредственно к уровню острия свай, без учета сил трения свай по грунтам. Ширина подошвы условного фундамента принята 30 м.

Размеры грунтового массива составили 100 м по высоте и 200 м по ширине. Массив состоит из трех слоев, которые являются типичными для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга: верхний слой представлен мелкими песками и пластичными глинами, средний слой — мелкими песками, а нижний слой — коренными грунтами Санкт-Петербурга — протерозойскими синие-зелеными твердыми глинами. На начальном этапе расчетов для описания физико-механических характеристик грунтов была применена

модель Мора — Кулона. Характеристики грунтов приведены в табл. 1.

Для описания свойств тоннельных обделок применялась линейно-деформируемая модель. Характеристики железобетона принимались следующими:

- модуль упругости: $E = 34\,500$ МПа;
- коэффициент Пуассона: $\nu = 0,2$;
- объемный вес: $\gamma = 24$ кН/м³.

В моделях № 1–5 тоннель расположен на глубине 70 м от низа условного фундамента (на глубоком заложении) на расстояниях 0, 30, 60, 85 и 110 м от оси фундамента. В моделях № 6–10 тоннель расположен на глубине 30 м от низа условного фундамента (на мелком заложении) на тех же расстояниях от его оси. Помимо указанных 10 моделей рассматривалась еще одна модель аналогичных размеров, но без тоннеля.

В каждой модели выполнялась серия расчетов для определения влияния ряда факторов на распределение добавочного давления:

- 1) с разной нагрузкой по подошве условного фундамента здания (300 кПа и 150 кПа);
- 2) с учетом проходки тоннеля и без него (напряжения в нетронutom грунтовом массиве);
- 3) с разным начальным напряженным состоянием системы «обделка — грунтовый массив» (с учетом снятия давления на контуре выработки и без него);
- 4) с разной геомеханической моделью вмещающего тоннель грунта (модель Мора — Кулона и модифицированная модель Мора — Кулона, или модель упрочняющегося грунта).

С учетом требований отечественных норм, а также из расчетного опыта кафедры «Тоннели и метрополитены» нагрузка от здания принималась равной 15 кПа от каждого этажа, таким образом, нагрузка в 300 кПа эквивалентна нагрузке от двадцатиэтажного здания, 150 кПа — нагрузке от десятиэтажного здания.

Проходка тоннеля в методе конечных элементов может моделироваться двумя способами [3–6]:

1) активацией элементов обделки в напряженном грунтовом массиве, что характерно для случая, когда обделка тоннеля воспринимает всю нагрузку от вышележащих слоев грунта (рис. 2, точка 1);

2) предварительным снятием давления на контуре выработки (так называемый β -метод) до активации элементов обделки (рис. 2, точка 2), что позволяет моделировать развитие начальных деформаций незакрепленной выработки.

Первый способ не отражает реальное взаимодействие в системе «обделка — грунтовый массив» при проходке тоннеля, особенно на глубоком заложении, второй способ отличается неточностью в назначении коэффициента β — коэффициента снижения горного давления на контуре выработки (в настоящее время на кафедре «Тоннели» ведутся исследовательские работы, посвященные данному вопросу [7]). И в том и в другом случае в массиве формируется разное напряженно-деформированное состояние, которое характеризуется разными величинами горного давления на обделку.

Исходя из этого, предварительно было выдвинуто предположение о влиянии напряженного состояния массива в окрестности тоннельной выработки на величину добавочного давления в зависимости от способа моделирования проходки. Однако результаты моделирования показали, что величина добавочного давления практически не зависит от способа моделирования проходки (табл. 2).

Этот неочевидный вывод имеет высокую практическую ценность — возможность достаточно точно определить величину добавочного давления на обделку, не обладая всей полнотой знаний о способе ее проходке.

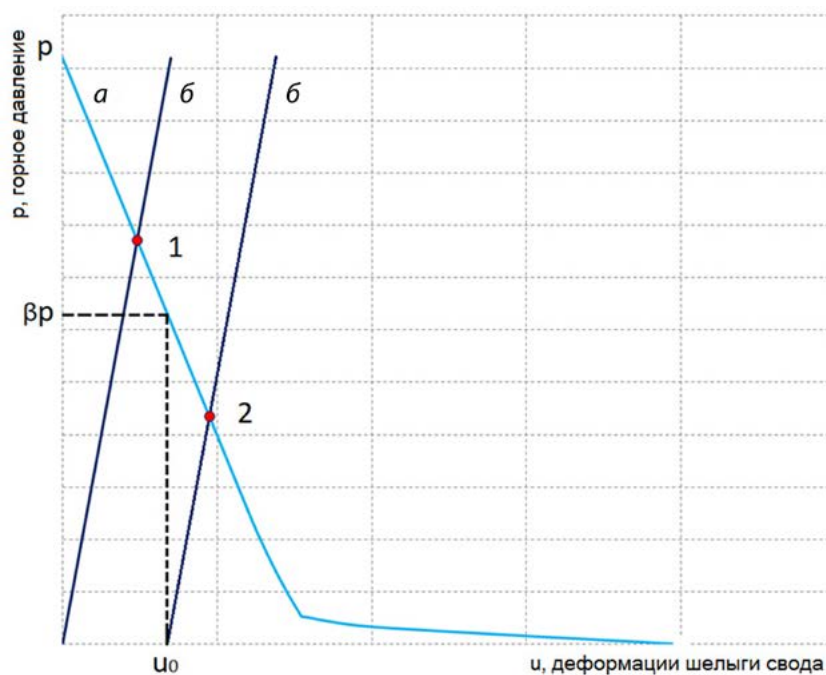


Рис. 2. Графики взаимодействия в системе «обделка — грунтовый массив»:
a — график равновесного состояния массива;
б — график линейно нарастающего сопротивления крепи

ТАБЛИЦА 2. Величина добавочного давления

| № модели | Расстояние от оси фундамента, м | Давление на обделку, т/м ² | | Добавочное давление, т/м ² | Давление на обделку, т/м ² | | Добавочное давление, т/м ² |
|--------------------|---------------------------------|--|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| | | до возведения здания | после возведения здания | | до возведения здания | после возведения здания | |
| | | Нагрузка от полного веса столба грунта | | | Снятие давление на контуре выработки | | |
| Глубокое заложение | | | | | | | |
| 1 | 0 | 113,4 | 118,2 | 4,8 | 51,0 | 55,9 | 4,9 |
| 2 | 30 | | 117,9 | 4,5 | | 55,5 | 4,5 |
| 3 | 60 | | 116,2 | 2,8 | | 53,7 | 2,7 |
| 4 | 85 | | 114,9 | 1,5 | | 52,4 | 1,4 |
| 5 | 110 | | 114,1 | 0,7 | | 51,8 | 0,8 |
| Мелкое заложение | | | | | | | |
| 6 | 0 | 61,5 | 67,2 | 5,7 | 25,4 | 31,0 | 5,6 |
| 7 | 30 | | 67,0 | 5,5 | | 30,9 | 5,5 |
| 8 | 60 | | 63,5 | 2,0 | | 27,3 | 1,9 |
| 9 | 85 | | 62,4 | 0,9 | | 26,3 | 0,9 |
| 10 | 110 | | 62,1 | 0,6 | | 26,0 | 0,6 |

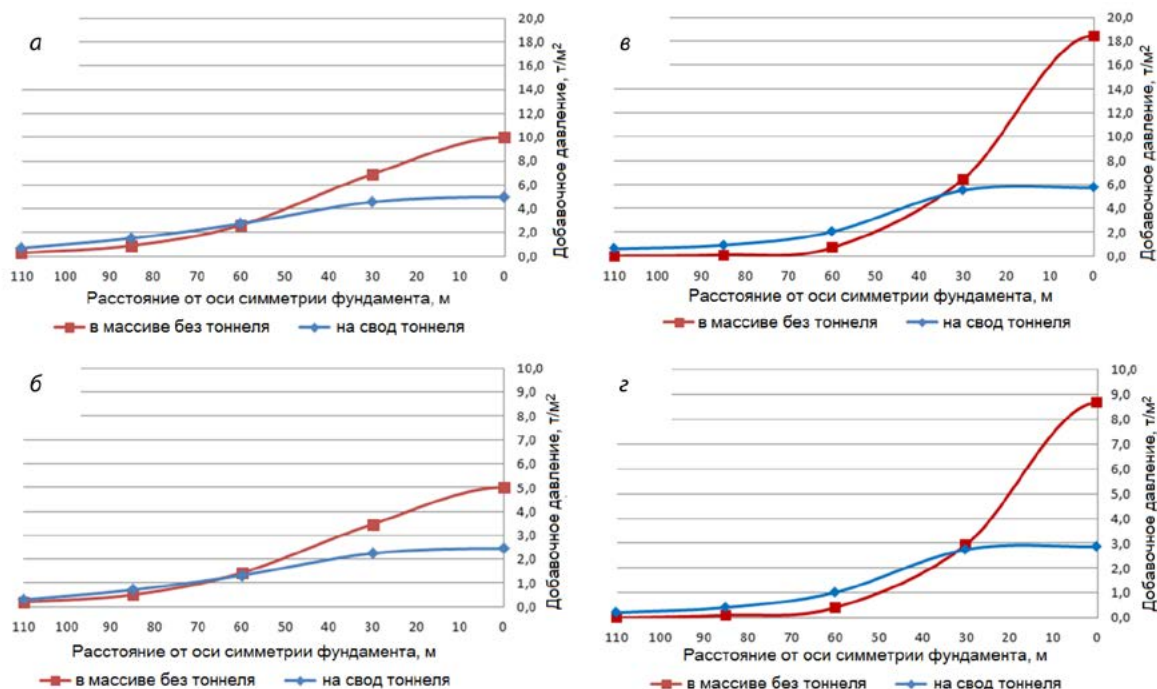


Рис. 3. Графики изменения добавочного давления:

- а* — на глубоком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента;
б — на глубоком заложении при нагрузке 150 кПа по подошве фундамента;
в — на мелком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента;
г — на мелком заложении при нагрузке 150 кПа по подошве фундамента

По результатам моделирования были построены графики распределения добавочного давления, представленные на рис. 3. Из них следует, что нагрузка по подошве фундамента определяет интенсивность добавочного давления, но не влияет на характер его распределения: графики *а* и *б*, а также *в* и *г* отличаются друг от друга исключительно значениями по оси ординат. То есть изменение добавочного давления прямо пропорционально изменению нагрузки. Эта зависимость сохраняется не только по глубине (что соответствует аналитическому подходу, закрепленному в СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», п. 5.6.32), но и на расстоянии от оси фундамента. Причем этот закон сохраняется при изменении любых других параметров: в разных моделях грунта и в разном напряженном состоянии системы «обделка — грунтовый массив», в ненарушенном грунтовом

массиве и в массиве, НДС которого изменено проходкой тоннеля.

В ненарушенном массиве, чье НДС не изменено проходкой тоннеля, распределение добавочного давления подчиняется следующему закону: пиковое значение добавочного давления по оси фундамента, затем затухание и асимптотическое приближение к нулю на расстоянии от оси. С глубиной меняется очертание графика затухания (см. рис. 3): более плавное на глубоком заложении (рис. 3, графики *а* и *б*) и более резкое на мелком (рис. 3, графики *в* и *г*).

Сравнивая графики добавочного давления для ненарушенного массива и для массива с тоннелем, можно сделать вывод, что проходка тоннеля вносит серьезные изменения в график распределения добавочного давления. По оси фундамента добавочное давление уменьшается в разы, в виду чего затухание становится более плавным.

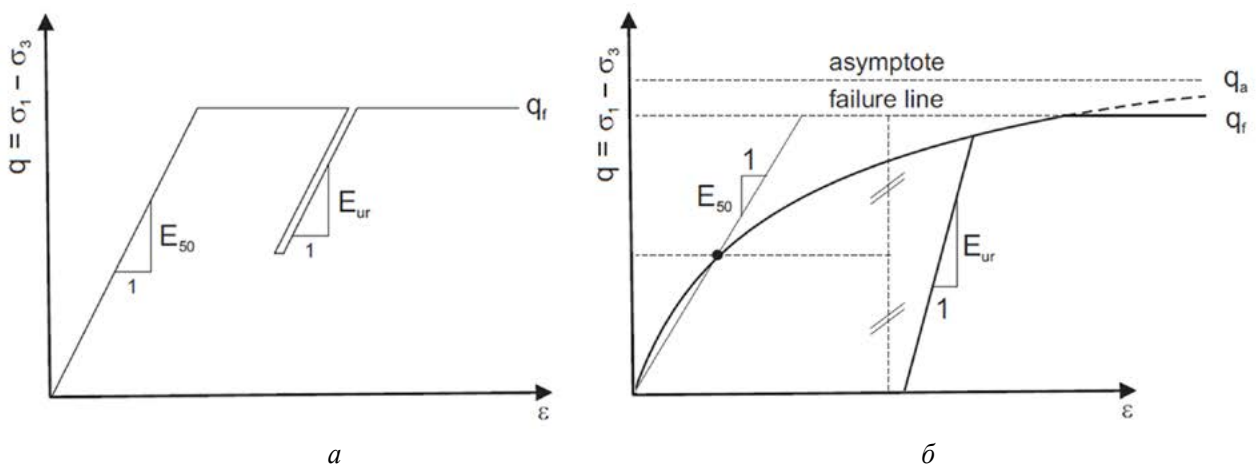


Рис. 4. Модели Мора — Кулона:
a — классическая; *б* — модифицированная

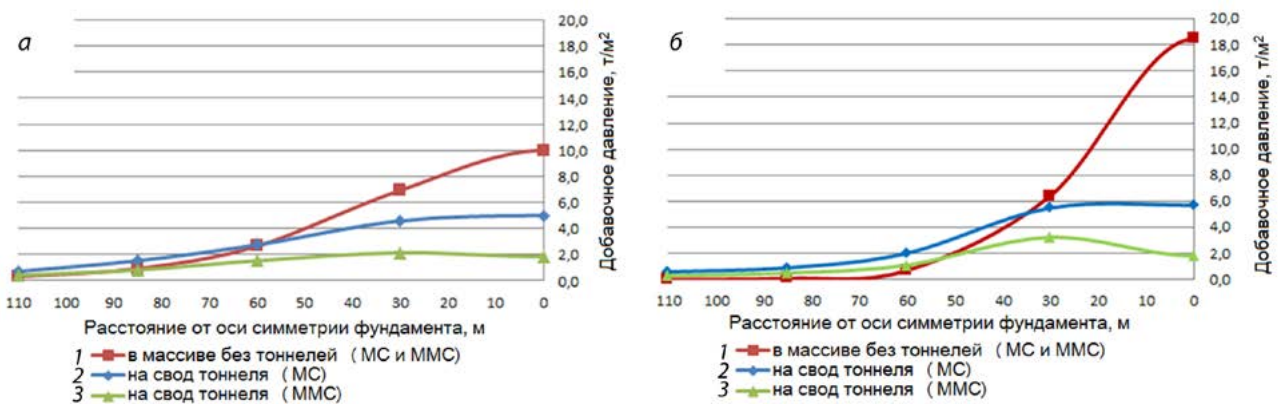


Рис. 5. Графики изменения добавочного давления:
a — на глубоком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента;
б — на мелком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента

На некотором расстоянии графики добавочного давления для нетронутого массива и для массива с тоннелем сближаются между собой.

На следующем этапе исследования выполнялась оценка влияния применяемой геомеханической модели грунта на распределение добавочного давления на тоннель. Модель Мора — Кулона (далее — модель МС), чаще всего применяемая в инженерных расчетах [8–10], использует один тип модуля упругости — секущий модуль упругости E_{50} , определяемый при достижении образца грунта половины разрушающих деформаций при испытаниях. Модуль упругости при разгрузке E_{ur} назначается таким же, что и при нагружении (рис. 4, *a*).

Модифицированная модель Мора — Кулона, иначе модель упрочняющего грунта (далее — модель ММС) [11–14], позволяет отдельно указывать модуль упругости при разгрузке E_{ur} , по умолчанию принимаемый равным трехкратному значению секущего модуля упругости: $E_{ur} = 3 \cdot E_{50}$ (рис. 4, *б*). В данных исследованиях геомеханические модели отличались главным образом этим показателем — модулем упругости при разгрузке.

На рис. 5 представлены графики распределения добавочного давления при использовании рассмотренных геомеханических моделей. При этом в ненарушенном массиве, когда при сооружении здания выполняется только нагружение,

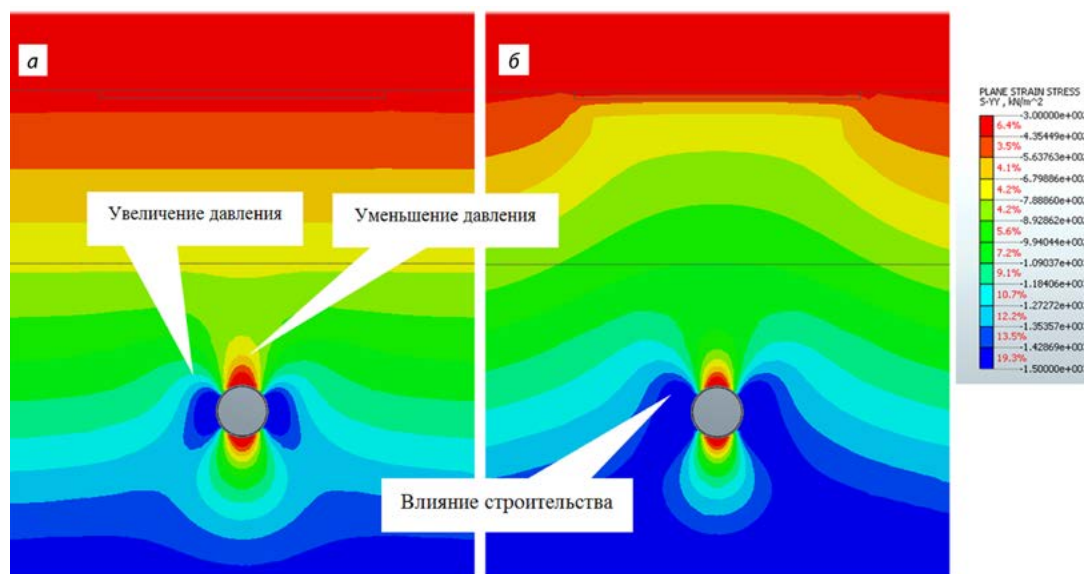


Рис. 6. Изменение изополей вертикальных напряжений в окрестности тоннельной выработки в результате наземного строительства: *a* — до строительства здания; *b* — после строительства здания

модели МС и ММС выдают практически одинаковые значения добавочного давления (рис. 5, кривые 1).

Проходка тоннеля связана с разгрузкой массива в окрестности сводовой части выработки, поэтому повторное нагружение, вызванное строительством здания, по разному интерпретируется в моделях МС (рис. 5, кривые 2) и ММС (рис. 5, кривые 3): в моделях ММС значения добавочного давления примерно вдвое меньше по сравнению с моделью МС. Также в модели ММС сближение графиков добавочного давления для ненарушенного массива и для массива с тоннелем на расстоянии от оси фундамента становится более заметным.

При анализе графиков распределения добавочного давления возникает два научных вопроса:

1. С чем связано значительное уменьшение добавочного давления по оси фундамента при проходке тоннеля по сравнению с добавочным давлением в ненарушенном массиве?

2. За счет чего в модифицированной модели Мора — Кулона происходит уменьшение добавочного давления по оси фундамента по отношению к добавочному давлению «под его краями»?

Этот эффект сильнее заметен на мелком заложении (рис. 5, *b*).

Объяснение этих наблюдаемых явлений — предмет дальнейших научных исследований и обсуждений. Предварительно можно вывести следующую гипотезу: большее значение добавочного давления воспринимает более нагруженная часть массива, а именно в боках тоннельной выработки, что можно наблюдать в виде сгущения изополей напряжений (рис. 6). При проходке тоннеля в результате процессов перераспределения напряжений (описанных в литературе, например [15]) в сводовой части тоннельной выработки происходит уменьшение напряжений, в то время как в боках выработки происходит концентрация вертикальных сжимающих напряжений, то, что профессор П. Луарди называл «арочным эффектом» (рис. 6, *a*). После строительства здания в распределение изополей привносится возмущение и область массива в боках тоннельной выработки воспринимает большую часть добавочного давления (рис. 6, *b*).

Это явление можно отразить графически на рис. 7. Графики добавочного давления для точек А следует интерпретировать как графики доба-

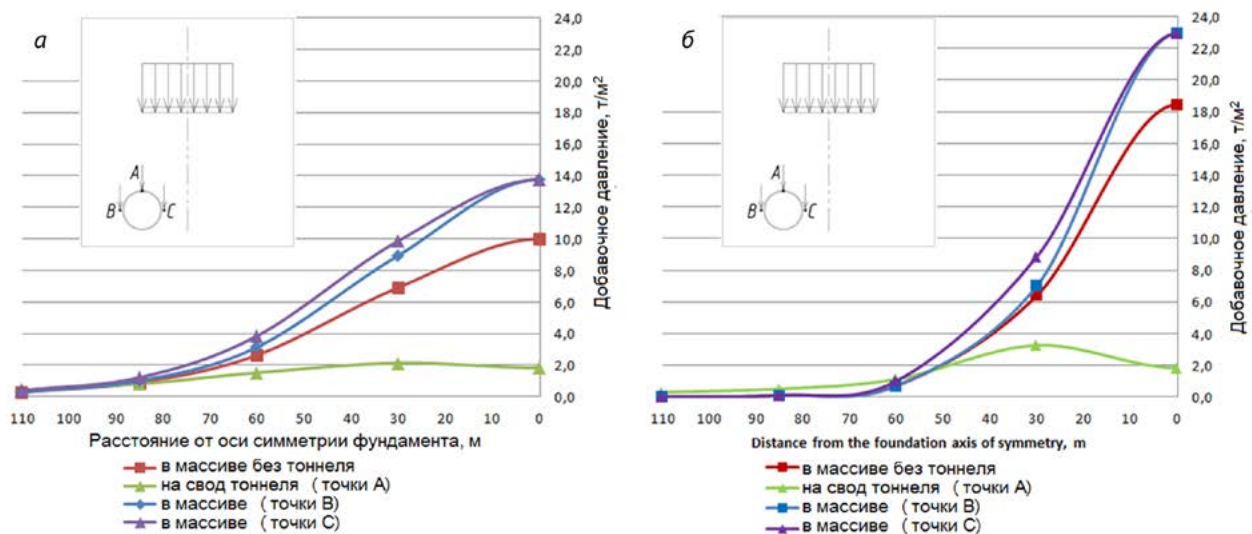


Рис. 7. Графики изменения добавочного давления (модель МСС):
а — на глубоком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента;
б — на мелком заложении при нагрузке 300 кПа по подошве фундамента

вочного давления на тоннельную обделку, а для точек *B* и *C* — как графики добавочного давления для массива в боках выработки. Как видно из графиков, в то время как сводовая часть выработки воспринимает незначительную часть добавочного давления, по сравнению с добавочным давлением в нетронутым массиве, бока выработки концентрируют напряжения так же, как и при проходке тоннеля. По оси фундамента добавочное давление в точках *B* и *C* одинаково и превышает добавочное давление для нетронутого массива. По мере удаления тоннеля от оси фундамента добавочное давление в точках *B* и *C* становится неравномерным: сильнее нагружается ближняя к оси фундамента точка *C*, часть давления передается на свод в точку *A* (это объясняет небольшое увеличение добавочного давления «под краями» фундамента), затем во всех точках давление снижается и графики асимптотически приближаются к нулю.

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Было установлено, что в ненарушенном грунтовом массиве распределение добавочного

давления от наземного строительства подчиняется следующему закону:

- пиковое значение добавочного давления по оси фундамента, затем затухание и асимптотическое приближение к нулю на расстоянии от оси, при этом с глубиной меняется очертание графика затухания: более плавное на глубоком заложении и более резкое на мелком.

2. Проходка тоннеля вносит серьезные изменения в закон распределения добавочного давления:

- по оси фундамента добавочное давление уменьшается в разы, в виду чего затухание становится более плавным, на некотором расстоянии графики добавочного давления для нетронутого массива и для массива с тоннелем сближаются между собой.

3. В результате изменения в моделях величины нагрузки по подошве фундамента были выявлены следующие закономерности:

- изменение добавочного давления прямо пропорционально изменению нагрузки как по глубине, так и на расстоянии от оси фундамента;

- этот закон сохраняется при изменении любых других параметров: в ненарушенном грунтовом

массиве и в массиве, напряженно-деформированное состояние которого изменено проходкой тоннеля, в разном напряженном состоянии системы «обделка — грунтовый массив», в разных геомеханических моделях грунта.

4. В результате изменения в моделях параметров проходки тоннеля («мгновенная» активация элементов обделки или учет начальных деформаций контура незакрепленной выработки) были выявлены следующие закономерности:

– величина добавочного давления практически не зависит от способа моделирования проходки;

– из этого, в свою очередь, следует вывод о возможности достаточно точно определить величину добавочного давления на обделку, не обладая всей полнотой знаний о способе ее проходке.

5. В результате изменения применяемой геомеханической модели грунта были выявлены следующие закономерности:

– в ненарушенном массиве, когда при сооружении здания выполняется только нагружение, геомеханические модели МС и ММС выдают практически одинаковые значения добавочного давления;

– проходка тоннеля связана с разгрузкой массива в окрестности сводовой части выработки, поэтому повторное нагружение, вызванное строительством здания, по-разному интерпретируется в разных геомеханических моделях: в моделях ММС значения добавочного давления примерно вдвое меньше по сравнению с моделью МС, также в модели ММС сближение графиков добавочного давления для ненарушенного массива и для массива с тоннелем на расстоянии от оси фундамента становится более заметным.

Достоверность полученных выводов следует подтвердить дальнейшими исследованиями.

Библиографический список

1. Lediaev A. P. Influence evaluation of buildings constructed in protected zone on St. Petersburg subway under-

ground structures stress-strain state / A. P. Lediaev, A. N. Konkov, A. L. Novikov, D. A. Soloviev // *Transportation Geotechnics and Geoecology*, TGG 2017, 17–19 May 2017. — Saint Petersburg, Russia. — 2017. — Pp. 492–499. — DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.079.

2. Lediaev A. P. An assessment of the sewer tunnel stress-strain behavior during the reconstruction of an object of cultural heritage / A. P. Lediaev, V. N. Kavkazskiy, D. A. Grafov, D. A. Soloviev, A. V. Benin // *Key Trends in Transportation Innovation*, E3S Web of conferences, KTTI 2019. — 2020. — 02008. — DOI: 10.1051/e3sconf/202015702008.

3. Möller S. Ch. Tunnel induced settlements and structural forces in linings / S. Ch. Möller. — Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart. — 2006.

4. Vermeer P. A. On the ground response curve / P. A. Vermeer, T. Marcher, N. Ruse // *Felsbau*. — № 20(6). — 2002. — Pp. 19–24.

5. Schikora R. Berechnungsmethoden moderner bergmännischer Bauweisen beim U-Bahn-Bau / K. Schikora, T. Fink // *Bauingenieur*. — 1982. — № 57. — Pp. 193–198.

6. Ghorbani Ali. A comprehensive solution for the calculation of ground reaction curve in the crown and sidewalls of circular tunnels in the elastic-plastic-EDZ rock mass considering strain softening / Ali Ghorbani // *Tunnelling and Underground Space Technology*. — 2019. — Vol. 84. — Pp. 413–431. — DOI: 10.1016/j.tust.2018.11.045.

7. Сокорнов А. А. Моделирование проходки тоннеля глубокого заложения в методе конечных элементов / А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков // *Путевой навигатор*. — 2022. — № 50(76). — С. 36–44.

8. Chen W. An integrated numerical model for the stability of artificial submarine slope under wave load / W. Chen, G. Liu, Ya Li, G. Chen, D. Jeng et al. // *Coastal Engineering*. — 2020. — Vol. 158. — DOI: 10.1016/j.coastaleng.2020.103698.

9. Tornborg J. Modelling the construction and long-term response of Göta Tunnel / J. Tornborg, M. Karlsson, A. Kullingsjö, M. Karstunen // *Computers and Geotechnics*. — 2021. — Vol. 134. — DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104027.

10. Shah S. Numerical modelling of soil-nail and secant pile in Plaxis 2D: a case study of tomb of Jam Nizam-Al-Din

Samoo, Makkli Thatta / S. Shah, A. Kumar, T. Ali et al. // Civil and Environmental Engineering. — Vol. 17. — Iss. 2. — Pp. 706–717. — DOI: 10.2478/cee-2021-0070.

11. Ezzeldin I. Three-dimensional finite element modeling of corrugated metal pipes / I. Ezzeldin, Hany el Naggar // Transportation Geotechnics. — 2021. — Vol. 27. — DOI:10.1016/j.trgeo.2020.100467.

12. Agalianos A. Numerical analysis of surface foundation subjected to strike-slip faulting: model boundaries, pre-softening volumetric response, parametric study / A. Agalianos, I. Anastasopoulos // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2021. — Vol. 151. — DOI:10.1016/j.soildyn.2021.106979.

13. Gavin K. A review of CPT based axial pile design in the Netherlands / K. Gavin, M. S. Kovacevic, D. Igoe // Underground Space. — Vol. 6. — Iss. 1. — 2021. — DOI: 10.1016/j.undsp.2019.09.004.

14. Mohsan M. On the use of different constitutive models in data assimilation for slope stability / M. Mohsan,

P. J. Vardon, F. C. Vossepoel // Computers and Geotechnics. — 2021. — Vol. 138. — DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104332.

15. Lunardi P. Design and construction of tunnels. Analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS) / P. Lunardi // Springer Verlag Berlin Heidelberg. — 2008.

Дата поступления: 04.05.2022

Решение о публикации: 17.05.2022

Контактная информация:

СОКОРНОВ Антон Александрович — старший преподаватель; scarlunch@mail.ru

КОНЬКОВ Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент; ankonkov@yandex.ru

НОВИКОВ Анатолий Леонидович — старший преподаватель; snoval@yandex.ru

БЕНИН Андрей Владимирович — канд. техн. наук, заведующий ИЛ «Механическая лаборатория им. проф. Н. А. Белелюбского»;

benin.andrey@mail.ru

Factors Affecting Additional Pressure Distribution from Ground Construction on Subway Tunnels

A. A. Sokornov, A. N. Konkov, A. L. Novikov, A. V. Benin

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

For citation: Sokornov A. A., Konkov A. N., Novikov A. L., Benin A. V. Factors Affecting Additional Pressure Distribution from Ground Construction on Subway Tunnels // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 367–377. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-367-377

Summary

Purpose: To analyze the factors affecting pressure distribution from ground construction on subway tunnel linings. **Method:** Mathematical modeling by finite element method of a system that includes a soil massif, an interstation tunnel lining and a load from ground building foundation. **Results:** The type of additional pressure distribution graph from ground construction in inviolate massif and in the massif, which stress-strain state is distorted by tunneling, is established. It is found that the change of additional pressure is directly proportional to load change as by depth as well as by distance from foundation axis; this law is preserved at any other parameter change (in inviolate soil massif and in the massif which stress-strain state is changed by tunneling, at various ways of tunneling modeling, at the use of various geomechanical soil models). It is established that the value of additional pressure from ground construction practically doesn't depend on tunneling modeling method. The difference between the results at soil description via Mohr-Coulomb model and via its modification is substantiated. **Practical importance:** It is shown the possibility to determine accurately the amount of additional pressure from ground construction on tunnel lining without having information on tunneling method.

Keywords: Subway tunnels, ground pressure, stress-strain, soil massif, finite element method.

References

1. Lediaev A. P., Konkov A. N., Novikov A. L., Soloviev D.A. Influence evaluation of buildings constructed in protected zone on St. Petersburg subway underground structures stress-strain state. *Transportation Geotechnics and Geocology*. May 17-19, 2017. St. Petersburg, Russia. 2017, pp. 492-499. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.079.
2. Lediaev A. P., Kavkazskiy V. N., Grafov D. A., Soloviev D. A., Benin A. V. An assessment of the sewer tunnel stress-strain behavior during the reconstruction of an object of cultural heritage. *Key Trends in Transportation Innovation, E3S Web of conferences, KTTI 2019*. 2020. 02008. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702008.
3. Möller S. Ch. Tunnel induced settlements and structural forces in linings. *Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart*. 2006.
4. Vermeer P. A., Marcher T., Ruse N. On the ground response curve. *Felsbau*. 2002, I. 20 (6), pp. 19–24.
5. Schikora R, Fink T. Berechnungsmethoden moderner bergmännischer Bauweisen beim U-Bahn-Bau. *Bauingenieur*. 1982, I. 57, pp. 193–198.
6. Ghorbani Ali. A comprehensive solution for the calculation of ground reaction curve in the crown and sidewalls of circular tunnels in the elastic-plastic-EDZ rock mass considering strain softening. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 84, pp. 413-431. DOI: 10.1016/j.tust.2018.11.045.
7. Sokornov A. A. Modelirovanie prokhodki tonnelya glubokogo zalozheniya v metode konechnykh elementov [Simulation of deep tunneling in the finite element method]. *Putevoy navigator* [Travel navigator]. 2022, I. 50 (76), pp. 36-44. (In Russian)
8. Weiyun Chen, Ghenglin Liu, Ya Li, Guoxing Chen, Dongsheng Jeng, Shencong Liao, Jin Yu. An integrated numerical model for the stability of artificial submarine slope under wave load. *Coastal Engineering*. 2020, vol. 158. DOI:10.1016/j.coastaleng.2020.103698.
9. Tornborg J, Karlsson M., Kullingsjö A., Karstunen M. Modelling the construction and long-term response of Göta Tunnel. *Computers and Geotechnics*. 2021, vol. 134. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104027.
10. Shah S., Kumar A., Ali T., Hakro M., Zardari M. Numerical modelling of soil-nail and secant pile in Plaxis 2D: a case study of tomb of Jam Nizam-Al-Din Samoo, Makkli Thatta. *Civil and Environmental Engineering*. 2021, vol. 17, I. 2, pp. 706-717. DOI: 10.2478/cee-2021-0070.
11. Ezzeldin I., Hany el Naggar. Three-dimensional finite element modeling of corrugated metal pipes. *Transportation Geotechnics*. 2021, vol. 27. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100467.
12. Agalianos A., Anastasopoulos I. Numerical analysis of surface foundation subjected to strike-slip faulting: model boundaries, pre-softening volumetric response, parametric study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021, vol. 151. DOI:10.1016/j.soildyn.2021.106979.
13. Gavin K., Kovacevic M. S., Igoe D. A review of CPT based axial pile design in the Netherlands. *Underground Space*. 2021, vol. 6, I. 1. DOI:10.1016/j.undsp.2019.09.004.
14. Mohsan M., Vardon P. J., Vossepoel F. C. On the use of different constitutive models in data assimilation for slope stability. *Computers and Geotechnics*. 2021, vol. 138. DOI:10.1016/j.compgeo.2021.104332.
15. Pietro Lunardi. Design and construction of tunnels. Analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS). Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

Received: May 04, 2022

Accepted: May 17, 2022

Author's information:

Anton A. SOKORNOV — Senior Lecturer;
scarlunch@mail.ru

Alexandr N. KONKOV — PhD in Engineering,
Associate Professor; ankonkov@yandex.ru

Anatoliy L. NOVIKOV — Senior Lecturer;
snoval@yandex.ru

Andrey V. BENIN — PhD in Engineering,
Head of «Prof. N. A. Belolyubsky Mechanical
Laboratory»; benin.andrey@mail.ru

УДК 693.3

Инновационный конструкционно-теплоизоляционный бетон для изоляции и повышения устойчивости мерзлых грунтов основания

И. В. Степанова, М. Абу-Хасан, В. Я. Соловьева

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

Для цитирования: *Степанова И. В., Абу-Хасан М., Соловьева В. Я.* Инновационный конструкционно-теплоизоляционный бетон для изоляции и повышения устойчивости мерзлых грунтов основания // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 378–389. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-378-389

Аннотация

Цель: Создание высокоэффективного теплоизоляционного конструкционного бетона, рекомендуемого для изоляции и предотвращения оттаивания вечномерзлых грунтов. **Методы:** При проведении исследований использовали ГОСТ 25820—2014 «Бетоны легкие. Технические условия», ГОСТ 25485—2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия». Определение прочности и обработка результатов — по ГОСТ 10180—2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»; коэффициент теплопроводности определяли по ГОСТ 7076—99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме»; морозостойкость бетона по ГОСТ 10060—2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости»; плотность бетона в состоянии естественной влажности — по ГОСТ 12730.1—2020 «Бетоны. Методы определения плотности». Установлено экспериментально, что для создания высокоэффективного теплоизоляционно-конструкционного бетона целесообразно в качестве заполнителя использовать пеностекло фракции 1,25–2,5 мм, D250, $\lambda \approx 0,06$ Вт/м·°С и для создания прочной и надежной матрицы на цементной основе эффективно использовать тонкодисперсный микрокремнезем в сочетании с комплексной химической добавкой на поликарбоксилатной основе, модифицированной нанодисперсиями диоксида кремния, SiO₂. **Результатами** физико-механических исследований подтверждено, что эффективно использовать совместно частицы диоксида кремния микро- и наноразмера в сочетании с ПАВ, представленными поликарбоксилатными полимерами, при этом формируется пеностеклобетон с наилучшими показателями по прочности на сжатие и значительно повышается прочность на растяжение при изгибе, коэффициент трещиностойкости наномодифицированного пеностеклобетона, $K_{тр} = R_{изг}/R_{сж} = 3,6/13,3 = 0,27$, имеет достаточно высокое значение, что должно обеспечивать повышенную трещиностойкость и надежность защитному покрытию. Для повышения плотности, прочности без ухудшения теплоизолирующих показателей целесообразно дополнительно использовать в качестве наполнителя тонкомолотый доменный шлак, который повышает связность пеностеклобетонной смеси и прочность пеностеклобетона. **Практическая значимость:** Рациональное соотношение компонентов наномодифицированной пеностеклобетонной смеси обеспечивает создание

высокоподвижной пеностеклобетонной смеси, обладающей хорошей удобоукладываемостью, и на ее основе формируется уникальный теплоизоляционно-конструкционный материал со следующими характеристиками: $D900$; $\lambda = 0,14 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $B_{12}, B_{ib}, 2,9 F_1 300$, что характеризует его как теплоизоляционный материал повышенной надежности и долговечности, который целесообразно рекомендовать для суровых регионов Арктики.

Ключевые слова: Пеностеклобетон, пеностекло, теплоизоляционно-конструкционный материал, надежность, долговечность, комплексная химическая добавка, коэффициент теплопроводности, морозостойкость, прочность.

Введение

Дорожное строительство в Арктике, в зоне вечной мерзлоты, ведется в экстремальных природно-климатических условиях, в основном при низких температурах в зимний период, который длится до десяти месяцев. В арктической зоне грунты, представленные песчаниками, глинами, суглинками, являются проблемными грунтами и ведут они себя непредсказуемо.

Грунты подвергаются сезонному промерзанию; увлажнению в непродолжительный летний период — все это создает неблагоприятные, суровые условия строительства дорожных магистралей в северных районах.

В период короткого арктического лета температура имеет невысокие положительные значения, в основном от 0 до 10 °C, и при этом происходит оттаивание грунтов на разную глубину от 0,1 до 2,0 м.

Неравномерное таяние грунтов оказывает негативное влияние на устойчивость верхнего дорожного покрытия, это приводит к его деформациям и возможному появлению трещин, а также в результате частичного оттаивания грунта происходит его «проседание», теряется монолитность, а при понижении температуры до отрицательных значений происходит замерзание влаги в массиве грунта, что приводит к пучению, все это создает определенные сложности и при строительстве дорожной конструкции, и при ее эксплуатации. Повреждение дорожных конструкций создает определенные проблемы в технологиче-

ском и экономическом плане, так как ремонтные работы в условиях Арктической зоны сложно проводить, что значительно снижает пропускную способность магистрали, а также необходимо учитывать, что стоимость ремонтных работ в условиях Арктической зоны очень высокая.

Мерзлый грунт представляет систему, состоящую из воды, газа, льда и твердых частиц, которая представляет единый материал, обладающий достаточно высокой прочностью, примерно 5,0–7,0 МПа. Одной из задач при строительстве дорог в условиях Арктической зоны является создание таких условий, которые позволили бы сохранить основание дорожной конструкции в мерзлом состоянии, соответственно, необходимо достаточно надежно изолировать его от возможного оттаивания в летний период, а также предотвратить возможность попеременного сезонного промерзания — оттаивания.

Для решения данной проблемы требуются специальные технологические предложения.

В качестве мероприятий, предотвращающих сезонное оттаивание мерзлых грунтов, используется способ изолирования грунтов путем создания песчаной подушки или насыпи из торфа выше горизонта вечной мерзлоты. Для сохранения основания в мерзлом состоянии необходимо создавать насыпь из указанных материалов высотой 2,5–3,0 м, что является трудоемким и затратным мероприятием, изолирующий материал в больших объемах требуется перевозить на большие расстояния.

В последнее время для изоляции основания рассматривается использование материалов в виде блоков из пенопласта, пенополистирола, которые не отличаются достаточной прочностью и долговечностью [1–5].

Основными требованиями, предъявляемыми к изолирующим материалам, являются следующие:

- пониженное водопоглощение;
- достаточная прочность;
- пониженное значение коэффициента теплопроводности;
- повышенная морозоустойчивость;
- повышенная коррозионная устойчивость;
- повышенная долговечность (повышенный срок службы).

По нашему мнению, набором указанных физико-механических характеристик может обладать конструкционно-теплоизоляционный бетон на основе портландцемента, который при высоких показателях прочности и особенно прочности на растяжение при изгибе обеспечивает повышенную устойчивость к трещинообразованию и при пониженном коэффициенте теплопроводности должен обеспечивать эффективную изоляцию основания. Созданию такого инновационного материала посвящено данное научно-экспериментальное исследование.

Материалы и методы исследований

Для создания инновационного конструкционно-теплоизоляционного материала в качестве основного компонента использовали уникальный наполнитель, представленный пеностеклом. Основной химический состав пеностекла — оксиды кремния, калия, натрия, алюминия, магния, кальция.

Пеностекло производится различных фракций, в данном научном исследовании использовали: 0–2,5 мм; 1,25–2,5 мм; 2,5–4,0 мм;

- средняя плотность пеностекла изменяется от 100 до 350 кг/м³;

- коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,04–0,06$ Вт/м·°С;

- коэффициент водопоглощения $\leq 2,0$ % практически не впитывает влагу;

- устойчив, без признаков разрушения, в широком диапазоне температур от –200 °С до +500 °С;

- в химическом отношении достаточно инертный материал не вступает во взаимодействие с бензином, кислотами, щелочами и другими агрессивными веществами;

- прочность на сжатие составляет 0,5–1,2 МПа;

- обладает повышенным сроком службы.

2. Для дополнительного повышения устойчивости пеностеклобетона к трещинообразованию осуществляли дисперсное армирование смеси при помощи циркониевой фибры, волокна которой характеризуются повышенной прочностью на разрыв. Длина волокон составляет 4,5–5,0 мм и 10–12 мм; диаметр волокна составляет 10 ± 1 мкм.

3. В качестве вяжущего использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31008—2016 со следующими физико-механическими характеристиками:

- нормальная густота цементного теста, % — 26,2;

- начало схватывания, мин. — 182;

- конец схватывания, мин. — 245;

- прочность на сжатие, в возрасте 28 суток, МПа — 51,6.

4. Песок для строительных работ по ГОСТ 8736—2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

- Модуль крупности песка $M_k = 2,3$.

Содержание пылевидных и глинистых частиц — 1,3 %.

- Содержание глины в комках — нет.

Используемый песок относится к группе песка средний I класса.

5. В качестве эффективного наполнителя использовали тонкодисперсный микрокремнезем (SiO_2) в аморфном состоянии с величиной удельной поверхности, $S_{уд} \approx 13\,000$ м²/кг, марки МК85.

6. В качестве реакционно-активного компонента исследовали комплексную химическую добавку с повышенным пластифицирующим, пенообразующим и активирующим эффектами действия с целью получения материала, обладающего достаточно высокой прочностью, трещиностойкостью, и при этом необходимо, чтобы материал характеризовался улучшенными теплоизолирующими свойствами. Добавка использовалась в сухом виде. Основой добавки являются поликарбоксилатные полимеры на основе этилового эфира метакриловой кислоты с насыпной плотностью $\rho = 0,55 \text{ г/см}^3$ и значением водородного показателя $\text{pH} = 5,5$, дополнительными компонентами добавки являются гексацеаноферрат калия, нанодисперсии диоксида кремния, SiO_2 , с размером частиц $\approx 60 \text{ нм}$ и воздухововлекающий компонент на основе высокомолекулярного сульфоната олефина. Техническое название добавки «Наноактив МСВ-21».

При проведении исследований использовали ГОСТ 25820—2014 «Бетоны легкие. Технические условия» и ГОСТ 25485—2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия».

Для определения прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе изготавливали образцы-кубы размером $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$ и образцы-балки размером $100 \times 100 \times 400 \text{ мм}$, твердение которых осуществлялось в нормальных условиях ($t = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $W \geq 95 \%$). Испытание образцов и обработка результатов осуществлялись по ГОСТ 10180—2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Коэффициент теплопроводности определяли по ГОСТ 7076—99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Для этого изготавливали образцы-пластины размером $100 \times 100 \times 25\text{--}30 \text{ мм}$.

Морозостойкость бетона определяли по ГОСТ 10060—2012 «Бетоны. Методы определе-

ния морозостойкости». Для этого изготавливали образцы-кубы размером $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$.

Плотность бетона в состоянии естественной влажности определяли по ГОСТ 12730.1—2020 «Бетоны. Методы определения плотности».

Результаты исследований

Цель данного исследования заключалась в создании инновационного конструкционно-теплоизоляционного бетона, обладающего достаточно высокими показателями прочности, $\geq 10 \text{ МПа}$ при пониженном значении коэффициента теплопроводности, $\lambda \leq 0,2 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$.

На первом этапе исследования производили выбор рациональной фракции пеностекла, использование которого обеспечивало бы хорошую удобоукладываемость и повышенную связность пенобетонной смеси.

По предварительно проведенным подборам и исследованиям на первом этапе использован следующий расход материалов на 1 м^3 пенобетонной смеси:

- портландцемент — 450 кг;
- песок — 210 кг;
- микрокремнезем — 45 кг;
- пеностекло — 125 кг (500 л);
- добавка сухая «Наноактив МСВ-21» — (2 мас. % от массы цемента) — 9,0 кг;
- добавка эфир целлюлозы — (0,1 мас. % от массы цемента) — 0,45 кг;
- вода ($\text{В/Ц} = 0,46$) — 205 кг.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1.

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что наилучшей удобоукладываемостью при высоких показателях прочности характеризуется состав № 2, при использовании пеностекла фракции 1,25–2,5 мм, имеющего плотность $\rho = 240 \text{ кг/м}^3$.

Все дальнейшие исследования по созданию инновационного пеностеклобетона проводили с

ТАБЛИЦА 1. Определение рационального размера пеностекла по изменению показателей прочности и удобоукладываемости

| № п/п | Портланд-цемент, кг/м ³ | Пеностекло, с размером фракции, мм | | | | Прочность на сжатие, МПа в возрасте 7 суток | Примечание |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|----------|---------|---------|---|---|
| | | 0–1,0 | 1,25–2,5 | 2,5–4,0 | 4,0–6,0 | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 450 | + | – | – | – | 5,8 | Пониженная растекаемость бетонной смеси |
| 2 | 450 | – | + | – | – | 5,6 | Хорошая поверхность и хорошая удобоукладываемость |
| 3 | 450 | – | – | + | – | 3,8 | На поверхности много зерен пеностекла |
| 4 | 450 | – | – | – | + | 3,3 | Расслоение |

использованием пеностекла фракции 1,25–2,5 мм. Плотность полученного пеностеклобетона в состоянии естественной влажности составила ~ 1200 кг/м³, и при этом коэффициент теплопроводности имел значение $\lambda = 0,356$ Вт/м·°С.

Полученные характеристики требовалось совершенствовать для повышения надежности и теплоизолирующей способности материала, чтобы создаваемый пеностеклобетон смог выполнять роль защитно-изолирующего материала.

Улучшение указанных параметров возможно в результате оказания эффективного реакционного воздействия на пеностеклобетонную систему.

При совершенствовании свойств пеностеклобетона необходимо учитывать, что пеностеклобетонная смесь должна покрывать поверхность грунта, которая не является идеально ровной, поэтому целесообразно создавать защитно-изолирующую смесь повышенной подвижности и материал на ее основе повышенной трещиностойкости [6–11].

С этой целью рассмотрели использование тонкодисперсного реакционно-активного компонента, представленного микрокремнеземом, где основной фазой является диоксид кремния, SiO₂, обладающий достаточно высокой реакционной активностью в результате его повышенной дисперсности, степень дисперсности которого в 4 раза выше, чем у портландцемента.

Присутствие диоксида кремния, SiO₂, в микрокремнеземе имеет важное значение для последующего его взаимодействия с продуктами гидратации портландцемента, представленными гидросиликатами или гидродоксидом кальция, которое должно способствовать образованию повышенного количества гидратных фаз, обладающих определенной структурой, чаще всего представленной в виде удлиненных волокон. Повышенное образование комплексных гидратных соединений любой структуры оказывает положительное влияние на твердеющий материал, на уплотнение формирующейся структуры бетона, на повышение его прочности на сжатие и на повышение прочности на растяжение при изгибе, что оказывает положительное влияние и на улучшение показателей долговечности (морозостойкости и коррозионной стойкости).

Использование тонкодисперсного микрокремнезема рационально использовать совместно с химической добавкой, обладающей пластифицирующим эффектом. В качестве такой добавки исследовали комплексную химическую добавку «Наноактив МСВ-21».

Для оценки влияния микрокремнезема в сочетании с комплексной химической добавкой использовали следующий состав:

- портландцемент — 450 кг/м³;
- песок 187,5–142,5 кг/м³;

ТАБЛИЦА 2. Совершенствование свойств пеностеклобетона при дополнительном использовании микрокремнезема в сочетании с комплексной химической добавкой

| № п/п | Портланд-цемент, кг/м ³ | Микрокремнезем, мас.% от массы цемента (кг) | Добавка «Наноактив МСВ-21», мас.% от массы цемента | Пеностекло, фр. 1,25–2,5 мм, кг/м ³ | Прочность в возрасте 28 суток, МПа | |
|-------|------------------------------------|---|--|--|------------------------------------|--------------------------|
| | | | | | На сжатие | На растяжение при изгибе |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 450 | — | 1,5 (6,75) | 125 | 10,2 | 1,7 |
| 2 | 450 | — | 2,0 (9,0) | 125 | 11,1 | 1,9 |
| 3 | 450 | — | 2,3 (10,35) | 125 | 11,3 | 1,8 |
| 4 | 450 | 5,0 (22,5) | 2,0 (9,0) | 125 | 11,8 | 2,2 |
| 5 | 450 | 10,0 (45,0) | 2,0 (9,0) | 125 | 13,3 | 3,1 |
| 6 | 450 | 15,0 (67,5) | 2,0 (9,0) | 125 | 13,5 | 3,0 |

- микрокремнезем 22,5–67,5 кг/м³;
- пеностекло 125 кг/м³ (500 л);
- добавка «Наноактив МСВ-21» — 1,5–2,3 мас. % от массы цемента — 6,75–10,35 кг/м³;
- вода (В/Ц — 0,36) — 162 л.

Эффективность действия микрокремнезема в сочетании с комплексной химической добавкой оценивалась по изменению показателей прочности на сжатие и растяжение при изгибе. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что при использовании пеностеклобетонной смеси состава № 5 формируется пеностеклобетон с наилучшими показателями по прочности на сжатие и особенно значительно повышается прочность на растяжение при изгибе, как следствие, повышается устойчивость к трещинообразованию пеностеклобетона.

Установлено, что рациональное количество микрокремнезема составляет 10 мас. % от массы цемента при обязательном использовании комплексной химической добавки «Наноактив МСВ-21», чтобы обеспечить достаточную подвижность пеностеклобетонной смеси, соответствующую марке П5.

Принимая во внимание, что для обеспечения надежной защиты и теплоизоляции основания толщина пеностеклобетонного слоя должна

составлять ~ 20 см, и при этом, чтобы исключить армирование, которое требуется при такой толщине, целесообразно при производстве пеностеклобетонной смеси дополнительно осуществлять дисперсное армирование при помощи прочной, экологически чистой морозостойчивой циркониевой фибры.

Рациональное количество фибры, по результатам проведенных экспериментальных исследований, должно составлять 0,1–1,15 мас. % от сухой составляющей части пеностеклобетонной смеси. Проведенные экспериментальные исследования показали, что введение циркониевой фибры дополнительно повышает прочность на растяжение при изгибе на 16 %, не ухудшая показатель прочности на сжатие, и при этом коэффициент трещиностойкости пеностеклобетона представляет отношение $R_{изг}/R_{сж} = 3,6/13,3 = 0,27$.

Данный показатель имеет достаточно высокое значение, что должно обеспечить особую трещиностойкость и надежность защитному покрытию.

При создании пеностеклобетонной смеси целесообразно обратить внимание, что для равномерного ее распределения по поверхности твердого неровного грунтового основания требуется смесь повышенной подвижности, которая должна обладать повышенной связностью. Для исключения возможного расслоения высокопод-

вижной смеси необходимо дополнительно вводить в ее состав тонкодисперсный наполнитель.

В процессе научного исследования провели сравнительную оценку эффективности действия наполнителя, представленного тонкомолотым известняком или тонкомолотым шлаком в количестве 10–15 мас. % от массы цемента. Установлено, что оба компонента повышают связность пеностеклобетонной смеси, уменьшая показатель раствороотделения и водоотделения.

Дополнительное использование тонкомолотого доменного шлака (в отличие от известняка) повышает не только связность пеностеклобетонной смеси, но и прочность на сжатие на ~ 14,0 %, формируя проектную прочность на сжатие в пределах 15 МПа.

Серия проведенных исследований позволяет рекомендовать в качестве основных компонентов пеностеклобетонной смеси следующие материалы: портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н; песок (П) с $M_k = 2,0–2,5$; пеностекло фр. 1,25–2,5 мм; микрокремнезем (МК) с $S_{уд} \geq 13\,000$ м²/кг; тонкомолотый доменный шлак (ТДШ) с $S_{уд} > 300$ м²/кг; циркониевая фибра; комплексная химическая добавка «Наноактив МСВ-21».

Проведенные комплексные физико-механические исследования показали, что пеностеклобетон является инновационным материалом при плотности $D = 900$, имеет коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,14$ Вт/м·°С, что соответствует параметру высокоэффективного теплоизоляционного бетона, и при этом пеностеклобетон обладает высоким показателем прочности, соответствующим марке М150 или классу В12 В_{1б}2,9, морозостойкость соответствует марке F₁300. Впервые получен материал с уникальным сочетанием теплопроводности и прочности, который по достигнутым показателям целесообразно рекомендовать к использованию в качестве надежного, долговечного, теплоизолирующего материала вечномерзлого основания Арктических регионов.

Обсуждение результатов

Разработан высокоэффективный теплоизоляционно-конструкционный бетон с уникальным сочетанием высокого показателя прочности, $R_{сж} \geq 15$ МПа при пониженном коэффициенте теплопроводности $\lambda \leq 0,15$ Вт/м·°С.

Добиться такого сочетания показателей оказалось возможным в результате использования в качестве заполнителя пеностекла фракции 1,25–2,5 мм, которое имеет пониженный коэффициент теплопроводности $\lambda \approx 0,06$ Вт/м·°С, и в качестве матрицы использован цементно-песчаный раствор, модифицированный реакционно-активной комплексной химической добавкой на основе поликарбосилатных полимеров в сочетании с нанодисперсиями диоксида кремния. В результате повышенной реакционной активности компонентов системы в присутствии комплексной химической добавки образуется повышенное количество комплексных гидратных соединений, которые в момент образования характеризуются повышенной реакционной активностью и, как следствие, формируют повышенное количество контактов между компонентами пенобетонной системы, объединяя их в единый композитный материал с прочной структурой.

Равномерное распределение легкого заполнителя в объеме сверхпрочной матрицы обеспечило создание высокоэффективного пеностеклобетона, обладающего коэффициентом теплопроводности, характерным для легкого теплоизоляционного бетона, а прочностью и плотностью, соответствующей конструкционному материалу. Полученный теплоизоляционно-конструкционный материал обладает повышенной морозостойкостью, соответствующей марке F₁300, что характеризует его как надежный и долговечный материал.

По всем достигнутым физико-механическим показателям теплоизоляционно-конструкционный пеностеклобетон целесообразно и эффективно использовать для теплоизоляции есте-

ственных мерзлых грунтов в регионах Арктики, создавая надежное, ровное, равномерно распределенное, из-за высокой подвижности и хорошей удобоукладываемости пеностеклобетонное, покрытие, которое является хорошей основой для проведения дальнейших строительных работ при создании транспортной магистрали [12–15].

Заключение

Установлено, что для создания высокоэффективного теплоизоляционно-конструкционного пеностеклобетона необходимо использовать:

– пеностекло с размером фракции 1,25–2,5 мм с плотностью D250 и имеющего коэффициент теплопроводности $\lambda \approx 0,06$ Вт/м·°С;

– высокоэффективную комплексную химическую добавку «Наноактив МСВ-21» для создания высокопрочной и надежной матрицы на цементной основе.

Равномерное распределение гранул пено-стекла в цементной матрице формирует однородную мелкопоровую структуру затвердевшего пеностеклобетона, который отличается уникальным сочетанием следующих физико-механических показателей:

– пониженный коэффициент теплопроводности $\lambda \leq 0,15$ Вт/м·°С;

– повышенную прочность на сжатие, $R_{сж} \geq 15$ МПа;

– повышенную морозостойкость, $F_1 300$.

Пеностеклобетонная смесь характеризуется высокой подвижностью, соответствующей марке П5, и, как следствие, обладает хорошей удобоукладываемостью и укрывистостью неровной поверхности, которую целесообразно использовать для теплоизоляции мерзлого грунта Арктики.

Библиографический список

1. Трофимов Б. Ю. Методы оценки долговечности бетона с высокими эксплуатационными характеристиками / Б. Ю. Трофимов, Л. Ю. Крамар, К. В. Шульдяков // Серия конференций IOP: Материаловедение и инжене-

рия. — 2020. — № 962(2), 022010. — DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022010.

2. Крамар Л. Я. Введение пуццолановой добавки для повышения морозостойкости бетона дорожного покрытия / Л. Я. Крамар, А. И. Кыдяков, К. В. Шульдяков // Серия конференций IOP: Materials Science and Engineering. — 2018. — № 451(1), 012009. — DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012009.

3. Соловьева В. Высокоэффективная ремонтная смесь для восстановления и защиты поврежденных бетонных конструкций / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев, А. Касаткина // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — № 50. — С. 369–375. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_38.

4. Соловьева В. Высокопрочный бетон с улучшенными деформационными характеристиками для дорожных покрытий / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев // Сеть конференций E3S, Транспортная инженерия грунта в холодных регионах, Конспекты лекций по гражданскому строительству. — 2020. — Т. 50, Т. 2. — С. 339–345. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_35.

5. Соловьева В. Повышение уровня свойств композиционных материалов для инженерных геоконструкций с применением добавок нового поколения / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев // Конспект лекций в гражданском строительстве. — 2020. — № 50. — С. 387–393. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_40.

6. Соловьева В. Бетоны с уникальными свойствами для специальных строительных конструкций / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев // Материаловедческий форум 2018. — № 945 MSF. — С. 64–69. — DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.64>.

7. Николаев С. В. Методика выбора эффективного погружения и контроля глубины заполнения строительных материалов с открытой текстурой / С. В. Николаев, А. В. Бенин, А. М. Попов // Journal of Physics: Conference Seriesthis link is disabled. — 2021. — № 2131(2), 022055. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022055.

8. Караулов А. В. Исследование задач теории устойчивости грунтов симплекс-методом / А. В. Караулов, Д. В. Немцев, А. В. Коньков, В. В. Шехов // Journal of

Physics: Серия конференций. — 2021. — № 2131(3), 032019. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/002019.

9. Белаш Т. А. Свайные фундаменты для районов совместного проявления вечной мерзлоты и повышенной сейсмичности / Т. А. Белаш, М. Н. Митрофанова // Серия конференций ИОР: Материаловедение и инженерия. — 2018. — № 463(2), 022076. — DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022076.

10. Сватовская Л. Особенности процессов растворения в технологиях геостроительства / Л. Сватовская, К. Михайлова, А. Кабанов, Н. Хаменок // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — № 50. — С. 421–429. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_44.

11. Сватовская Л. Информационная оценка сохранения природных геосистем в геостроительстве путем повышения качества бетона / Л. Сватовская, О. Уров, К. Михайлова, Т. Супелюк // Конспект лекций по строительству. — 2020. — № 50. — С. 405–411. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_42.

12. Сычева А. Способ производства неавтоклавного пенобетона на основе полимеров для строительства различных дорожных сооружений в холодных регионах / А. Сычева, Ю. Каменев, Л. Сватовская, А. Авсеенко // Конспект лекций по строительству. — 2020. — № 50. — С. 469–477. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_49.

13. Глазунов В. В. Геофизический мониторинг изменений состояния основания насыпи автомобильной дороги путем стабилизации грунта с использованием энергии

взрыва / В. В. Глазунов, Е. В. Городнова, Н. Н. Ефимова и др. // Инженерно-горная геофизика. — 2018. — 14 с. — DOI: 10.1088/1755-1315/459/3/032028.

14. Колесникова Г. Н. Моделирование условий образования низкотемпературных трещин в асфальтобетонном слое автомобильной дороги / Г. Н. Колесникова, Т. А. Гаврилов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2018. — № 56. С. 57–66. — DOI: 10.17223/19988621/56/5.

15. Нестеров А. А. Температурные деформации грунта, влияющие на транспортную непрерывность Арктики / А. А. Нестеров, А. В. Марченко, Н. К. Васильев // Транспортная инженерия грунтов в холодных регионах. — Т. 1. — С. 25–34. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_4.

Дата поступления: 10.05.2022

Решение о публикации: 29.05.2022

Контактная информация:

СТЕПАНОВА Ирина Витальевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Инженерная химия и естествознание»; ivstepanova88@mail.ru

АБУ-ХАСАН Махмуд Самиевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»; abukhasan@pgups.ru

СОЛОВЬЕВА Валентина Яковлевна — д-р техн. наук, проф., заведующая кафедрой «Инженерная химия и естествознание»; 9046185117@mail.ru

Innovative Structural-Heat-Insulating Concrete for Insulation and Stability Rise of Frozen Foundation Soils

I. V. Stepanova, M. Abu-Khasan, V. Ya. Soloviova

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

For citation: Stepanova I. V., Abu-Khasan M., Soloviova V. Ya. Innovative Structural-Heat-Insulating Concrete for Insulation and Stability Rise of Frozen Foundation Soils // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 377–389. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-377-389

Summary

Purpose: To create highly effective heat-insulating structural concrete, recommended for insulating and preventing permafrost soil thawing. **Methods:** When conducting research, we used GOST (Russia State Standards) 25820-2014 “Lightweight concrete. Specifications”, GOST 25485—2019 “Cellular concrete. General technical conditions”. Determination of strength and processing of results according to GOST 10180-2012 “Concrete. Methods for determining strength upon control samples”; thermal conductivity coefficient was determined according to GOST 7076-99 “Construction materials and products. Method for determining thermal conductivity and thermal resistance at stationary thermal regime”; frost resistance of concrete according to GOST 10060-2012 “Concrete. Methods for determining frost resistance”; density of concrete in natural moisture state- according to GOST 12730.1-2020 “Concrete. Density determination methods”. It has been established experimentally that in order to create highly efficient heat-insulating-structural concrete, it is advisable to use as a filler a foam glass of fraction 1.25–2.5 mm, D250, $\lambda \approx 0.06 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, and for to create strong and reliable matrix on cement basis it’s effective to use finely dispersed microsilica in combination with complex chemical additive on polycarboxylate basis, modified with nano-dispersions of silicon dioxide, SiO_2 . **Results** of physical-mechanical studies have confirmed that it is effective to use particles of silicon dioxide together of micro- and nano-size in combination with surfactants represented by polycarboxylate polymers, meanwhile, foamed glass concrete with the best compressive strength and tensile strength at bending a rises significantly, coefficient of resistance to cracks of nanomodified foam glass concrete, $K_{tr.} = R_{bend.}/R_{compress.} = 3.6/13.3 = 0.27$, has rather high value which should provide for increased resistance to cracks and for reliability for a protective coating. In order to increase density/strength without deteriorating heat-insulating indicators it is advisable to use additionally a finely-ground blast-furnace slag as a filler which a rises cohesion of foam glass concrete mixture and strength of foam glass concrete. **Practical significance:** Rational ratio of components of nanomodified foam glass concrete mixture ensures the creation of highly mobile foam glass concrete mixture with good workability, and on the mixture basis, a unique heat-insulating-structural material is formed with the following characteristics: D900; $\lambda = 0.14 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, B12, $B_{ib}2.9 F_1300$ that defines it as a thermal insulation material of increased reliability and durability, which is advisable for recommendation for the Arctic harsh regions.

Keywords: Foam glass concrete, foam glass, heat-insulating-structural material, reliability, durability, complex chemical additive, thermal conductivity coefficient, frost resistance, strength.

References

1. Trofimov B. Yu., Kramar L. Yu., Shul'dyakov K. V. *Metody otsenki dolgovechnosti betona s vysokimi ekspluatatsionnymi kharakteristikami* [Methods for Evaluating the Durability of High Performance Concrete]. *Seriya konferentsiy IOP: Materialovedenie i inzheneriya* [Conference Series: Materials Science and Engineering]. 2020, I. 962 (2), 022010. DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022010. (In Russian)
2. Kramar L. Ya., Kydyakov A. I., Shul'dyakov K. V. *Vvedenie puttsolanovoy dobavki dlya povysheniya morozostoykosti betona dorozhnogo pokrytiya* [Introduction of Pozzolanic Admixture to Improve Frost Resistance of Pavement Concrete IOP Conference]. *Seriya konferentsiy IOP: Materials Science and Engineering* [Series: Materials Science and Engineering]. 2018, I. 451(1), 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012009. (In Russian)
3. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D., Kasatkina A. *Vysokoeffektivnaya remontnaya smes' dlya vosstanovleniya i zashchity povrezhdennykh betonnykh konstruksiy* *Konspekt lektsiy po grazhdanskomu stroitel'stvu* *ssylka otklyuchena* [Highly effective repair mortar for the restoration and protection of damaged concrete structures Abstract of lectures on civil engineering link is disabled]. 2020, 50, pp. 369–375. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_38. (In Russian)
4. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D. *Vysokoprochnyy beton s uluchshennymi deformatsionnymi kharakteristikami dlya dorozhnykh pokrytiy. Set' konferentsiy E3S, Transportnaya inzheneriya grunta v kholodnykh regionakh, Konspekty lektsiy po grazhdanskomu stroitel'stvu* [High-strength concrete with improved deformation characteristics for road surfaces. E3S Conference Network, Soil Transport Engineering in Cold Regions, Civil Engineering Lecture Notes]. 2020, Vol. 50, I. 2, pp. 339-345. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_35. (In Russian)
5. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D., Ershikov N. *Povyshenie urovnya svoystv kompozitsionnykh materialov dlya inzhenernykh geokonstruksiy s primeneniem dobavok novogo pokoleniya* *Konspekt lektsiy v grazhdanskom stroitel'stveeta* *ssylka invalid* [Increasing the level of properties of composite materials for engineering geostructures using new generation additives Lecture notes in civil engineering this link disabled]. 2020, I. 50, pp. 387–393. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_40. (In Russian)
6. Solov'eva V., Solov'ev D., Stepanova I. *Betony s unikal'nymi svoystvami dlya spetsial'nykh stroitel'nykh konstruksiy* [Concretes with unique properties for special building structures]. *Materialovedcheskiy forum, ssylka otklyuchena* [Materials Science Forum, link disabled]. 2018, 945 MSF Publ., pp. 64–69. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.64. (In Russian)
7. Nikolaev S. V., Benin A. V., Popov A. M. *Metodika vybora effektivnogo pogruzheniya i kontrolya glubiny zapolneniya stroitel'nykh materialov s otkrytoy teksturoy* [A technique for selecting effective immersion and controlling the infill depth of open texture building materials Journal of Physics]. *Journal of Physics: Conference Series* this link is disabled. 2021, I. 2131(2), 022055. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022055. (In Russian)
8. Karaulov A. V., Nemtsev D. V., Kon'kov A. V., Shekhov V. V. *Issledovanie zadach teorii ustoychivosti gruntov simpleks-metodom* [Investigation of Problems in the Theory of Soil Stability Using the Simplex Method]. *Journal of Physics: Seriya konferentsiy* *ssylka otklyuchena* [Journal of Physics conference series is disabled]. 2021, I. 2131(3), 032019. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/002019. (In Russian)
9. Belash T. A., Mitrofanova M. N. *Svaynye fundamenty dlya rayonov sovmeznogo proyavleniya vechnoy merzloty i povyshennoy seysmichnosti* [Pile Foundations for Areas of Joint Permafrost and High Seismicity]. *Seriya konferentsiy IOP: Materialovedenie i inzheneriya* [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering]. Vol. 463 (2), I. 022076. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022076. (In Russian)
10. Svatovskaya L., Mikhaylova K., Kabanov A., Khame-nok N. *Osobennosti protsessov rastvoreniya v tekhnologiyakh geostraitel'stva* *Konspekt lektsiy po grazhdanskomu stroitel'stvu* *ssylka otklyuchena* [Features of dissolution processes in geoconstruction technologies Abstract of lectures on civil engineering link is disabled]. 2020, I. 50, pp. 421–429. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_44. (In Russian)
11. Svatovskaya L., Urov O., Mikhaylova K., Supelyuk T. *Informatsionnaya otsenka sokhraneniya prirodnykh geosistem*

v geostroitel'stve putem povysheniya kachestva betona Konspekt lektsiy po stroitel'stvu ssylka otklyuchena [Informational assessment of the conservation of natural geosystems in geoconstruction by improving the quality of concrete Abstract of lectures on construction link disabled]. 2020, I. 50, pp. 405–411. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_42. (In Russian)

12. Sycheva A., Kamenev Yu., Svatovskaya L., Avseenko A. *Sposob proizvodstva neavtoklavного пенобетона на основе полимеров для строitel'stva razlichnykh dorozhnykh sooruzheniy v kholodnykh regionakh Konspekt lektsiy po stroitel'stvu. ssylka otklyuchena* [Method for the production of non-autoclaved foam concrete based on polymers for the construction of various road structures in cold regions Lecture notes on construction. link disabled]. 2020, I. 50, pp. 469–477. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_49. (In Russian)

13. Glazunov V. V., Gorodnova E. V., Efimova N. N., Kulikov A. I., Kulikova N. V. *Geofizicheskiy monitoring izmeneniy sostoyaniya osnovaniya nasypi avtomobil'noy dorogi putem stabilizatsii grunta s ispol'zovaniem energii vzryva* [Geophysical monitoring of changes in the state of the base of the embankment of a highway by stabilizing the soil using explosion energy Conference and exhibition]. *Inzhenerno-gornaya geofizika* [Engineering mining geography]. 2018. 14 p. DOI: 10.1088/1755-1315/459/3/032028. (In Russian)

14. Kolesnikova G. N., Gavrilov T. A. *Modelirovanie usloviy obrazovaniya nizkotemperaturnykh treshchin v asfal'tobetonnom sloe avtomobil'noy dorogi* [Modeling the

conditions for the formation of low-temperature cracks in the asphalt concrete layer of a highway]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Matematika i mekhanika* [Bulletin of the Tomsk State University, Mathematics and Mechanics]. 2018 (56), pp. 57–66. DOI: 10.17223/19988621/56/5. (In Russian)

15. Nesterov A. A., Marchenko A. V., Vasil'ev N. K., Kondrashov Yu. G., Alkhimenko A. I. *Temperaturnye deformatsii grunta, vliyayushchie na transportnyuyu nepreryvnost' Arktiki* [Temperature deformations of the soil, affecting the transport continuity of the Arctic]. *Transportnaya inzheneriya gruntov v kholodnykh regionakh* [Soil transport engineering in cold regions]. Vol. 1, pp. 25–34. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_4. (In Russian)

Received: May 10, 2022

Accepted: May 29, 2022

Author's information:

Irina V. STEPANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor of Engineering Chemistry and Natural Sciences Department; ivstepanova88@mail.ru

Mahmud S. ABU-KHASAN — D. Sci. in Engineering, Professor of Building Constructions, Buildings and Facilities Department; abukhasan@pgups.ru

Valentina Ya. SOLOVIOVA — D. Sci. in Engineering, Professor, Head of Engineering Chemistry and Natural Sciences Department; 9046185117@mail.ru

УДК 699.841

Особенности расчета сооружений на действия слабых частых землетрясений

А. М. Уздин, А. В. Бенин, Ш. Ш. Назарова, О. Б. Сабирова, М. С. Белашов

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

Для цитирования: Уздин А. М., Бенин А. В., Назарова Ш. Ш., Сабирова О. Б., Белашов М. С. Особенности расчета сооружений на действия слабых частых землетрясений // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 390–404. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-390-404

Аннотация

Цель: Показать особенности расчета сооружений на действие слабых частых землетрясений. **Методы:** Численное моделирование сейсмических колебаний сооружений. Анализ предельных состояний. **Результаты:** Проанализированы особенности расчета сооружений на действие слабых землетрясений. Рассмотрены землетрясения с повторяемостью раз в 30 лет и раз в 50 лет. В первом случае после землетрясения сооружение должно работать в штатном режиме без повреждений. Во втором случае допускаются повреждения, не влияющие на возможность эксплуатации сооружения. Основное внимание уделено трем вопросам: заданию упругих и демпфирующих характеристик железобетона, формализации предельных состояний и сочетаниям нагрузок. Оценена зависимость демпфирования от степени армирования железобетона. При оценке предельных состояний кроме расчетов по трещиностойкости и прочности рассмотрена возможность исключения паники среди людей. Для ее исключения предлагается ограничивать уровень скорости в определенных октавных диапазонах. Разработаны предложения для оценки коэффициентов сочетаний различных нагрузок с сейсмической. Оценены коэффициенты сочетаний сейсмической и ледовой нагрузки. **Практическая значимость:** Установлена система расчетных коэффициентов для оценки сейсмостойкости при относительно слабых, частых воздействиях. Показано, что для сильных воздействий коэффициенты сочетаний для разных регионов оказываются близкими, а для слабых воздействий они могут сильно отличаться друг от друга.

Ключевые слова: Слабые землетрясения, частые землетрясения, предельное состояние, коэффициент армирования, трещиностойкость, прочность, коэффициент сочетаний нагрузок.

Введение

В мировой практике сейсмостойкого строительства осуществляется переход от проектирования сооружения на основе расчета на сильное

землетрясение к многоуровневому проектированию с расчетами на воздействие нескольких уровней интенсивности и в конечном итоге к проектированию сценариев накопления повреж-

дений [1]. В итальянской и французской версиях Еврокода предусмотрен расчет на четыре уровня нагрузки, соответствующих четырем предельным состояниям [2].

1. Предельное состояние нарушения эксплуатации, или SLS, имеет повторяемость раз в 30 лет. Это значит, что при воздействиях, повторяющихся чаще чем раз в 30 лет элементы сооружения работают упруго и в них не возникает никаких повреждений, а само сооружение работает в штатном режиме.

2. Предельное состояние повреждения элементов сооружения, или DLS, имеет повторяемость раз в 50 лет. Это значит, что при воздействиях с повторяемостью меньше чем раз в 50 лет могут вызвать повреждения в элементах сооружения, которые не вызовут нарушения его нормальной эксплуатации, или нарушение нормальной эксплуатации будет кратковременным.

3. Предельное состояние серьезных повреждений сооружения, или ULS, имеет повторяемость раз в 475 лет. При воздействиях с такой повторяемостью возникают повреждения объекта, нарушающие его эксплуатацию, однако объект может быть восстановлен.

4. Предельное состояние полного разрушения, или CLS, с повторяемостью раз в 975 лет. При этом объект не подлежит восстановлению.

Отметим, что российские гражданские нормы оперируют только ULS, которое может иметь повторяемость от 500 до 2000 лет. Расчеты на слабые воздействия, соответствующие DLS и SLS в России, не проводятся. Не осязаны они в достаточной мере и за рубежом. Исключение составляют крупные гидротехнические сооружения (большие плотины). Для них рассматривается два предельных состояния DLS и CLS. Первое имеет повторяемость раз в 500 лет, а второе — раз в 5000 лет. При DLS допускаются определенные повреждения в сооружении, что учитывается повышением в два раза коэффициента редукции (коэффициента предельных состояний) K_1 .

Между тем расчеты для анализа DLS и SLS имеют целый ряд специфических особенностей, не отраженных в литературе. Эти особенности включают детализацию предельных состояний, расчетные схемы для упругой системы с учетом демпфирования, сочетания нагрузок.

Детализация предельных состояний

Для DLS на первый взгляд основным должно быть — нарушение условий прочности и трещиностойкости, причем анализ прочности следует проводить на нормативные нагрузки.

Как правило, эти проверки выполняются. Однако возникают другие опасные ситуации, приводящие к нарушению работы сооружения, а иногда и гибели людей.

Мы хотим выделить две группы предельных состояний такого рода:

1. Падение мебели и остальных предметов, нарушение работы оборудования.

2. Возникновение паники среди населения.

Для нормальной работы оборудования и исключения падения тяжелых предметов необходимо построение поэтажных спектров. По ним подбирается крепеж мебели и оборудования.

В качестве примера для подбора оборудования построим поэтажную акселерограмму и сейсмограмму для пятого этажа 5-этажного здания (рис. 1).

Как видно из рисунка, ускорения основания возросли с $0,175 \text{ м/с}^2$ до $0,5 \text{ м/с}^2$ и на последних этажах здания ускорения в 4 раза превосходят ускорения основания. Это говорит о том, что для обычных неизолированных зданий на слабые воздействия требуется построение поэтажных спектров ускорений и скоростей.

Для оценки опасности воздействия на людей возникает необходимость работать с поэтажными велосиграммами. Пример такой велосиграммы и поэтажного спектра ускорений для рассмотренного 5-этажного здания от акселерограммы Линкольн показан на рис. 2 и 3.

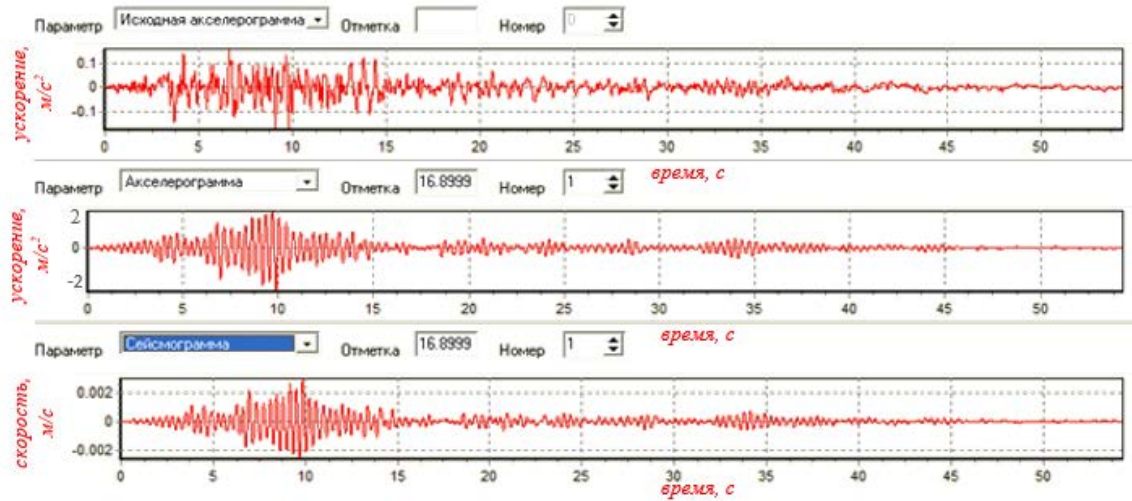


Рис. 1. Поэтажная акселерограмма и сейсмограмма для верхнего этажа 5-этажного здания

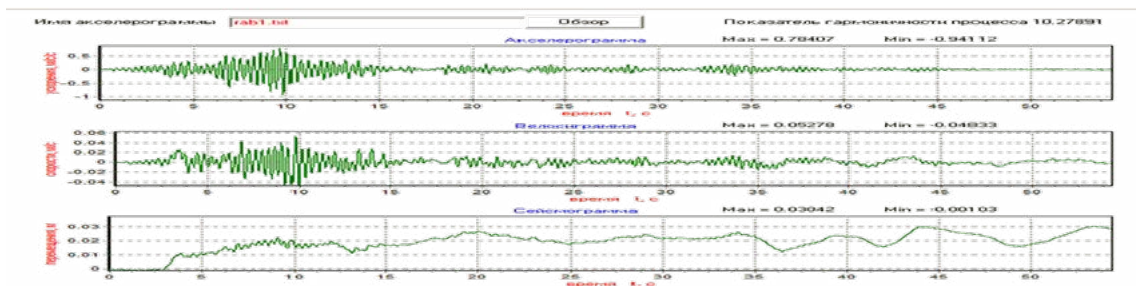


Рис. 2. Велосигнал для 5 этажа неизолированного 5-этажного здания

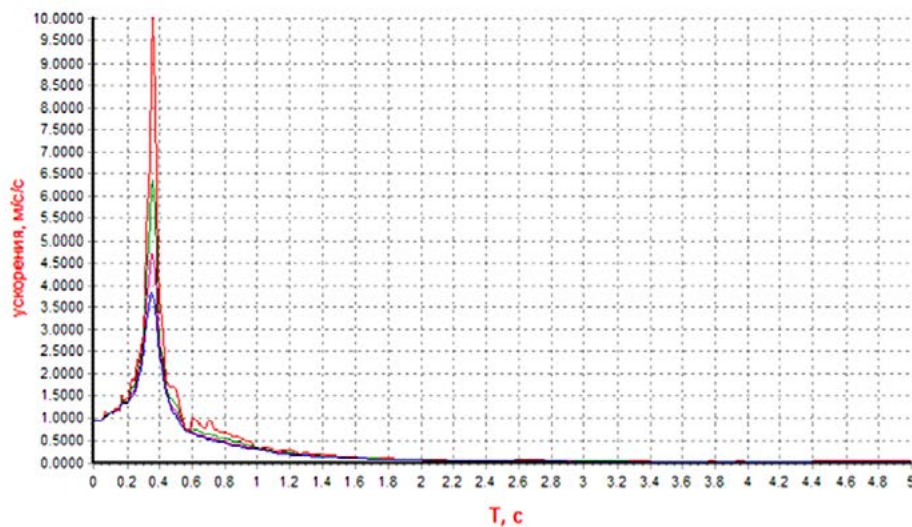


Рис. 3. Поэтажный спектр ускорений для верхнего этажа неизолированного 5-этажного здания

ТАБЛИЦА 1. Допустимые значения уровня виброскорости в дБ

| Частота, Гц | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 |
|------------------------------|-----|-----|------|------|------|
| Максимум виброскорости, дБ | 117 | 91 | 82 | 76 | 75 |
| Максимум виброскорости, мм/с | 36 | 1,8 | 0,63 | 0,32 | 0,29 |

Для исключения паники среди жителей и посетителей культовых и зрелищных сооружений значения скоростей в определенных октавных диапазонах должны быть ограничены. Допустимый уровень виброскорости, по данным [3], составляет в диапазоне частот от 5 до 8 Гц примерно 75 дБ, а в диапазоне частот от 2 до 5 Гц около 100 дБ. На основе данных [3] можно рекомендовать допустимые значения виброскорости, приведенные в табл. 1.

Перевод виброскорости из традиционной размерности м/с в дБ осуществляется по формуле (1), рекомендованной в [4, 5].

$$V_{dB} = 20 \cdot \lg \left(\frac{V}{V_0} \right), \quad (1)$$

где V_{dB} — скорость в дБ; V — скорость в м/с; $V_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с.

Максимум виброскорости в рассмотренном примере составил 0,053 м/с или примерно 140 дБ, что превышает допустимый уровень по табл. 1.

Расчетные схемы сооружений для слабых воздействий

При расчете на слабые воздействия, соответствующие DLS и SLS, сооружение работает линейно-упруго. Это облегчает проведение инженерных расчетов и придает результатам наглядность и физический смысл. При этом упругодемпфирующие характеристики элементов конструкции и основания могут и должны быть уточнены. Здесь имеется в виду прежде всего жесткость и демпфирование элементов сооружения, а также моделирование грунтового основания.

Для металлических конструкций упругодемпфирующие характеристики описаны в [4]. При

этом затухание определяется коэффициентом неупругого сопротивления, который с некоторым запасом может приниматься равным 0,05 (2,5 % от критического значения).

Для железобетонных сооружений дела обстоят несколько сложнее. При малых колебаниях, когда в бетоне нет повреждений, арматура и бетон работают совместно. Можно принять гипотезу Е. С. Сорокина о пропорциональности потерь энергии жесткости элемента. Тогда потери энергии в железобетонном элементе описываются формулой (2):

$$\gamma = \frac{(\gamma_{concr} + 6 \cdot \varepsilon \cdot \mu \cdot \gamma_{ri})}{(1 + 6 \cdot \varepsilon \cdot \mu)}, \quad (2)$$

где γ_{concr} — коэффициент неупругого сопротивления бетона; γ_{ri} — коэффициент неупругого сопротивления арматуры; μ — коэффициент

армирования; $\varepsilon = \frac{E_{ri}}{E_{concr}}$, E_{ri} и E_{concr} — модули

упругости арматуры и бетона соответственно.

При расчете жесткости по СП 14.13330.2018 в предположении, что бетон работает только на сжатие, а в растянутой зоне появляются трещины, то формула имеет ту же структуру и отличается только коэффициентом при члене, учитывающем арматуру:

$$\gamma = \frac{(\gamma_{concr} + 12 \cdot \varepsilon \cdot \mu \cdot \gamma_{ri})}{(1 + 12 \cdot \varepsilon \cdot \mu)}. \quad (3)$$

На рис. 4 приведены зависимости показателя демпфирования от степени армирования сечения.

В процессе исследований авторы проводили экспериментальные работы железобетонных балок при слабых воздействиях. Фрагмент этих

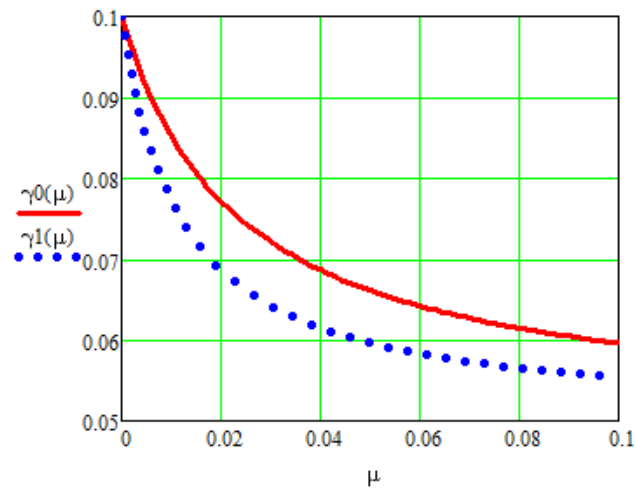


Рис. 4. Зависимость коэффициента неупругого сопротивления железобетона γ от коэффициента армирования μ : сплошная линия — упругая работа всего сечения; точечная линия — исключение работы бетона в растянутой зоне

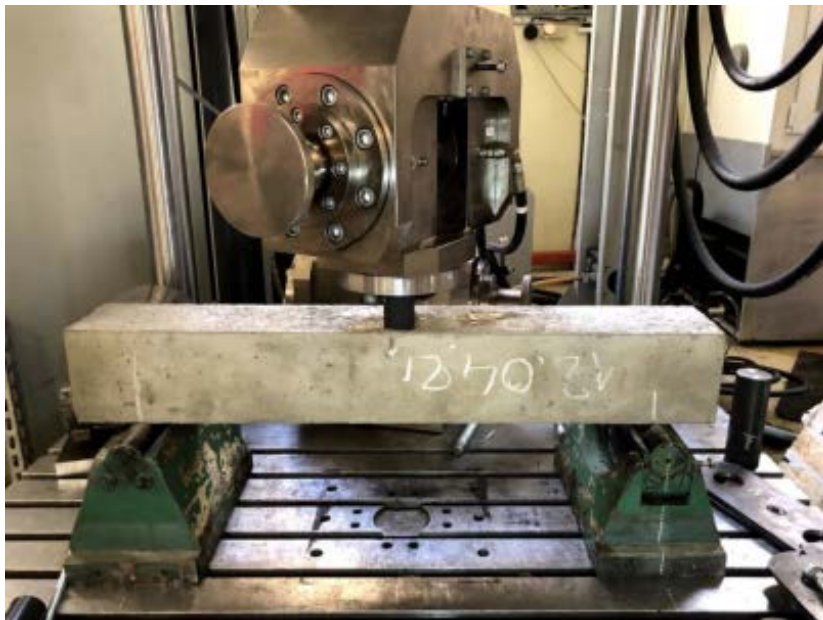


Рис. 5. Пример испытания железобетонной балки

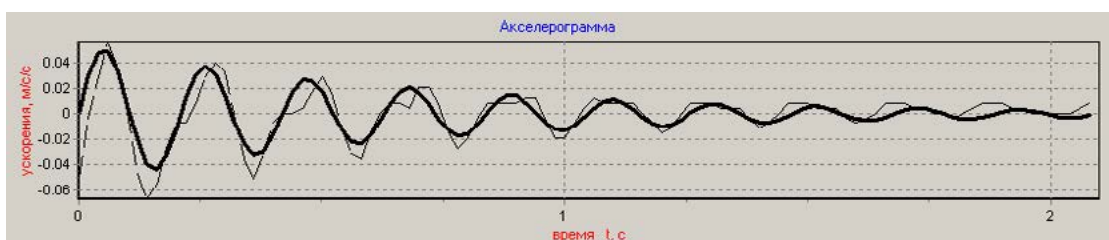


Рис. 6. Запись свободных колебаний железобетонной балки (черная сплошная кривая) и аппроксимирующая зависимость процесса колебаний (черная пунктирная кривая)

ТАБЛИЦА 2. Зависимость пиковых ускорений и расчетных баллов от ситуационной сейсмичности

| Ситуационная сейсмичность | 30 лет | | 50 лет | | 475 лет | | 975 лет | |
|---------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| | PGA, м/с ² | Расчетная балльность | PGA, м/с ² | Расчетная балльность | PGA, м/с ² | Расчетная балльность | PGA, м/с ² | Расчетная балльность |
| 6-6-7 | 0,037 | 3,02 | 0,045 | 3,46 | 0,188 | 5,42 | 0,331 | 6,04 |
| 6-7-7 | 0,043 | 3,35 | 0,054 | 3,79 | 0,254 | 5,75 | 0,45 | 6,38 |
| 6-7-8 | 0,051 | 3,68 | 0,067 | 4,13 | 0,344 | 6,08 | 0,614 | 6,71 |
| 7-7-8 | 0,062 | 4,02 | 0,085 | 4,46 | 0,468 | 6,42 | 0,837 | 7,04 |
| 7-8-8 | 0,078 | 4,35 | 0,111 | 4,79 | 0,638 | 6,75 | 1,141 | 7,38 |
| 7-8-9 | 0,101 | 4,68 | 0,146 | 5,13 | 0,87 | 7,08 | 1,555 | 7,71 |
| 8-8-9 | 0,133 | 5,02 | 0,196 | 5,46 | 1,186 | 7,42 | 2,117 | 8,04 |
| 8-8-10 | 0,178 | 5,35 | 0,264 | 5,79 | 1,617 | 7,75 | 2,879 | 8,38 |
| 8-9-10 | 0,239 | 5,68 | 0,358 | 6,13 | 2,201 | 8,08 | 3,91 | 8,71 |
| 9-9-10 | 0,324 | 6,02 | 0,488 | 6,46 | 2,992 | 8,42 | 5,302 | 9,04 |
| 9-10-10 | 0,440 | 6,35 | 0,665 | 6,79 | 4,063 | 8,75 | 7,181 | 9,38 |
| 10-10-10 | 0,600 | 6,68 | 0,907 | 7,13 | 5,509 | 9,08 | 9,712 | 9,71 |

испытаний приведены на рис. 5. При этом записывались свободные колебания железобетонной балки на двух опорах и искалась аппроксимация записи в виде $y = a \cdot e^{-\gamma t} \cdot \sin \omega t$. На рис. 6 приведен пример такой записи и ее аппроксимации. Обработка записей указывает на коэффициент неупругого сопротивления $\gamma = 0,06-0,075$. Этот результат подтверждает высказанную гипотезу о демпфировании в железобетоне. Мы получили среднюю величину между затуханием в арматуре $\gamma = 0,03-0,05$ и бетоне $\gamma = 0,07-0,12$, приводимую в литературе.

В работе [5] показано, что упругая работа сооружения при относительно небольшом уровне нагрузки позволяет моделировать основание, используя СП 26.13330.2012 «Фундаменты под машины с динамическими нагрузками». А согласно [6], для расчета свайных фундаментов с высоким свайным ростверком можно пользоваться СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты», но необходимо учитывать фактический уровень расчетных ускорений, соответствующих 5–6-балльным воздействиям.

Одним из важнейших этапов создания расчетной модели сооружения является задание сейсмического воздействия. Как при использовании

записей прошлых землетрясений, так и генерации искусственных акселерограмм необходимо выбирать резонансные, опасные для сооружения воздействия. Пиковые ускорения PGA должны назначаться в соответствии со шкалой балльности [7]. Алгоритм и программа расчета PGA описаны в литературе [8]. Отметим только, что в программе [9] реализован известный подход [10], связывающий повторяемость T и силу землетрясения в баллах I зависимостью:

$$\text{Log}(T) = a \cdot I + b, \quad (4)$$

где T — повторяемость землетрясения силой I баллов; a, b — константы, характеризующие сейсмическую опасность в площадке.

В [11] указаны недостатки использования зависимости (4) и предложена другая зависимость:

$$\text{Log}(T) = 0,5 \cdot I + b. \quad (5)$$

В табл. 2 приведены значения коэффициента b для районов с различной ситуационной сейсмичностью.

Зная уровень расчетного воздействия, можно переходить к его расчетной модели. Для проведения расчетов по акселерограммам надо подбирать резонансную запись, у которой пик на спектре ускорений попадет на частоту опасной формы колебаний.

Нет вопросов и по использованию линейно-спектральной методики. Известную формулу (6) для расчета сейсмических сил

$$S_{ij} = Agm_i \beta(T_j) K_{\Psi} \quad (6)$$

придется несколько уточнить, задавая коэффициент K_{Ψ} для каждой формы колебаний. При этом в формуле (6):

Ag — пиковое расчетное ускорение принимается в соответствии с приведенными расчетами;

K_{Ψ} назначается по каждой форме в зависимости от модального коэффициента неупругого сопротивления. Величину K_{Ψ} можно вычислить по формуле (7):

$$K_{\Psi j} = \sqrt{\frac{\gamma_{\text{эт}}}{\gamma_j}}, \quad (7)$$

где γ_j — коэффициент неупругого сопротивления по j -й форме колебаний, $\gamma_{\text{эт}} = 0,15$ — эталонное значение γ , характерное для основной формы горизонтальных колебаний зданий на плотных скальных основаниях [12, 13].

Сочетание нагрузок

Вопрос сочетания нагрузок весьма важен для расчета сооружений на воздействия различной силы и повторяемости. В действующих в России нормах сейсмостойкого строительства сейсмическая нагрузка сочетается только с нагрузками от подвижного состава на мостах и длительной снеговой нагрузкой. Даже для гражданского строительства сложившийся подход ошибочен. Для высотных сооружений и башен необходим совместный учет сейсмических и ветро-

вых нагрузок [14, 15]. Что касается портовых и шельфовых сооружений, то они значительную часть времени подвержены ледовым, волновым и ветровым нагрузкам. В связи с этим важным вопросом становится оценка коэффициентов сочетаний указанных нагрузок с сейсмической нагрузкой. Для оценки этих коэффициентов необходимо задать функцию плотности распределения (далее — ф.п.р.) сейсмической и сочетаемой с ней нагрузок. Для описания сейсмической нагрузки удобно использовать δ — корректируемый процесс. Ф.п.р. такого процесса является суммой δ — функции и некоторой зависимости, заданной на интервале от 0 до ∞ . δ — функция сдвинута на бесконечно малую величину вправо, чтобы выполнялось условие:

$$\int_0^{\infty} \delta(x+0) dx = 1, \quad (8)$$

Тогда ф.п.р. сейсмической нагрузки, описываемой в терминах PGA, примет вид:

$$p(x) = (1-L) \cdot \delta((x+0)) + L \cdot p_0(x), \quad (9)$$

где L — вероятность возникновения землетрясения, $p_0(x)$ — вероятность того, что величина x будет превышена ускорениями основания в процессе землетрясения.

Если учесть, что на площадке строительства могут происходить землетрясения различной силы L , по формуле (9) примет вид (10):

$$p(x) = \left(1 + \sum_I L_I \right) \cdot \delta(x+0) + \sum_I L_I \cdot p_I(x). \quad (10)$$

Для величины $p_I(x)$ может быть использована ф.п.р. Вейбулла [16]. Это же распределение используется для ветровой нагрузки [14, 17], и логично использовать его для волновой нагрузки. Для ледовой нагрузки ф.п.р. имеет вид (8), причем L — вероятность наличия льда вблизи со-

ружения. Зная ф.п.р. нагрузок, можно перейти к заданию их сочетаний. Для этого возможны два принципиальных подхода [18]. Первый подход рассматривает множество равновероятных пар и выбирает из них наихудшую [19]. Вторым подход — на построении ф.п.р. суммарной величины анализируемого фактора [18]. Последний оказывается более консервативным, но не позволяет непосредственно ввести коэффициенты сочетаний и требует знание ф.п.р. всех суммируемых нагрузок. Ниже авторы подробно рассмотрели применение первого подхода, определяющего коэффициенты сочетаний к нагрузкам в рамках действующих нормативных документов.

Вероятность появления пары равна произведению вероятностей этих событий. Условие определяет множество равновероятных пар (x, y) :

$$P_1(x)P_2(y) = [P]. \tag{11}$$

На плоскости x, y определяет некоторую кривую. С другой стороны усилие или другой фактор в элементах сооружения определяется как функция $(\Phi)x, y$ (рис. 7). В большинстве случаев:

$$\Phi(x, y) = Ax + By. \tag{12}$$

В точке касания кривых $\Phi(x, y)$ и $P(x, y)$ получаем искомую точку (x, y) , определяющую значения x и y , при которых фактор является наибольшим на множестве равновероятных пар.

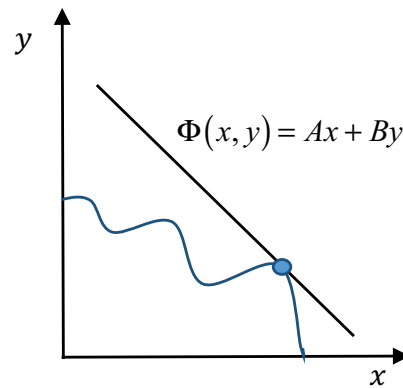


Рис. 7. Кривые, определяемые зависимостями $P(x, y)$ и $\Phi(x, y)$

Такая точка получается в случае, когда кривая

$y(x)$ выпуклая, и $\frac{dy}{dx} > \frac{A}{B}$ (рис. 8, а). Если кривая $y(x)$ вогнута или выполняется одно из усло-

вий $\frac{dy}{dx} < \frac{A}{B}$ для всех x , при которых $y > 0$ или

$\frac{dy}{dx} > \frac{A}{B}$ для всех x , при которых $y > 0$, то точки

оптимума не существует (рис. 8, б, в, г). В первом случае существует точка минимума. В остальных двух случаях максимум нагрузки реализуется на одном из концов кривой $y(x)$.

Рассмотрим в качестве примера сочетание сейсмической и ледовой нагрузки. Для ледовой нагрузки используем данные, приведенные в [20]

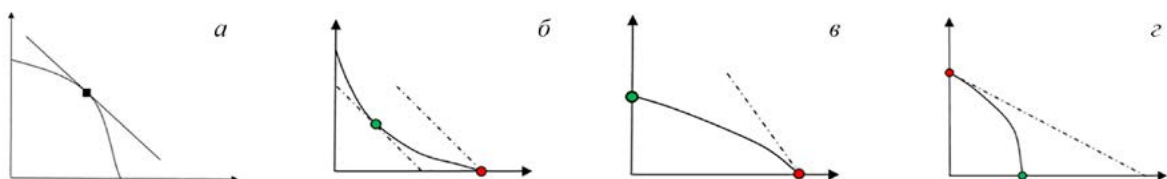


Рис. 8. Вид зависимости $y(x)$:

а — при котором существует опасная пара (x, y) ;

б, в, г — случаи, когда сочетания нагрузок не требуются

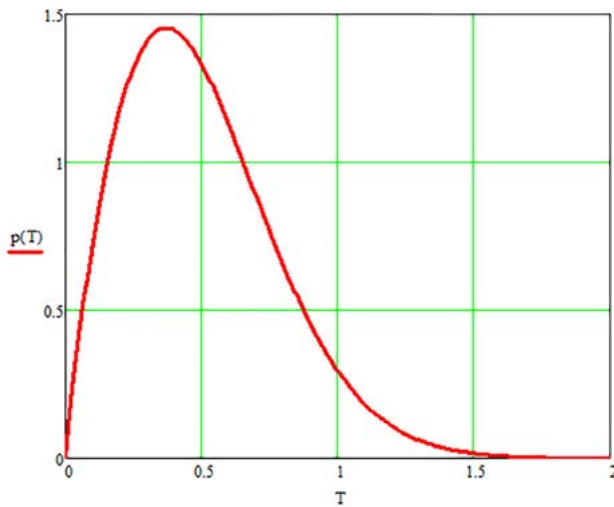


Рис. 9. Вид ф.п.р. для ледовой нагрузки

для одного из районов Камчатки. Распределение толщины льда принято в [20] по закону Вейбулла с параметром масштаба $\beta = 0,563$ и параметром формы $\nu = 1,85$. В расчете принято, что лед находится вблизи сооружений постоянно, т. е. $L = 1$. Вид ф.п.р. представлен на рис. 9. В табл. 3 представлены вычисления функции $y(x)$ для района с ситуационной сейсмичностью 7-8-9 и предельного состояния DLS с повторяемостью раз в 50 лет и вероятностью превышения примерно 0,02.

Приведенные рисунки показывают, что для сильных воздействий ситуационная сейсмичность не влияет на величину коэффициента сочетаний. Для слабых же воздействий это влияние следует учитывать.

ТАБЛИЦА 3. Построение зависимости $y(x)$

| Коэффициент сочетаний для сейсмической нагрузки | Расчетное ускорение, y , m/s^2 | Вероятность превышения для сейсмической нагрузки | Вероятность превышения для ледовой нагрузки | Расчетная толщина льда, x , м | Коэффициент сочетаний для ледовой нагрузки |
|---|------------------------------------|--|---|---------------------------------|--|
| 0,214 | 0,04 | 0,417 | 0,048 | 0,999 | 0,999 |
| 0,265 | 0,0495 | 0,196 | 0,102 | 0,958 | 0,958 |
| 0,294 | 0,055 | 0,148 | 0,135 | 0,931 | 0,931 |
| 0,325 | 0,06 | 0,119 | 0,168 | 0,899 | 0,899 |
| 0,358 | 0,067 | 0,097 | 0,207 | 0,855 | 0,855 |
| 0,374 | 0,07 | 0,089 | 0,224 | 0,834 | 0,834 |
| 0,412 | 0,077 | 0,074 | 0,271 | 0,772 | 0,772 |
| 0,433 | 0,081 | 0,068 | 0,292 | 0,743 | 0,743 |
| 0,46 | 0,086 | 0,062 | 0,325 | 0,696 | 0,696 |
| 0,487 | 0,091 | 0,056 | 0,359 | 0,647 | 0,647 |
| 0,497 | 0,093 | 0,054 | 0,371 | 0,630 | 0,630 |
| 0,519 | 0,097 | 0,051 | 0,396 | 0,594 | 0,594 |
| 0,551 | 0,103 | 0,046 | 0,435 | 0,538 | 0,538 |
| 0,626 | 0,117 | 0,038 | 0,530 | 0,409 | 0,409 |
| 0,786 | 0,147 | 0,027 | 0,732 | 0,300 | 0,300 |
| 0,818 | 0,153 | 0,026 | 0,773 | 0,270 | 0,270 |
| 0,866 | 0,162 | 0,024 | 0,839 | 0,220 | 0,220 |
| 0,893 | 0,167 | 0,023 | 0,875 | 0,190 | 0,190 |
| 0,920 | 0,172 | 0,022 | 0,907 | 0,160 | 0,160 |
| 0,957 | 0,179 | 0,021 | 0,960 | 0,100 | 0,100 |
| 0,989 | 0,185 | 0,020 | 1 | 0,001 | 0,001 |

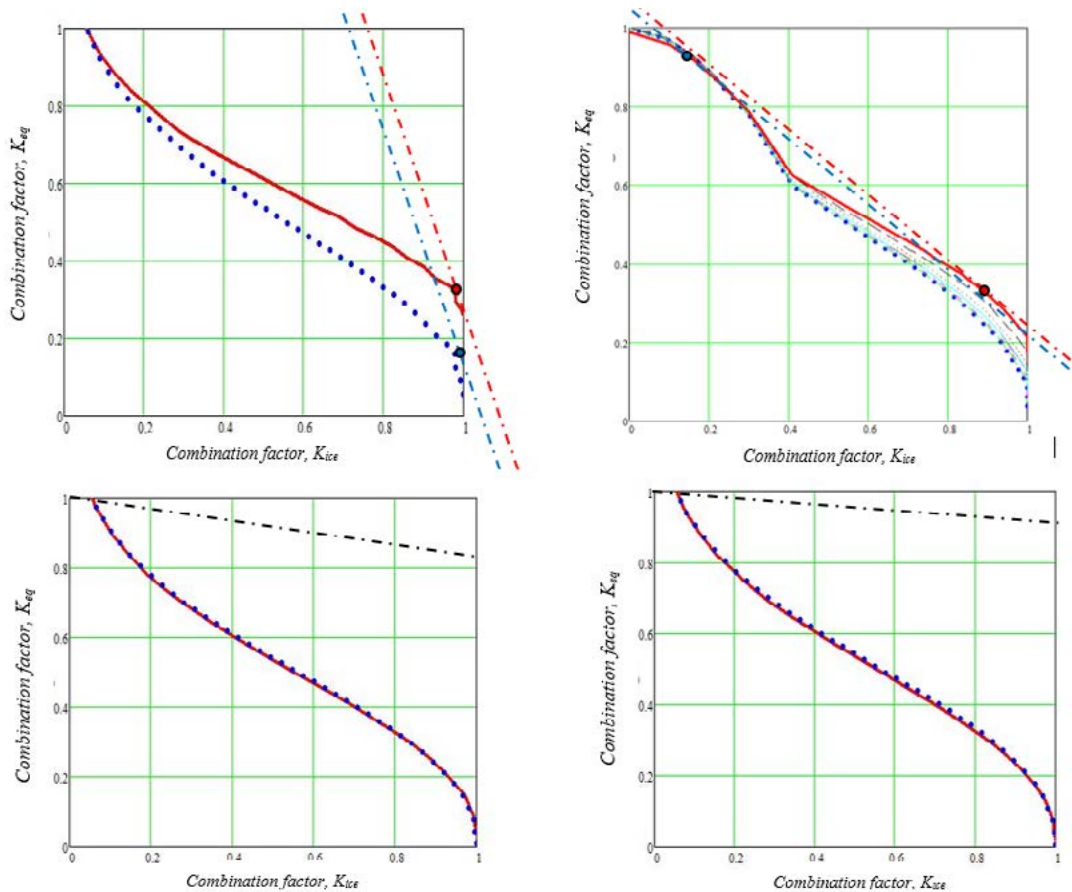


Рис. 10. Зависимость коэффициентов сочетания ледовой нагрузки от сейсмической с ситуационной сейсмичностью 7-8-9 и 10-10-10 (по вертикальной оси — коэффициенты сочетания сейсмической нагрузки, по горизонтальной оси — коэффициенты сочетания ледовой нагрузки)

Для поиска экстремальной пары вернемся к выражению (12), представив его следующим образом:

$$\Phi = K_{eq} A_0 \Phi_{eq} + K_{ice} \Delta_0 \Phi_{ice}, \tag{13}$$

при этом:

$$K_{eq} = \frac{\Phi}{A_0 \Phi_{eq}} - K_{ice} \frac{\Delta_0 \Phi_{ice}}{A_0 \Phi_{eq}} = C - K_{ice} \frac{\Delta_0 \Phi_{ice}}{A_0 \Phi_{eq}}, \tag{14}$$

Меняя параметр С, получаем семейство прямых, из которых необходимо выбрать касательную к построенным зависимостям $K_{eq}(K_{ice})$.

Для слабых зависимостей оптимальная пара существует, причем для разной ситуационной сейсмичности оптимальные пары различны. Для SLS при ситуационной сейсмичности $I_A = 10, I_B = 10, I_C = 10$ получается $K_{eq} = 0,34$, а $K_{ice} = 0,96$. При ситуационной сейсмичности $I_A = 7, I_B = 8, I_C = 9$ получается $K_{eq} = 0,17$, а $K_{ice} = 0,98$. Для DLS при ситуационной сейсмичности $I_A = 10, I_B = 10, I_C = 10$ получается $K_{eq} = 0,34$, а $K_{ice} = 0,9$. При ситуационной сейсмичности $I_A = 7, I_B = 8, I_C = 9$ получается $K_{eq} = 0,93$, а $K_{ice} = 0,18$. Расчеты облегчаются тем, что в рассмотренном случае разница в суммарных усилиях относительно невелика и можно назначать сочетания по самой неблагоприятной ситуационной сейсмичности.

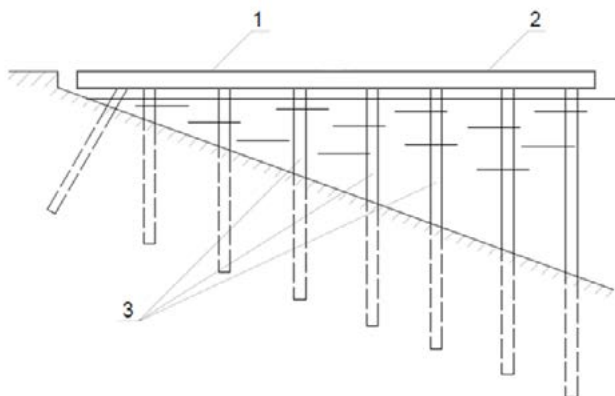


Рис. 11. Схематичный чертеж причала эстакадного типа:
1 — береговая часть, 2 — ФПС,
3 — морская часть

В качестве примера рассмотрим причал эстакадного типа (ПЭТ), представляющего собой массивную железобетонную плиту, опирающуюся на головы легких свай (рис. 11).

В первом приближении такую конструкцию можно моделировать системой с одной степенью свободы. Жесткость системы равна суммарной жесткости свай. При малых колебаниях коэффициент неупругого сопротивления принимается равным 0,07, что соответствует армированию свай 3,5 % по графику на рис. 4. В качестве воздействия рассмотрены две 9-балльные акселерограммы: синтетическая, сгенерированная по методике [21], и запись реального воздействия

с преобладающей частотой, совпадающей с собственной частотой сооружения.

Входные параметры жесткости и демпфирования в сваях различались при анализе SLS и DLS. При определении жесткости системы из разреза исключается растянутая зона бетона, а коэффициент неупругого сопротивления $\gamma = 0,63$.

В результате расчета получены усилия в сваях, смещение плиты платформы, спектр ускорений и скоростей на платформе. Расчет свай проводился по трещиностойкости. На рис. 12 приведены графики несущей способности и трещиностойкости свай. Точкой нанесены данные результата расчета.

Численные значения усилий свай приведены в табл. 4.

Заключение

Выполненная работа показывает основные особенности расчета сооружений на действие слабых землетрясений. К их числу относятся:

Предельные состояния DLS и SLS для рассматриваемых сооружений — это нарушение трещиностойкости (DLS) и прочности (SLS).

Для исключения паники среди жителей и посетителей культовых и зрелищных сооружений необходимо построение поэтажных скоростей. Пиковые значения скоростей в определенных октавных диапазонах должны быть ограничены.

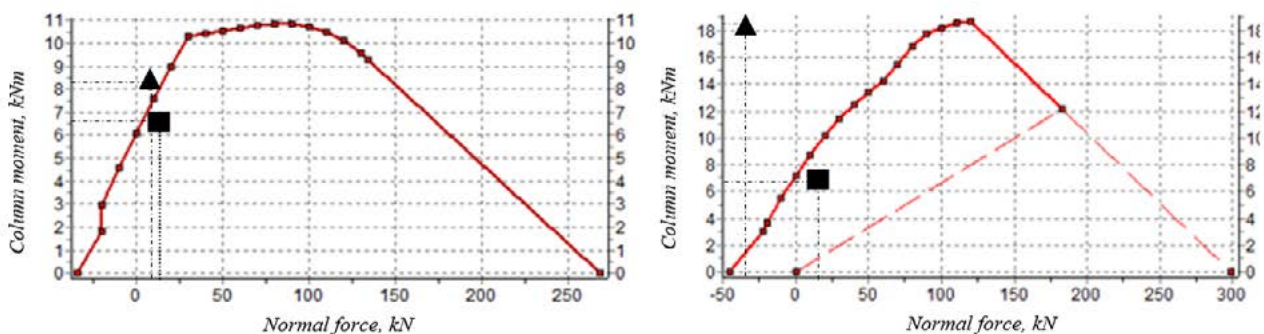


Рис. 12. Результаты расчета прочности (справа) и трещиностойкости (слева) строительных свай:

- — для ситуационной сейсмичности $I_A = 7, I_B = 8, I_C = 9$;
- ▲ — для сейсмичности $I_A = 10, I_B = 10, I_C = 10$

ТАБЛИЦА 4. Некоторые результаты расчетов причала эстакадного типа

| Ситуационная сейсмичность | Лед | | Землетрясение | | | |
|--|--|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| | Комбинированный коэффициент, K_{ice} | Нагрузка на лед, S_{ice} , кН | Комбинированный коэффициент, K_{eq} | Сейсмическая нагрузка, S_{eq} , кН | Максимальный момент столба, M , кНм | Нормальная сила, N , кН |
| Предельное состояние работоспособности | | | | | | |
| 7-8-9 | 0,96 | 76,02 | 0,333 | 25,60 | 68,675 | 17,25 |
| 10-10-10 | 0,985 | 76,02 | 0,160 | 151,4 | 83,583 | 13,6 |
| Состояние предела повреждения | | | | | | |
| 7-8-9 | 0,895 | 76,24 | 0,333 | 37 | 67,848 | 10,75 |
| 10-10-10 | 0,160 | 76,24 | 0,92 | 228,8 | 187,823 | -37 |

Рассматриваемое условие весьма важно не только для зрелищных и культовых сооружений, в которых паника может вызвать давку и гибель людей. Для портовых и особенно шельфовых сооружений люди могут попрыгать в панике в воду и утонуть. Так можно объяснить наличие в открытом океане кораблей, оставленных командой. Для зданий известны случаи, когда люди в панике, реализуя инстинкт самосохранения, выпрыгивали из окон высотных зданий. Необходим также расчет крепления фрагментов оборудования, падение которых может травмировать людей.

Линейная упругость работы сооружения позволяет придать расчету наглядность и физический смысл. Для этого необходимо более полное представление расчетной схемы, в частности учет демпфирования, взаимодействие сооружения с грунтом и пространственная работа сооружения в процессе колебаний.

Для расчета на слабые воздействия можно использовать ЛСМ. При расчете следует задавать $K_1 = 1$, а пиковые ускорения определять расчетом исходя из принятой повторяемости DLS и SLS.

При расчете SLS следует снижать модуль упругости бетона и повышать демпфирование в элементах по сравнению с расчетом DLS.

В расчетах по акселерограммам следует подбирать резонансные для сооружения (или его элементов) акселерограммы. В расчетах DLS

преобладающая частота акселерограммы будет несколько меньше, чем при расчете SLS.

Важнейшим отличием расчета DLS и SLS от нормативного является необходимость сочетания сейсмических нагрузок с другими возможными нагрузками. В первом приближении можно просто рассматривать сейсмические нагрузки для DLS и SLS как дополнительные и сочетать их с другими нагрузками согласно действующим СП.

Более аккуратный подход предусматривает построение равновероятных пар нагрузок и выбор из них наиболее опасной пары. Если в расчетах на сильные воздействия сочетания нагрузок практически не рассматривались, то при анализе DLS и SLS эти сочетания приобретают большое значение.

Расчет по ЛСМ позволяет оценить прочность и трещиностойкость элементов сооружения. Для расчетов крепежа оборудования и оценки поведения людей при землетрясении необходим расчет по расчетным акселерограммам с построением поэтажных акселерограмм и велосиграмм.

Благодарность

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ (Российский фонд фундаментальных исследований): ГФЕН_а 21-58-53012 «Теоретические основы и методы проектирования сценариев накопления ущерба при сейсмических воздействиях на примере портов и гидротехнических сооружений».

Библиографический список

1. Dolcea M. Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies / M. Dolcea, A. Kappos, A. Masia et al. // *Engineering Structures, Engineering Structures* 28. — 2006. — Pp. 357–371.
2. Le norme tecniche per le costruzioni. Il ministero delle infrastrutture e dei trasporti. — 2018.
3. ГОСТ 12.1.003—83. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением № 1).
4. Nesterova O. P. Taking account of damping in estimating structure earthquake stability / O. P. Nesterova, N. V. Nikonova, M. Yu. Fedorova // *Materials Physics and Mechanics* 26. — 2016. — Pp. 57–60.
5. Руководство по проектированию фундаментов машин с динамическими нагрузками. М.: Стройиздат, 1982. — С. 207.
6. Ильичев В. А. Свайные фундаменты в сейсмических районах / В. А. Ильичев, Ю. В. Монголов, В. М. Шаевич и др. — М.: Стройиздат, 144 с.
7. Аптикаев Ф. Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности / Ф. Ф. Аптикаев. — М.: ООО «Наука и образование», 2012. — 176 с.
8. Арещенко Т. С. Задание уровня сейсмического воздействия для оценки сейсмостойкости сооружений при многоуровневом проектировании / Т. С. Арещенко, С. В. Прокопович, О. Б. Сабирова, Е. Д. Фролова // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. — 2018. — № 4. — С. 25–27.
9. Арещенко Т. С. Программа определения пиковых ускорений сейсмического воздействия. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664350 / Т. С. Арещенко, С. В. Прокопович, О. Б. Сабирова и др. Зарегистрирована 14 ноября 2018 г.
10. Сейсмическая соотрясаемость территории СССР // Под ред. Ю. В. Ризниченко. — 1979. — М.: Наука, 192 с.
11. Nazarova Sh. Sh. Setting peak ground accelerations for performance-based design of earthquake-resistant constructions / Sh. Sh. Nazarova, A. M. Uzdin // *Seismic instruments*. — 2020. — Vol. 56. — № 2. — Pp. 225–236.
12. Уздин А. М. Влияние демпфирования на величину коэффициента динамичности / А. М. Уздин, М. Ю. Цибаева // *Экспресс-информация «Сейсмостойкое строительство»*. — 1985. — Вып. 11. — С. 27–30.
13. Уздин А. М. Сейсмостойкость мостов / А. М. Уздин, И. О. Кузнецова. — Саарбрюкен (Германия), Palmarium, 2014. — 450 с.
14. Сахаров О. А. Анализ сейсмостойкости металлической башни «Ramboll» системы сотовой телефонной связи / О. А. Сахаров // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. — 2005. — № 2. — С. 10–14.
15. Yin Y. J. Snow and earthquake load combination considering snow accumulation / Y. J. Yin, Y. Li, W. M. Bulleit // *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering, October 12–17, 2008*. — Beijing, China.
16. Сабирова О. Б. Распределение пиковых ускорений землетрясения для площадки строительства / О. Б. Сабирова // *Вопросы инженерной сейсмологии*. — 2021. — 48. — № 1. — С. 5–14. — DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2021.1-1>.
17. Райзер В. Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций / В. Д. Райзер. — М., Стройиздат, 1986. — 193 с.
18. Poutanen T. Load combination of permanent and variable loads. *Rakenteiden Mekaniikka* / T. Poutanen, J. Mäkinen, S. Pursiainen et al. // *Journal of Structural Mechanics*. — 2018. — Vol. 51. — № 1. — Pp. 1–9.
19. Sakharov O. A. On the issue of assigning coefficients for combinations of seismic and other loads / O. A. Sakharov // *Earthquake-resistant construction*. — 2003. — № 2. — Pp. 9–11.
20. Сабирова О. Б. Оценка коэффициентов сочетаний сейсмической и ледовой нагрузок / О. Б. Сабирова // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2019. — № 1. — С. 28–32.
21. Долгая А. А. Моделирование сейсмического воздействия коротким временным процессом / А. А. Долгая // Э-И. ВНИИТПИ. Сер.: Сейсмостойкое строительство. — 1994. — Вып. 5-6. — С. 56–63.

Дата поступления: 05.05.2022

Решение о публикации: 28.05.2022

Контактная информация:

УЗДИН Александр Моисеевич — д-р техн. наук, профессор; uzdin@mail.ru

БЕНИН Андрей Владимирович — канд. техн. наук, доцент; benin.andrey@mail.ru

НАЗАРОВА Шохиста Шукурилла кизи — аспирант; shoxistashukurullayevna@yandex.ru

САБИРОВА Ойпошша Бахтияровна — магистр; sabirovaanna95@yandex.ru

БЕЛАШОВ Михаил Сергеевич — аспирант; derof1996@mail.ru

Features of Construction Calculation on Frequent Weak Earthquake Impact

A. M. Uzdin, A. V. Benin, Sh. Sh. Nazarova, O. B. Sabirova, M. S. Belashov

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

For citation: Uzdin A. M., Benin A. V., Nazarova Sh. Sh., Sabirova O. B., Belashov M. S. Features of Construction Calculation on Frequent Weak Earthquake Impact // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 390–404. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-390-404

Summary

Purpose: To show the features of the calculation of constructions in opposition to the effect of weak frequent earthquakes. **Methods:** Numerical modeling of seismic vibrations of constructions. Analysis of limit states. **Results:** The specificities of construction calculation for impact of weak earthquakes are analyzed. Earthquakes of 1 per 30 and per 50 years repeatability are considered. In the first case, after an earthquake a construction should operate standardly, without damage. In the second case, damages, that does not affect construction exploitation, are accepted. Main attention is paid on the three issues: setting of elastic and damping characteristics of ferroconcrete, formalization of limit states, load combinations. The dependence of a damping from ferroconcrete reinforcement degree is estimated. When evaluating limit states, besides calculations on crack resistance and strength, the possibility to exclude people panic is considered. To make so, it's proposed to limit speed level in certain octave ranges. Proposals are developed for estimation of coefficients for combinations of various loads with seismic ones. The coefficients for combinations of seismic and ice loads are evaluated. **Practical importance:** A system of calculating coefficients has been established to assess seismic resistance under relatively weak, frequent impacts. It's been shown that for strong impacts, the combination coefficients for different regions turn out to be close to each other, while for weak impacts, they can differ drastically.

Keywords: Weak earthquakes, frequent earthquakes, limit state, reinforcement coefficient, crack resistance, strength, load combination coefficient.

References

1. Dolce Mauro, Kappos Andreas, Masia Angelo, Penelisb Gregory, Vona Marco. Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies. *Engineering Structures*, 2006, I. 28, pp. 357–371.

2. Le norme tecniche per le costruzioni. Il ministero delle infrastrutture e dei trasporti. 2018.

3. *GOST 12.1.003-83 Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Shum. Obshchie trebovaniya bezopasnosti (s Izmeneniyem N 1)* [GOST 12.1.003-83 Occupational safety standards system (SSBT). Noise. General safety requirements (with Amendment No. 1)]. (In Russian)

4. Nesterova O. P., Nikonova N. V., Fedorova M. Yu., Uzdin A. M., Vorobyova K. V. Taking account of damping

in estimating structure earthquake stability. *Materials Physics and Mechanics*. 2016, I. 26, pp. 57-60.

5. *Rukovodstvo po proektirovaniyu fundamentov mashin s dinamicheskimi nagruzkami* [Guidelines for the design of foundations for machines with dynamic loads]. Stroyizdat Publ., Moscow, 1982, p. 207. (In Russian)

6. Il'ichev V. A., Mongolov Yu. V., Shaevich V. M. *Svaynye fundamenty v seismicheskikh rayonakh* [Pile foundations in seismic regions]. Stroyizdat Publ., Moscow, 144 p. (In Russian)

7. Aptikaev F. F. *Instrumental'naya shkala seismicheskoy intensivnosti* [Instrumental scale of seismic intensity]. Moscow: «Nauka i obrazovanie» Publ., 2012. 176 p. (In Russian)

8. Areshchenko T. S., Prokopovich S. V., Sabirova O. B., Frolova E. D. «Zadanie urovnya seismicheskogo vozdeystviya dlya otsenki seysmostoykosti sooruzheniy pri

mnogourovnevom proektirovaniy» [“Setting the level of seismic impact to assess the seismic resistance of structures in multi-level design”]. *Prirodnye i tekhnogennye riski. Bezopasnost' sooruzheniy* [Natural and technogenic risks. Building safety]. 2018, I. 4, pp. 25-27. (In Russian)

9. Areshchenko T. S., Prokopovich S. V., Sabirova O. B., Frolova E. D., Uzdin A. M. *Programma opredeleniya pikovykh uskoreniy seysmicheskogo vozdeystviya. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2018664350. Avtory: Uzdin A. M., Prokopovich S. V., Areshchenko T. S., Frolova E. D., Sabirova O. B. Zaregistrovanna 14 noyabrya 2018 g.* [Program for determination of peak accelerations of seismic impact. Certificate of state registration of the computer program No. 2018664350. Authors: Uzdin A. M., Prokopovich S. V., Areshchenko T. S., Frolova E. D., Sabirova O. B. Registered November 14, 2018]. (In Russian)

10. *Seysmicheskaya sotryasaemost' territorii SSSR* [Seismic shaking of the territory of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 192 p. (In Russian)

11. Nazarova Sh. Sh., Uzdin A. M. Setting peak ground accelerations for performance-based design of earthquake-resistant constructions. *Seismic instruments*. 2020, vol. 56, I. 2, pp. 225-236.

12. Uzdin A. M., Tsibarova M. Yu. Vliyanie dempfirovaniya na velichinu koeffitsienta dinamichnosti [Influence of damping on the value of the coefficient of dynamism]. *Ekspress-informatsiya “Seysmostoykoe stroitel'stvo”* [Express-information “Seismic-resistant construction”]. 1985, I. 11, pp. 27-30. (In Russian)

13. Uzdin A. M., Kuznetsova I. O. *Seysmostoykost' mostov* [Seismic resistance of bridges]. Saarbrücken (Germaniya), Palmarium Publ., 2014. 450 p. (In Russian)

14. Sakharov O. A. Analiz seysmostoykosti metallicheskoy bashni «Ramboll» sistemy sotovoy telefonnoy svyazi [Analysis of the seismic resistance of the metal tower “Ramboll” of the cellular telephone system]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Seismic construction. Building safety]. 2005, I. 2, pp. 10-14. (In Russian)

15. Yin Y. J., Li Y., Bulleit W. M. Snow and Earthquake Load Combination Considering Snow Accumulation. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, 2008, Beijing, China.

16. Sabirova O. B. Raspredelenie pikovykh uskoreniy zemletryaseniya dlya ploshchadki stroitel'stva [Distribution of peak earthquake accelerations for the construction site.].

Voprosy inzhenernoy seysmologii [Issues of engineering seismology.]. 2021, vol. 48, I. 1, pp. 5–14. Available at: <https://doi.org/10.21455/VIS2021.1-1>. (In Russian)

17. Rayzer V. D. *Metody teorii nadezhnosti v zadachakh normirovaniya raschetnykh parametrov stroitel'nykh konstruktsey* [Methods of the theory of reliability in the problems of normalizing the design parameters of building structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 193 p. (In Russian)

18. Tuomo Poutanen, Jari Mäkinen, Sampsa Pursiainen, Tim Länsivaara. Load combination of permanent and variable loads. *Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics)*. 2018, vol. 51, I. 1, pp. 1–9.

19. Sakharov O. A. On the issue of assigning coefficients for combinations of seismic and other loads. *Earthquake-resistant construction*. 2003, I. 2, pp. 9-11.

20. Sabirova O. B. Otsenka koeffitsientov sochetaniy seysmicheskoy i ledovoy nagruzok [Evaluation of the coefficients of combinations of seismic and ice loads]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Seismic construction. Building safety]. 2019, I. 1, pp. 28-32. (In Russian)

21. Dolgaya A. A. Modelirovanie seysmicheskogo vozdeystviya korotkim vremennym protsessom [Modeling of seismic action by a short time process]. *E-I. VNIINTPI. Ser. “Seysmostoykoe stroitel'stvo”* [E-I. VNIINTPI. Ser. “Seismic resistant construction”]. 1994, I. 5-6, pp. 56-63. (In Russian)

Received: May 05, 2022

Accepted: May 28, 2022

Author's information:

Alexander M. UZDIN — D. Sci. in Engineering, Professor; uzdin@mail.ru

Andrey V. BENIN — PhD in Engineering, Associate Professor; benin.andrey@mail.ru

Shoxista Sh. NAZAROVA — Postgraduate Student; shoxistashukurullayevna@yandex.ru

Oyposhsa B. SABIROVA — Master's Degree Student; sabirovaanna95@yandex.ru

Mikhail S. BELASHOV — Postgraduate Student; derof1996@mail.ru