НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ, том 15, выпуск 3, 2018

ISSN (Print) 1815-588X

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

Адрес учредителя и издателя
190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005 г., 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 г., № 6/6)

Журнал публикует научные статьи в областях технические науки (05.00.00): транспорт (05.22.00), информатика, вычислительная техника и управление (05.13.00), строительство и архитектура (05.23.00), радиотехника и связь (05.12.00); науки о Земле (25.00.00)

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется
по адресно-целевой подписке через редакцию и каталог ОАО «Роспечать» (индекс 18509)

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

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

Заместитель главного редактора
В. В. Сапожников, д-р техн. наук, профессор

Научный редактор
А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

Выпускающий редактор
Э. А. Горелик

Перевод на английский язык
Ю. А. Фаттахова

Верстка
А. А. Стуканова

Редактор сайта
А. В. Степанова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

Юсупов Рафаэль Мидхатович, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН, Институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Россия

Шнайдер Экхард, профессор, Фраунгоферовский институт неразрушающего контроля, Саарбрюкен, Германия

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический университет, София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

Губачева Лариса Александровна, д-р техн. наук, профессор, Восточно-Украинский национальный университет им. В. Даля, Луганск, Украина

Гуда Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия

Корниенко Анатолий Адамович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

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

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

Фото на обложке из архивов библиотеки ФГБОУ ВО ПГУПС. 1910 г.

Подписано в печать с оригинал-макета 20.09.2018.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.
Усл. печ. л. 20,5. Установочный тираж 300 экз.
Заказ 812. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ПГУПС
190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 15, issue 3, 2018

ISSN (Print) 1815-588X

Founder and publisher
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University"

Founder and publisher address
190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32

Editorial address
190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Mass media registration certificate number
ПИ N ФС2-7499 dd. 06.04.2005 issued by the Federal service for the monitoring of legislation compliance in the sphere of mass communications and the preservation of cultural heritage, North West Federal district division

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

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

The journal publishes scientific articles in the fields of Technics (05.00.00): Transport (05.22.00), Informatics, computer engineering and management (05.13.00), Construction and architecture (05.23.00), Radiotechnics and communication (05.12.00); Geoscience (25.00.00)

The Journal has the Peer-review division

The Journal is destributed by direct subscription via Editorial office and Rospechat catalogue (item 18509)

JOURNAL STAFF

Editor–in–chief
A. Yu. Panychev, Cand. of Economics, Associate Professor

Deputy chief editor
V. Sapozhnikov, D.Eng., Professor

Science editor
A. Kanayev, D.Eng., Associate Professor

Executive editor
E. Gorelik

English translation
Yu. Fattakhova

Layout
A. Stukanova

Online content editor
A. Stepanova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Aleksander Panychev, Cand. of Economics, Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Rafael Yusupov, D.Eng., Professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

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

Marek Sitazh, Professor, Silesian University of Technology, Poland

Khristo Khristov, Professor, Technical University of Sofia, Bulgaria

EDITORIAL TEAM

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

Mikhail Badyer, D.Eng., Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, Russia

Larisa Gubachyeva, D.Eng., Professor, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Luhansk, Ukraine

Aleksander Guda, D.Eng., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Anatoliy Kornienko, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Aleksander Ledyayev, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Tamila Titova, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Andrey Kanayev, D.Eng., Assoc. Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Published by Petersburg State Transport University
190031, St. Petersburg., Moskovskiy pr., 9
Open price

© Petersburg State Transport University, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Титова Т. С., Покровская О. Д. 327
Организация транспортно-складских систем железнодорожного транспорта

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

Белый А. А., Карапетов Э. С., Цыганкова Е. С. 344
Развитие норм проектирования и временных нагрузок на примере парка железобетонных автодорожных мостов Санкт-Петербурга

Василенко М. Н., Булавский П. Е., Василенко П. А.
Анализ и классификация кибератак на электронную техническую документацию железнодорожной автоматики и телемеханики 358

Горбачев А. М.
Обзор математических моделей расписаний маршрутного городского транспорта 366

Городнова Е. В., Минченко А. А., Суворова Е. А.
Исследование плотности сложения песчаных грунтов в основании дорожной насыпи в процессе ее уплотнения взрывами удлиненных зарядов 371

Грачев В. В.
Модель нестационарного теплообмена в охлаждающем устройстве тепловоза 380

Индейкин А. В., Куранова О. Н., Черных А. К., Чентурия Г. Г.
К вопросу о повышении точности расчетов при строительстве транспортных коммуникаций 391

Кочунов Ю. А, Волгин Е. С., Чебаков С. А.
Анализ производства опор контактной сети железных дорог, выполненных из полимерных композитных материалов 399

Ленченкова Е. П.
Моделирование трассы железнодорожного пути по результатам мобильного лазерного сканирования 408

Марикин А. Н., Степанова К. К.
Особенности оптимизации подсистемы электроснабжения электрической тяги на железнодорожном транспорте 414

Матюшенко Е. С., Кулакова Ю. В., Шепель А. С.
Формирование схемы доставки бурового оборудования для нефтегазового сектора из Китая в Россию 426

Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Абдуллаев Р. Б.
Особенности организации систем функционального контроля комбинационных схем на основе полиномиальных кодов 432

Соловьев С. В., Кабанов А. В., Жемчугова Н. А.

К вопросу разработки схем организации работ по строительству и реконструкции железнодорожных сортировочных комплексов 446

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Аршинцев Д. Н., Толмачев С. В., Бржезовский А. М.

Разработка условий эксплуатации специальных вагонов по результатам комплексных испытаний 455

Верех–Белоусова Е. И., Титова Т. С.

Эколого-геохимическое обоснование возможности переработки породных отвалов угольных шахт Луганщины 463

Клименко С. В., Яковлев В. В., Благовещенская Е. А.

Исследование реализаций алгоритмов контрольной суммы CRC32 471

Рыбин П. К., Ершиков Н. В., Комовкина Н. С., Путилина Д. В.

Анализ структуры поездопотоков и вагонопотоков, поступающих в адрес российских портов Финского залива 478

УДК 656.073:658.8

Т. С. Титова, О. Д. Покровская

ОРГАНИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСКИХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Дата поступления: 08.02.2018
Решение о публикации: 16.04.2018

Аннотация

Цель: Разработать концептуально-принципиальные основы организации транспортно-складских систем железнодорожного транспорта. **Методы:** Использован аналитический метод. **Результаты:** Проведен краткий анализ литературных источников, посвященных проблемам организации перевозочного процесса железнодорожным транспортом. Обоснован понятийный аппарат транспортно-складских систем. Показано, что систему доставки можно рассматривать как транспортно-складскую. Отмечены признаки научной новизны и аспекты практического применения результатов. Описана концептуальная сущность предлагаемой транспортно-складской системы доставки высокодоходных грузов для комплексного транспортно-логистического обслуживания клиентов. Разработаны и показаны в графической форме типовые схемы организации перевозочного процесса с использованием транспортно-складских систем. Представлена экономико-математическая модель оценки состава терминальной сети. Ее эффективность рассматривалась на примере Новосибирского транспортного узла. Рассчитаны параметры доставки грузов по принципу «от логистического объекта до логистического объекта» по существующей и разрабатываемой схемам. Результаты проведенных расчетов для существующего логистического объекта, размещенного на станции *К*, по разным вариантам доставки приведены на рисунках и в сравнительных таблицах. Данные расчета экономической эффективности предложения показали, что за счет формирования собственной терминальной сети для переработки различной номенклатуры тарно-штучных грузов на опорных грузовых станциях, с предоставлением клиентам широкого спектра дополнительных услуг, ОАО «РЖД» восстановит упущенную прибыль от потери клиентов, пользующихся услугами приватных логистических объектов на местах необщего пользования. **Практическая значимость:** Применение предложений в практике ведения ОАО «РЖД» транспортно-логистического бизнеса позволит повысить прибыльность работы Холдинга РЖД за счет роста клиентоориентированности и комплексности реализуемого сервиса.

Ключевые слова: Транспортно-складская система, логистический объект, терминальная сеть.

Tamila S. Titova, D. Eng. Sci., professor, head of a chair, prorector; ***Oksana D. Pokrovskaya,** Cand. Eng. Sci., associate professor, insight1986@inbox.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University). ORGANIZATION OF RAIROAD STORAGE-RETRIEVAL SYSTEMS

Summary

Objective: To develop a conceptually basic framework for organizing railroad storage-retrieval systems. **Methods:** Analytical method was applied. **Results:** A brief analysis of literature references, dedicated to

the problems of organizing transportation process by means of railroad transport, was carried out. The conceptual framework of storage-retrieval systems was justified. It was demonstrated that the delivery system might be regarded as a storage-retrieval system. Features of scientific novelty as well as aspects of practical application of the results were pointed out. Conceptual content of the suggested storage-retrieval delivery system of highly-profitable freight for integrated transport and logistic customer service was described. Typical charts of organizing transportation process with the use of storage-retrieval systems were developed and displayed in graph form. A mathematical economic model designed to assess the structure of terminal network was presented. Efficiency of the model in question was studied through the example of the Novosibirsk transportation hub. Parameters of freight delivery were calculated by the principle "from a logistical object to a logistical object" according to the current chart and those being developed. The results of conducted calculations for the current logistical object, located at the station *K*, were presented in figures and comparative tables according to different delivery options. Calculation data of economic efficiency of the proposal showed that OAO Russian Railways will restore the profit lost from client attrition, that command the services of private logistical objects in places of uncommon use, by means of generating its own terminal network for handling a range of unitized cargo at baseline freight stations and providing clients with a wide range of additional services. **Practical importance:** Application of proposals in OAO "Russian Railways" transport and logistical business will make it possible to improve cost-effectiveness of Russian Railways Holding Company operation by developing client-centeredness and integrity of the implemented service.

Keywords: Storage-retrieval system, logistical object, terminal network.

Постановка задачи

Вопросами организации рациональных систем доставки грузов в различных аспектах и постановке задач занимались многие выдающиеся отечественные и зарубежные ученые.

Огромный вклад в создание отечественной теории управления процессами перевозок внесли такие ученые как В. И. Апатцев [1], В. М. Акулиничев [2], С. П. Вакуленко [3, 4], Ю. И. Ефименко [2], Е. В. Архангельский [4], С. В. Земблинов, Л. В. Канторович, А. В. Комаров, В. Я. Негрей, В. Н. Образцов [5], Н. В. Правдин [2, 3], В. В. Повороженко [6], И. Е. Савченко [2], К. Ю. Скалов, В. Г. Шубко [4] и др. Важнейшее значение для железнодорожной отрасли имеют труды А. Ф. Бородина, С. Ю. Елисеева [7], П. А. Козлова, В. А. Кудрявцева [8], П. В. Куренкова [9], Б. А. Лёвина, А. Т. Осьминина [10], В. А. Персианова [4], С. М. Резера [11], посвященные совершенствованию транспортных и логистических технологий доставки грузов. Значительную роль в формировании теории транспортно-грузовых систем, проектирования компоновки и технического оснащения транспортных узлов играют работы таких ученых как О. Б. Маликов [12], А. А. Смехов [6], О. Н. Числов [13] и др. Существенный вклад в систему проектирования транспортно-логистических систем внесли научные труды А. С. Балалаева [14], А. М. Гаджинского [15], В. В. Дыбской [16], В. С. Лукинского, С. В. Милославской [17], В. М. Николашина [18], Т. А. Прокофьевой [19] и др.

За рубежом вопросами формирования транспортно-логистических систем занимались такие ученые как D. J. Bowersox [20], M. Christopher, I. Fechner, M. R. Ferguson, L. R. Ford, D. R. Fulkerson, C. D. Higgins [21], D. A. Kloss, D. M. Lambert, M. Linders, F. Medda [22], D. Middendorf [23], A. Musso [24], T. Notteboom [25], G. Potthof, J. R. Stock, G. Richards [26], J.-P. Rodrigue [27], V. Roso, A. Rushton [28] и др.

Высоко оценивая труды перечисленных и многих других ученых в области проектирования систем доставки грузов, следует отметить, что вопрос остается недостаточно изученным в части построения комплексной, интегрированной системы расчета, анализа и оценки параметров работы систем доставки как транспортно-складских систем.

Терминология

Любую систему доставки грузов можно представить как совокупность двух компонентов – объектов терминально-складской инфраструктуры, т. е. складов разных типов, мощности и назначения (накопительно-распределительную складскую систему), и соединяющих их транспортных звеньев (транспортную систему), т. е. как транспортно-складскую систему.

Транспортно-складская система (ТСС) – это совокупность элементов терминально-складской инфраструктуры транспорта, выполняющая логистические функции. Укажем отличительные черты понятия ТСС:

1) по нашему определению, ТСС – это комплексное, универсальное понятие, объединяющее несколько классов различных логистических объектов (ЛО), районов и областей как совокупности элементов терминально-складской инфраструктуры транспорта, выполняющих логистические функции;

2) ключевым признаком ТСС, согласно общей теории систем и теории складских систем О. Б. Маликова, является эмерджентность. В свою очередь, ЛО – это не станция, а объект на станции (место общего пользования) или тяготеющий к ней (место необщего пользования), соединенный с ней технологией работы (например, железнодорожный порт), но не сама собственно станция отправления или назначения в маршрутной доставке;

3) сущность ТСС заключается в понятийной интеграции подсистем транспорта и склада, что позволяет очертить новые границы междисциплинарных исследований по проектированию, изучению, развитию и эксплуатации ТСС, эволюционирующих и самоорганизующихся;

4) в известной маршрутной перевозке груз идет от станции отправления к станции назначения, а не от ЛО клиента до ЛО клиента, т. е. не по логистической цепи «клиент–клиент», в то время как ЛО клиента и ЛО станции тоже взаимодействуют между собой, но не включаются в общую систему доставки;

5) маршрутный поезд в стандартной технологии идет не до ЛО, а до станции назначения, на которой или вблизи которой может находиться ЛО, а может и нет. В ТСС же реализуются сквозной бесшовный сервис и управление максимально длинными логистическими цепями.

Терминальная сеть (ТС) – совокупность ЛО *i*-го типа и соединяющих их транспортных участков, обслуживаемых унимодально или мультимодально, для эффективной организации грузопереработки в процессе перевозки и доставки груза от клиента-грузоотправителя к клиенту-грузополучателю. ТС рассматривается как интегрированная система организации перевозочного процесса с использованием ЛО, размещаемых в узлах транспортной сети, на которых грузы перегружаются с одних видов транспорта на другие, а соединяющие их транспортные звенья или направления перевозок – это различные пути сообщения, транспортные коммуникации, по которым грузопотоки продвигаются из мест зарождения к местам их окончания.

Охарактеризуем предлагаемую ТСС как форму организации перевозочного процесса.

Цель ТСС – рациональная организация перевозок грузов блок-трейнами[1] «от ЛО до ЛО» по принципам логистики и клиентоориентированности при обеспечении сквозного бесшовного управления перевозочным процессом и комплексного транспортно-логистического обслуживания с повышением добавленной стоимости грузов.

ЛО – узловой элемент ТС как системы транспортно-складской инфраструктуры, выполняющий комплекс логистических функций в системе доставки груза от начального поставщика до конечного потребителя. В качестве ЛО могут выступать объекты инфра-

[1] Блок-трейн (по авторскому определению) – это ускоренный поезд, работающий в ТСС на регулярной основе по согласованному расписанию, сформированный из разрозненных партий грузов различных отправителей, вагонов разного типа и порожних вагонов, курсирующий «от ЛО до ЛО» и проходящий не менее одной технической станции без переработки.

структуры различной сложности (грузовые площадки, склады, терминалы, распределительные и логистические центры и т. д.), физически обеспечивающие реализацию комплексного многофункционального логистического обслуживания различных клиентов, сосредоточенные по совокупности признаков в пространственно определенном районе.

В частности, ***железнодорожный ЛО*** – объект терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта, располагаемый в транспортном узле и выполняющий функции узлового элемента терминально-логистической системы по техническому обеспечению и практическому выполнению услуг погрузки, выгрузки, хранения и распределения грузов, включая доведение грузов до конечного потребителя, при взаимодействии с участниками системы доставки и другими видами транспорта.

Сущность ТСС

Вид предлагаемой ТСС – это ТС железнодорожного транспорта (логистическая область по авторской классификации), состоящая из ЛО определенного типа, количества и дислокации, тяготеющих к крупным транспортным узлам и размещенных на некотором количестве участков транспортной сети, для обеспечения перевозок «от ЛО до ЛО», на которых комплексно обслуживаются и перерабатываются высокодоходные грузопотоки.

Согласно предлагаемой концепции ТСС, на общей сети железных дорог предлагается создать ТС, в которую будут входить ЛО разных типов, часть из которых может принадлежать ОАО «РЖД» (крупные грузовые дворы железнодорожных станций после их реконструкции и современного технического оснащения) или Холдингу РЖД (контейнерные терминалы существующей сети ПАО «Трансконтейнер), а часть – сторонним торговым и логистическим компаниям. Таким образом, узлами ТС, между которыми курсируют блок-трейны, как контейнерные, так и составленные из разных вагонов с высокодоходными грузами, могут служить существующие объекты терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта, их не менее 700, но они требуют существенного переустройства и модернизации (известно, что хранение груза на хорошо оснащенном ЛО в 7–8 раз дешевле, чем в вагонах) [29].

На рис. 1 представлено сравнение существующей и предлагаемой технологий выполнения перевозок с использованием ЛО. Согласно рис. 1, ТСС отличается глубиной интеграции в логистические процессы, возникающие при доставке грузов: ТСС не ограничивается только перевозкой по тарифному расстоянию от станции до станции, а есть полная логистическая цепь, начиная от ЛО начального отправителя и заканчивая ЛО конечного получателя груза, т. е. по системе «клиент–клиент».

К недостаткам существующей системы доставки относятся: большое число технических станций, как следствие – малые скорости продвижения вагонопотоков по сети; существенные затраты на строительство путей отстоя вагонов на всех типах станций; занятие значительной площади под путевое развитие станций для маневров и отстоя; высокие затраты локомотиво-часов на маневровые и сортировочные работы. Отличия предлагаемой ТСС доставки грузов (через ТС) от существующей сегодня ТСС с учетом рис. 1 и ключевых теоретических положений терминалистики [30, 31]: 1) более длинная логистическая цепь (ТСС, а не только транспортная система); 2) логистическое нормирование показателей ТСС; 3) маршрутная перевозка от ЛО до ЛО; 4) маршрутные поезда, сформированные из контейнерных и повагонных отправок; 5) комплексность и клиентоориентированность подхода при организации процессов перевозок.

Подробно рассмотрим два случая организации железнодорожной системы доставки грузов: первый – существующее долгое время состояние, когда ЛО начального отправления и конечного получения грузов не включались в состав общей транспортной цепи, обслуживаемой железнодорожным транспортом (рис. 2),

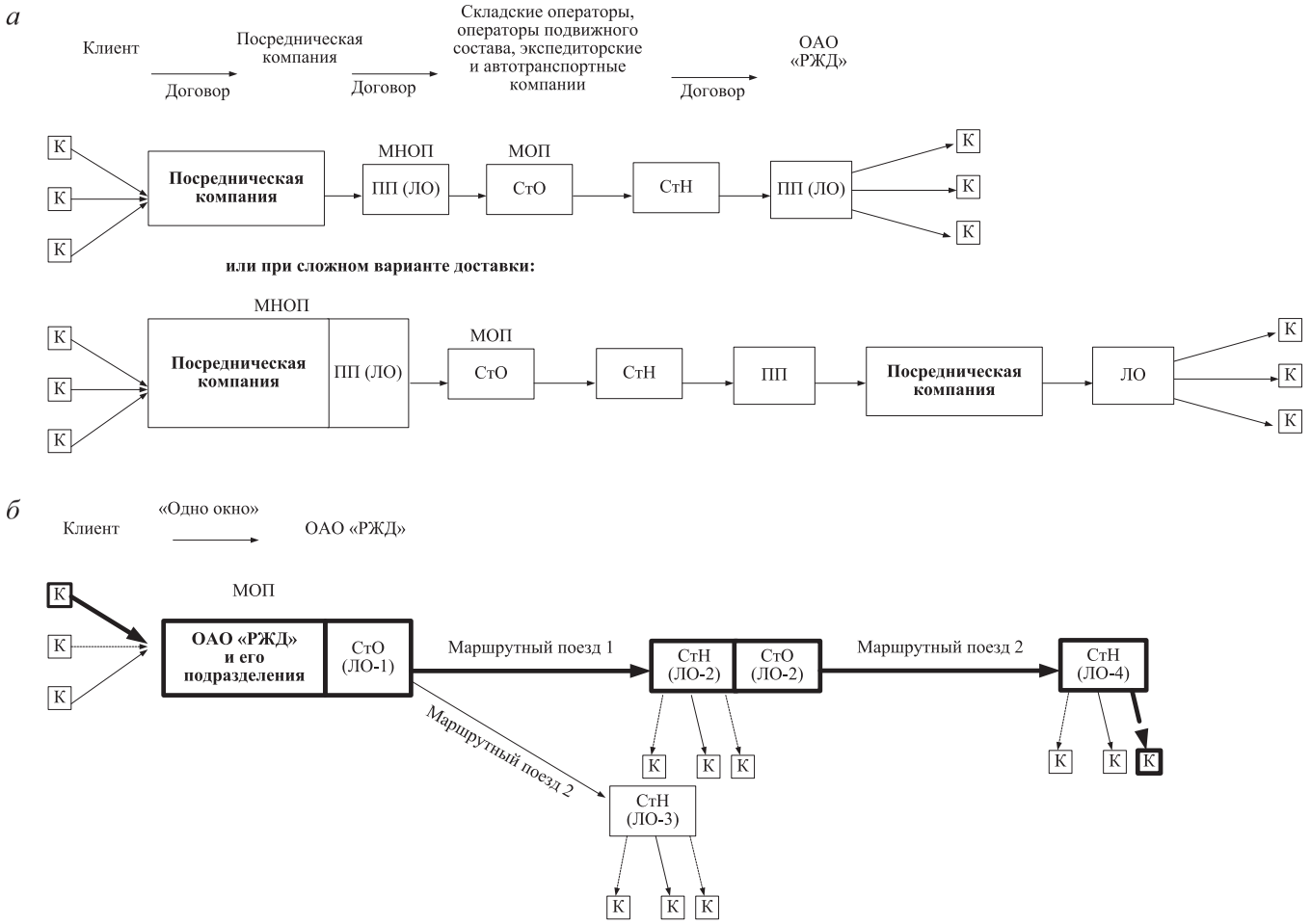


Рис. 1. Сравнение существующей и предлагаемой ТСС доставки груза:
а – существующая система доставки груза с промежуточными звеньями-посредниками; *б* – предлагаемая транспортно-складская система доставки груза (через ТС).
Условные обозначения: К – клиент, ПП – подъездной путь, ЛО-1, ЛО-2, ЛО-3, ЛО-4 – логистический объект 1–4 типа соответственно, МОП – место общего пользования, МНОП – место необщего пользования, СтО – станция отправления, СтН – станция назначения. Толщиной линии показано продвижение груза по терминальной сети при сложном варианте доставки: ------► доставка автомобильным транспортом, ——► доставка железнодорожным транспортом

Рис. 2. Существующая система организации перевозок грузов

второй – разрабатываемый вариант решения вопросов управления процессами перевозок через ТС (рис. 3, *а*, *б*). Согласно предлагаемой концепции ТСС, возможно построение доставки с использованием имеющихся в транспортном узле ЛО, а также через сеть ЛО с применением маршрутных поездов (блок-трейнов).

В определении маршрутного поезда не указано, что грузы должны быть однородными [3, 9]. Соответственно включение в состав маршрутного контейнерного поезда вагонов с тарно-штучными грузами (повагонные отправки) не противоречит основам эксплуатационной работы железных дорог.

Авторское определение блок-трейна не противоречит известному определению *маршрутного поезда*: это «товарный поезд, идущий без изменения состава и груза по заранее намеченному маршруту до места назначения» [1], или «состав поезда установленной массы или длины, сформированный грузоотправителем или дорогой из вагонов, загруженных одним или несколькими грузоотправителями на одной или нескольких станциях отправления на одну станцию назначения, проходящий не менее одной технической станции без переработки» [3]. Кроме того, термин «блок-трейн» соответствует приведенному в Концепции

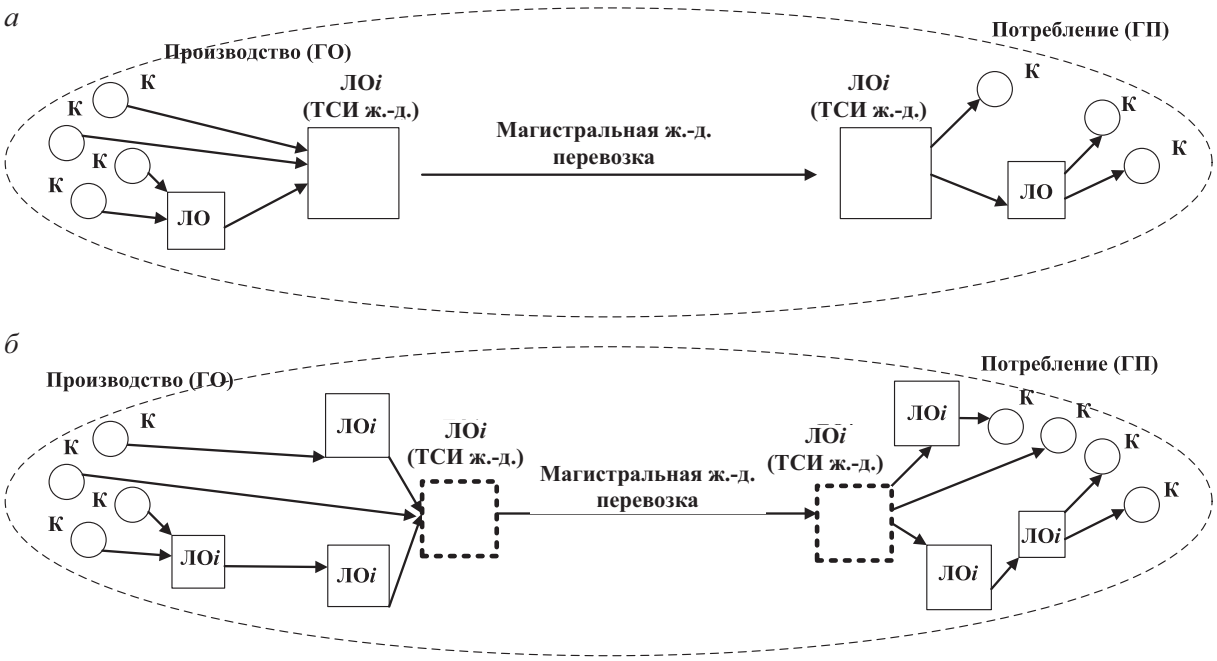


Рис. 3. Предлагаемая ТС доставки грузов:
а – простейший вариант конфигурации ТСС; *б* – усложненный вариант конфигурации ТСС мультимодального сообщения (с подключением множества клиентов и ЛО разных типов)

комплексного развития контейнерного бизнеса в Холдинге РЖД формату «ускоренный маршрутный контейнерный поезд» и не противоречит ему.

В настоящее время формирование контейнерного поезда часто срывается, поскольку один из грузоотправителей не готов предоставить груз в соответствующем объеме. В случае, если состав будет включать в себя и вагоны с тарно-штучными грузами, не будет срыва в расписании, а на железную дорогу привлекутся дополнительно высокодоходные грузы.

Это позволяет полагать, что эффективность предлагаемой ТСС заключается в: ускорении доставки грузов потребителям на 1–2 суток; сокращении расходов на техническое содержание и ремонт малодеятельных подъездных путей и станций участка; высвобождении маневровых и вывозных локомотивов, а также приемоотправочных путей участковой станции для более эффективного формирования отправительских маршрутов; увеличении технической и участковой скоростей по основному направлению магистральных перевозок через опорную участковую станцию в связи с высвобождением части ниток графика движения поездов, занятых сейчас движением сборно-разборных вывозных поездов. Затраты на строительство ЛО и местных автодорог быстро окупятся за счет сокращения расходов и активного взаимодействия железнодорожного транспорта с другими отраслями экономики [8, 12, 29].

В ЛО как в узловых элементах ТС пересекаются интересы всех участников процесса перевозки, в том числе клиентов и транспорта. Ключевое преимущество ТСС заключается в возможности мультимодального обслуживания и предоставлении широкого спектра транспортно-логистического сервиса в «одно окно» непосредственно на местах общего пользования с исключением промежуточных звеньев между транспортом и клиентом при обеспечении высокого качества, комплексности и персонифицированности услуг [32].

Концепция организации ТСС

Условия функционирования и управления процессами перевозок в ТСС заключаются в следующем:

1) внутрисетевые передачи груза и двойной учет грузооборота (погрузка на одном ЛО и выгрузка на другом ЛО) ТС;

2) интегрированная ТСС доставки груза, увязывающая в логистическую цепь всех участников процесса перевозки;

3) при организации доставки последующий тип ЛО должен быть равнозначным начальному или выше его для реализации ступенчатой маршрутизации и исключения промежуточных звеньев между ОАО «РЖД» и клиентом;

4) ключевая роль и многофункциональность ЛО в системе доставки грузов, его активное воздействие на добавленную стоимость грузов при обеспечении комплексного транспортно-логистического сервиса и обеспечении зарождения и погашения грузопотоков прямо на местах общего пользования;

5) организация доставки груза не от станции до станции, а от двери до двери;

6) мультимодальное обслуживание, т. е. включение в логистическую цепь доведения груза от дверей ЛО начального клиента до дверей ЛО конечного клиента, и рассмотрение не только железнодорожной, но и автомобильной перевозки груза, что расширит контроль первой и последней милей доставки [33];

7) рассмотрение роли ОАО «РЖД» в процессе перевозки как транспортно-логистической, а не инфраструктурной компании.

Основными условиями эффективного функционирования ЛО будем считать:

1) эффективность отдельных элементов ТСС – участков и узлов – должна отвечать эффективности все системы доставки грузов;

2) учет взаимодействия ЛО с участниками процессов перевозок (внешней среды), так и внутри ТСС, элементарной частью которой он является;

3) увязка при проектировании ТСС технических и технологических возможностей изменения грузопотока, проходящего через

ЛО, с внешним транспортом и требованиями клиентов [34];

4) уменьшение затрат на складскую обработку грузов не должно определять снижение уровня обслуживания клиентов;

5) комплекс логистических услуг, предоставляемых ЛО, должен отвечать задачам функционирования ТСС;

6) технические и технологические решения на ЛО должны исходить из логистической необходимости и экономической целесообразности;

7) сквозное управление предполагается бесшовным комплексным сервисом по всей ТСС.

Особенности ТСС: отличие от существующих транспортно-логистических продуктов ОАО «РЖД»

Рассмотрим, чем отличается ТСС от известных транспортно-логистических продуктов «Грузовой экспресс», «Первый контейнерный экспресс» и др.

На необходимость интеграции перевозочного процесса и процесса терминальной обработки контейнеров в рамках комплексной услуги перевозка «терминал–терминал» указывается в Концепции комплексного развития контейнерного бизнеса в Холдинге РЖД. Согласно этому документу, отмечены позитивные аспекты использования технологии «терминал–терминал» (авторский вариант «ЛО–ЛО»), которые и реализуются в предлагаемой ТСС как системе доставки грузов через ТС.

Анализ рынка транспортно-логистических услуг позволил сформулировать ключевые отличия ТСС от известных транспортно-логистических продуктов Холдинга РЖД:

1. ТСС – это физическая логистическая цепь, обеспечивающая реализацию комплексного транспортно-логистического обслуживания (КТЛО), в то время как «Грузовой экспресс» и другие продукты – логистические услуги нематериального характера.

2. ТСС предусматривает формирование поездов не только контейнерных или рефрижераторных, но и с различными типами вагонов.

3. ТСС предполагает расширение клиентской базы за счет высокой клиентоориентированности и простоты информации о ЛО (авторские системы идентификации и маркировки), а также расширение ассортимента реализуемых комплексных транспортно-логистических услуг.

4. Поезда по существующим сервисам идут, по сути, на сортировочные станции (Инская, Бекасово, Усть-Луга, Люблино и др.), что повышает нагрузку на сортировочные станции, а не на МОП, на которых сосредоточены современные терминально-складские мощности, позволяющие качественно обрабатывать входящие и исходящие грузопотоки. В ТСС же поезда идут «от ЛО до ЛО», размещенных на грузовых станциях (МОП), открытых для выполнения грузовых операций, минуя такую переработку в пути следования.

5. ТСС предполагает реализацию качественного логистического аудита всей системы доставки груза с применением системы индикаторов, позволяющих оценить эффективность работы как ТСС в целом, так и отдельных ее узлов (ЛО различного типа) и транспортных участков.

6. ТСС отличается глубиной интеграции в логистические процессы клиентов, не ограничиваясь комплексным транспортно-логистическим сервисом, но предлагая клиенту уникальную услугу, адаптированную его потребностям. Глубина интеграции заключается не только в доведении груза от станции отправления до станции назначения, а от клиента до клиента («от двери до двери»), через систему ЛО по принципу «от ЛО до ЛО», причем не только расположенных на МОП, но и непосредственно у клиентов.

7. В ТСС синтезированы все сильные стороны опыта предоставления комплексного транспортно-логистического сервиса, указанных услуг («Грузовой экспресс» и др.), для повышения доли высокодоходных грузов и привлечения клиентов на МОП путем формирования на них многофункциональных ЛО.

Формирование ТСС – это комплексное транспортно-логистическое решение, позво-

ляющее за счет модернизации инфраструктуры и совершенствования технологий транспортного обслуживания достичь повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта.

Реализация управления процессами перевозок с применением ТСС является ключевым обеспечивающим фактором перехода Холдинга РЖД к логистическому провайдеру уровня 4 PL.

Формирование ТСС в общем случае идет в следующей последовательности:

1) разработка стратегии ТСС, ее локальных задач функционирования в процессе грузодвижения, целевой клиентуры и ассортимента предоставляемого клиентам сервиса;

2) конфигурирование ТСС относительно сопряжения с транспортными коридорами, транспортными и терминальными сетями, а также количества, типа и дислокации узловых ЛО в ее составе;

3) проектирование узлов ТСС с учетом соответствующего развития примыкающей инфраструктуры и транспортных участков ТС;

4) управление процессами перевозок по узлам, участкам и сквозное управление ТСС в целом [35].

Рентабельный выбор состава ТС выглядит так («рентабельность терминальной сети *i*-го варианта при реализации ЛО *X* типа транспортно-логистических услуг по цене *C* объемом *A*»):

$$\sum E(\text{ЛО}_i) = \begin{cases} E_{\text{ЛО}1} = C_x A_x X N_{\text{рент}}, \\ E_{\text{ЛО}2} = C_y A_y Y N_{\text{рент}}, \\ \cdots \\ E_{\text{ЛО}i} = C_z A_z Z N_{\text{рент}}, \end{cases}$$

где $E_{\text{ЛО}i}$ – рентабельность ЛО; C_x, C_y, C_z – стоимость единицы транспортно-логистических услуг, реализуемых ЛО, усл. ед.; A_x, A_y, A_z – объемы транспортно-логистических услуг, реализуемых ЛО, ед.; X, Y, Z – тип ЛО; $N_{\text{рент}}$ – норма рентабельности транспортно-логистических услуг.

Согласно концепции создания ТСС, предлагается: 1) организация перевозок через ТС от ЛО до ЛО маршрутными поездами, 2) включение в состав маршрутных поездов повагонных и мелких отправок. Расчет проведен для одного крытого вагона (тарно-штучные грузы), следующего по существующей схеме как повагонная отправка и в составе маршрутного поезда по разработанной схеме, при реализации которой исключаются затраты клиента по хранению груза «на колесах» и/или на терминально-складских объектах в пунктах отправления и назначения, повышается срок доставки, снижаются общие затраты на доставку груза.

Для ОАО «РЖД» реализация предлагаемой схемы доставки грузов позволит привлечь новых клиентов и повысить клиентоориентированность за счет сокращения срока доставки и комплексной высококачественной грузопереработки по логистическим технологиям (в одно окно, от двери до двери, точно в срок), а также понижения себестоимости грузовой перевозки.

Результаты расчета эффективности разработанной схемы

Эффективность такой схемы рассматривалась на примере Новосибирского транспортного узла, логистические особенности которого изучены в [36]. Была запроектирована ТС, состоящая из трех ЛО разного формата на опорных станциях узла. В частности, проводились расчеты для существующего ЛО, размещенного на станции *K*, по двум вариантам доставки высокодоходного груза.

Расчеты параметров доставки грузов на разных условиях и по различным технологиям выполнялись с помощью программного обеспечения ЭТРАН, СЕТЬ-3, а также с использованием авторских программ для ЭВМ.

Рассчитаем параметры доставки грузов по принципу «от ЛО до ЛО» и проведем сравнительный анализ существующей и предлагаемой схем. Учитывая известную зависимость

величины провозной платы от условий перевозки (табл. 1 и рис. 4), рассмотрим эффективность организации ТСС с применением ступенчатого маршрута, сформированного на ЛО (МОП, формат – терминал) станции *К* Западно-Сибирской железной дороги, назначением на станцию *В* Дальневосточной железной дороги, как перспективной формы организации доставки.

Сравнение альтернативных схем доставки груза показано на рис. 5, *а*, *б*.

Общее количество погруженных вагонов за август 2015 г. со станций *Н*, *К* и *И* назначением на станцию *В* – 1638 вагонов, что позволяет формировать ежемесячно 42 маршрута. По станции *Н* месячная погрузка составила 287 вагонов, количество загружаемых вагонов в среднем – 6–7 для включения в маршрут. По станции *К* месячная погрузка составила 1095 вагонов, т. е. при ежедневной погрузке количество загружаемых вагонов составит в среднем 26 для включения в маршрут. По станции *И* месячная погрузка – 259 вагонов, количество загружаемых вагонов – в среднем 6–7 для включения в маршрут. В состав маршрута включаются 71 условных (39 физических) вагонов. Следовательно, имеется возможность для ежедневного формирования маршрута, причем в некоторые дни их будет два.

Таким образом, существуют условия для формирования маршрута на станции *К*, по которой выполняется наибольшая погрузка. Календарный план погрузки представлен в табл. 2.

Результаты расчета величины общих затрат приведены в табл. 3.

Расходы на продвижение вагонов в составе контейнерного поезда и при повагонной отправке равны. Однако при повагонной отправке расходы увеличиваются за счет разницы во времени при нахождении вагонов на технических станциях. При сопоставлении вариантов следования вагона в составе маршрутной и повагонной отправки определены элементы простоя вагона, они составляют 41,11 и 29,57 ч соответственно.

Время на подвод загруженных вагонов со станций *И* и *Н* составило 1,52 ч, а затраты – 8,086 тыс. руб.; на формирование ступенчатого маршрута – 4,56 ч, а затраты – 7,959 тыс. руб.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительный анализ стоимости схем доставки груза, в руб.

Расстояние, км Масса груза при повагонной отправке (ПВО), схема И1+В3, класс груза 1	500	1000	2000	4000	6000
20 т	5836,3	8583,9	13 078,7	19 698,3	26 989,4
За 1 т	291,8	429,2	653,9	984,9	1349,5
30 т	5947,9	8785,1	13 422,4	20 240	27 744,4
За 1 т	198,3	292,8	447,4	674,7	924,8
Расстояние, км Масса груза в 20-футовом контейнере – 12 т	500	1000	2000	4000	6000
Ускоренный контейнерный поезд (УКП)	1250	2500	5000	10 000	15 000
За 1 т	104,2	208,3	416,7	833,3	1250
Контейнерная отправка (КП)	4720,7	6419,8	9533,4	15 454,3	22 039,9
За 1 т	393,4	535	794,5	1287,9	1836,7

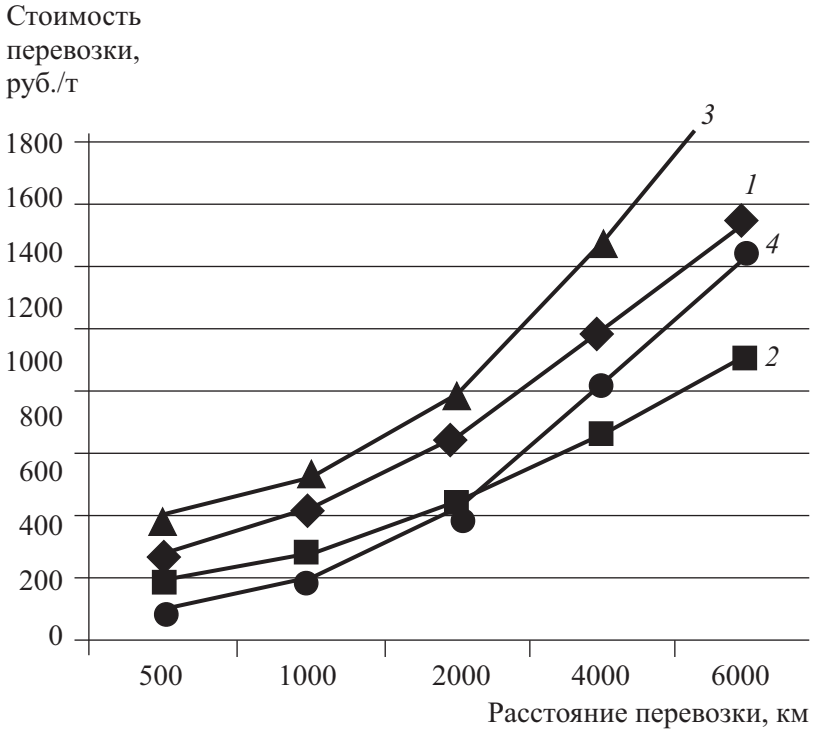


Рис. 4. Зависимость величины провозной платы от условий перевозки (в расчете на 1 т груза): *1* – ПВО (20 т); *2* – ПВО (30 т); *3* – КП, 20-футовый контейнер (12 т); *4* – УКП, 20-футовый контейнер (12 т)

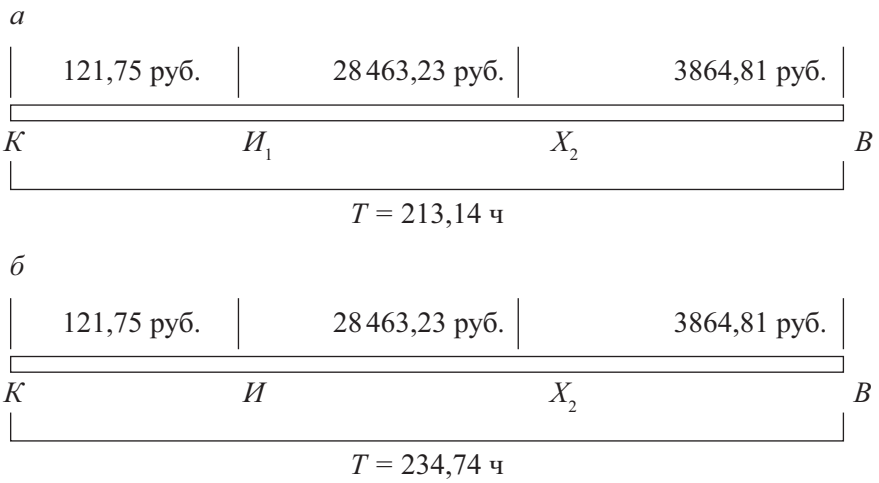


Рис. 5. Альтернативные схемы следования по направлению *К–В*: *а* – контейнерного поезда, *б* – повагонной отправки

Расчеты показали, что величина простоя местного вагона при отправлении маршрутной отправкой меньше на 11,54 ч. Расчет экономически целесообразных направлений вагонопотоков выполнялся в программе СЕТЬ-3. Установлено, что при маршрутном отправлении затраты в пути следования за счет высвобождения от переработки на технических станциях составляют на маршруте *К–В* 1120,72 руб. на 1 вагон, а при повагонной отправке того же направления – 1724,28 руб. на 1 вагон, экономия равна 603,56 рубля.

ТАБЛИЦА 2. Календарный план маршрутизации

Станция отправления	Дни месяца																												Всего
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
К	26	52	26	52	26	52	26	52	26	26	52	26	52	26	52	26	52	26	52	26	52	26	52	26	26	52	26	26	26	26	1092
H_1	7	12	7	14	7	12	7	14	7	7	14	7	14	6	14	7	12	7	14	7	14	7	14	7	7	14	7	7	7	7	287
H_2	6	14	6	12	6	14	6	12	6	6	12	6	12	7	12	6	14	6	12	6	12	6	12	6	6	12	6	6	6	6	259
Всего	39	78	39	78	39	78	39	78	39	39	78	39	78	39	78	39	78	39	78	39	78	39	78	39	39	78	39	39	39	39	1638

Сократилось время доставки, которое является одним из важнейших показателей работы: при отправлении контейнерным поездом – 213,4 ч, а при отправлении повагонной отправкой оно увеличилось на 21,34 ч и составило 234,74 ч. За счет этого количество поездо-часов при повагонной отправке по сравнению с контейнерной изменится с 9859,08 до 8962,8. Общие затраты снизятся с 16 813,77 до 15 285,24 тыс. руб. и экономия составит 1528,52 тыс. руб. При этом технологический срок доставки для направления *К*–*В* составляет: время на продвижение – 6 сут., время на технических станциях – 4 сут., время на погрузку и выгрузку – 1 сут. Общее время – 11 сут.

Определены дополнительные затраты на подвод групп вагонов на станцию формирования маршрута и его формирования – 16,04 тыс. руб. При этом исключена переработка вагонов со станций *К*, *Н*, *И* на станции $И_1$, т. е. станция $И_1$ «высвобождается» от переработки данного вагонопотока. Затраты на переработку 1-го вагона на станции $И_1$ составили 529,43 руб. (данные «СЕТЬ-3»). Тогда экономия затрат станцией $И_1$ от исключения переработки вагонопотока со станций *К*, *Н*, *И*, включаемого в маршрут, составила 1578,73 тыс. руб. за счет сокращения поездо-часов; разность времени на пропуск вагонов в маршрутном и немаршрутном составах – 21,34 ч; месячная экономия на формирование составов – 988,631 тыс. руб. Общая экономия от формирования маршрутов на станции *К* – 186,808 тыс. руб. на одну отправку.

Выводы

За счет формирования собственной ТС для переработки различной номенклатуры тарно-штучных грузов на опорных грузовых станциях, с предоставлением клиентам широкого спектра дополнительных услуг, ОАО «РЖД» восстановит упущенную прибыль от потери клиентов, за счет реализации комплексного транспортно-логистического обслуживания

ТАБЛИЦА 3. Сравнение величины общих затрат по вариантам доставки груза по направлению *К–В*

Станция погрузки	Станция назначения	Высвобождающиеся станции	Протяженность участка, $L_{уч}$, км	Время нахождения на технических станциях, ч	Общее время маршрута, ч	Затраты на переработку на технических станциях, руб.	Время в пути, ч	Общие затраты на маршрут, руб.
Затраты на 1 вагон при повагонной отправке (с переработкой)								
К	*В*	$И_1, Х_2$	5752	111,1	234,74	1724,28	123,64	34 165
Затраты на 1 вагон в контейнерном поезде (без переработки)								
К	*В*	$И_1, Х_2$	5752	89,5	213,4	1120,72	123,64	33 561,44

ОАО «РЖД», обеспечив все функциональные и инфраструктурные условия для образования грузопотоков прямо на МОП (на объектах терминально-складской инфраструктуры ОАО «РЖД»), а не на подъездных путях (на приватных объектах коммерческих логистических операторов). Это позволит оптимизировать существующую ТСС и грузовую работу, обеспечит привлечение дополнительной грузовой базы высокотарифицированных грузов на железнодорожный транспорт, что способствует повышению конкурентоспособности ОАО «РЖД» в целом.

Для клиентов Холдинга РЖД работа с ЛО ТС обеспечит сокращение срока доставки, упрощение получения сервиса «одного окна» при нахождении ЛО на МОП, получение «пакетного» комплексного сервиса, гарантированное время отправления и прибытия поездов, сокращение транспортных расходов.

Об эффективности предложенной системы организации перевозочного процесса свидетельствуют полученные результаты расчетов в условиях Новосибирского транспортного узла.

Кроме того, следует отметить следующее. Доход железной дороги от реализации разработанной технологии составит не менее 750 тыс. руб. за один рейс ускоренного маршрутного поезда, сформированного из вагонов различного типа – фитинговые платформы, крытые и полувагоны с высокодоходными тарно-штучными грузами и грузами в контейнерах. При этом экономия грузовладельца составит не менее 5 тыс. руб. при перевозке одной тонны груза по предлагаемой технологии с учетом автомобильной доставки и терминально-складской обработки груза на ЛО – в пунктах отправления и прибытия поезда соответственно.

Учитывая, что доход ОАО «РЖД» от выполнения комплекса терминально-логистических услуг не менее 35 000 руб. за один вагон, то привлечение каждой дополнительной 1 тыс. т груза позволит получать прибыль не менее 35 млн руб. Если доход ОАО «РЖД» от терминально-складской переработки 1 т тарно-штучного груза составляет не менее 400 руб., то строительство типового ЛО, состоящего из крытого склада мощностью грузопереработки 4 тыс. т/сут., принесет компании ежедневную прибыль в 1 млн 600 тыс. руб.

Организация ТСС позволит существенно повысить информированность клиента о продуктах КТЛО, а также предпринять активные усилия по выходу Холдинга на рынок и установления соглашений с экспедиторскими компаниями, обслуживающими выстраиваемые ОАО «РЖД» логистические цепи. Привлечение крупных клиентов на ЛО, расположенные на МОП, возможно путем работы Холдинга с клиентами в формате «build-to-suit (BtS)», что

позволит формировать персонифицированные предложения КТЛО.

Таким образом, предлагаемая схема доставки грузов через ТСС «от ЛО до ЛО» соответствует приоритетам развития терминально-складской инфраструктуры, отмеченным в Транспортной стратегии РФ до 2030 года и Концепции создания терминально-логистических центров на территории РФ.

Библиографический список

1. Апатцев В. И. Железнодорожные станции и узлы / В. И. Апатцев, Ю. И. Ефименко, Н. В. Правдин и др. ; под ред. В. И. Апатцева, Ю. И. Ефименко. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 450 с.

2. Акулиничев В. М. Железнодорожные станции и узлы / В. М. Акулиничев, Н. В. Правдин, В. Я. Болотный, И. Е. Савченко ; под ред. В. М. Акулиничева. – М. : Транспорт, 1990. – 480 с.

3. Правдин Н. В. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич и др. ; под ред. Н. В. Правдина, С. П. Вакуленко. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2012. – 1086 с.

4. Шубко В. Г. Железнодорожные станции и узлы /В. Г. Шубко, Н. В. Правдин, Е. В. Архангельский, В. Я. Болотный, В. А. Бураков, С. П. Вакуленко, В. А. Персианов ; под ред. В. Г. Шубко, Н. В. Правдина. – М. : УМК МПС РФ, 2002. – 368 с.

5. Образцов В. Н. Избранные труды : в 3 т. / В. Н. Образцов; ред. комис. Ф. И. Шаульский и др.– М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 446 с.

6. Смехов А. А. Управление грузовой и коммерческой работой на железнодорожном транспорте / А. А. Смехов, В. В. Повороженко, А. Т. Дерибас и др. ; под ред. А. А. Смехова. – М. : Транспорт, 1990. – 351 с.

7. Елисеев С. Ю. Логистическое управление грузовыми перевозками и терминально-складской деятельностью / С. Ю. Елисеев, В. М. Николашин.– М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. – 428 с.

8. Кудрявцев В. А. Основы эксплуатационной работы железных дорог / В. А. Кудрявцев, В. И. Ковалев, А. П. Кузнецов и др. ; под ред. В. А. Кудрявцева. – М. : Профобриздат, 2002. – 352 с.

9. Куренков П. В. Ситуационное управление перевозочным процессом / П. В. Куренков, В. П. Мохонько, В. С. Исаков // Транспорт : наука, техника, управление. – 2004. – № 11. – С. 14–16.

10. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте / под ред. В. И. Ковалева, А. Т. Осьминина. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2009. – 263 с.

11. Резер С. М. Комплексное управление перевозочными процессами в транспортных узлах / С. М. Резер. – М. : Транспорт, 1982. – 276 с.

12. Маликов О. Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок : монография / О. Б. Маликов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 536 с.

13. Числов О. Н. Теоретические основы рационального размещения элементов железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем : дис. ... докт. техн. наук, специальность : 05.22.01 / О. Н. Числов. – М. : МИИТ, 2009. – 369 с.

14. Балалаев А. С. Транспортно-грузовые системы железных дорог : учеб. пособие / А. С. Балалаев, И. А. Чернышова, А. Ю. Костенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 108 с.

15. Гаджинский А. М. Современный склад. Организация, технологии, управление и логистика / А. М. Гаджинский. – М. : ТК Велби ; Проспект, 2007. – 143 с.

16. Дыбская В. В. Управление складированием в цепях поставок / В. В. Дыбская. – М. : Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.

17. Милославская С. В. Мультимодальные и интермодальные перевозки : учеб. пособие / С. В. Милославская, К. И. Плужников. – М. : РосКонсульт, 1999. – 368 с.

18. Апатцев В. И. Логистические транспортно-грузовые системы : учебник / В. И. Апатцев, С. Б. Левин, В. М. Николашин и др. ; под ред. В. М. Николашина. – М. : Академия, 2003. – 304 с.

19. Прокофьева Т. А. Логистические центры в транспортной системе России : учеб. пособие /

Т. А. Прокофьева, В. И. Сергеев. – М. : Экономическая газета, 2012. – 522 с.

20. Бауэрсокс Д. Дж. Логистика : интегрированная цепь поставок / Д. Дж. Бауэрсокс, Д. Дж. Клос ; пер. с англ. – М. : Олимп-Бизнес, 2006. – 640 с.

21. Higgins C. D. An exploration of the Freight Village Concept and its applicability to Ontario / C. D. Higgins, M. R. Ferguson. – Hamilton : McMaster University, 2011. – 195 p.

22. Medda Fr. Classification of Container Ports on the Basis of Networks / Fr. Medda // Yong-An. – 12th WCTR, July 11–15, 2010. – Lisbon, Portugal, 2010. – P. 32–36.

23. Middendorf D. Intermodal terminals database : concepts, design, implementation and maintenance / D. Middendorf. – Washington, DC : Bureau of Transportation Statistics U. S. Department of Transportation, 1998. – 223 p.

24. Musso A. Progetto di Terminali ed Impianti di Trasporto. Ch. 2 / A. Musso. – Rome : Sapienza Università di Roma, 2010. – 210 p.

25. Notteboom T. Inland terminals within North American and European supply chains / T. Notteboom, J-P. Rodrigue // Transport and Communications. Bulletin for Asia and the Pacific. – 2009. – N 78. – P. 1–39.

26. Richards G. Warehouse management : a complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse / G. Richards. – London : Kogan Page Publ., 2011. – 334 p.

27. Rodrigue J.-P. The geography of transport systems. Ch. 5. International trade and freight distribution. – 3th ed. / J.-P. Rodrigue. – New York : Routledge, 2013. – 416 p.

28. Rushton A. The Handbook of logistics and distribution management / A. Rushton, Ph. Croucher, P. Baker. – London : Kogan Page Publ., 2010. – 226 p.

29. Маликов О. Б. Грузовые терминалы в системе организации поездопотоков / О. Б. Маликов // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 9. – С. 74–76.

30. Покровская О. Д. Логистические накопительно-распределительные центры как основа терминальной сети региона : монография / О. Д. Покровская. – Новосибирск : СИБПРИНТ, 2012. – 185 с.

31. Pokrovskaya O. D. Terminalistica as a new methodology for the study of transport and logistics systems of the regions / O. D. Pokrovskaya etc. // Sustainable economic development of regions: monograph, vol. 3 ; ed. by L. Shlossman. – Vienna : East West, 2014. – 261 p. (see p. 154–177).

32. Покровская О. Д. Инфраструктура международных транспортных коридоров / О. Д. Покровская, В. М. Самуйлов, А. Д. Неволина // Инновационный транспорт. – 2013. – № 3 (9). – С. 33–37.

33. Ермолаев К. Н. Экономика России : прошлое, настоящее, будущее / К. Н. Ермолаев, И. Д. Афанасенко, О. Д. Покровская, Т. А. Прокофьева и др. ; под общ. ред. Н. А. Адамова ; глава в колл. монографии. – М. : ИТКОР, 2014. – 248 с. (см. с. 116–143).

34. Покровская О. Д. Логистика терминалов : перспективное направление логистики / О. Д. Покровская, Е. К. Коровяковский // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 155–164.

35. Покровская О. Д. Организационно-технические решения при проектировании грузовых терминалов в составе международных транспортных коридоров / О. Д. Покровская, В. М. Самуйлов // Инновационный транспорт. – 2015. – № 4. – С. 13–24.

36. Покровская О. Д. Роль Новосибирского мультимодального транспортного узла в транспортно-логистическом кластере России / О. Д. Покровская, М. А. Зачешигрива // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 85–103.

References

1. Apattsev V. I., Efimenko Y. I., Pravdin N. V. et al. *Zheleznodorozhniye stantsii i uzly* [*Railway stations and junctions*]. Pod red. V. I. Apattseva, Y. I. Efimenko; eds by V. I. Apattsev, Y. I. Efimenko. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2014, 450 p. (In Russian)

2. Akulinichev V. M., Pravdin N. V., Bolotniy V. Y., Savchenko I. Y. *Zheleznodorozhniye stantsii i uzly* [*Railway stations and junctions*]. Pod red. V. M. Akulinicheva; ed. by V. M. Akulinichev. Moscow, Transport Publ., 1990. 480 p. (In Russian)

3. Pravdin N. V., Vakulenko S. P., Golovnich A. K. et al. *Proektirovaniye infrastruktury zheleznodorozh-*

nogo transporta (stantsii, *zheleznodorozhniye stantsii i uzly)* [*Engineering of railroad infrastructure (stations*, *railway junctions and transportation hubs)*].Pod red. N. V. Pravdina, S. P. Vakulenko. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2012, 1086 p. (In Russian)

4. Shubko V. G., Pravdin N. V., Arkhangelskiy Y. V., Bolotniy V. Y., Burakov V. A., Vakulenko S. P., Persianov V. A. *Zheleznodorozhniye stantsii i uzly* [*Railway stations and junctions*]. Pod red. V. G. Shubko, N. V. Pravdin. Moscow, Training Package of the RF Ministry of Railways Publ., 2002, 368 p. (In Russian)

5. Obraztsov V. N. *Izbranniye trudy.* V 3 t. [*Selected works*. In 3 vol.]. Ed. com. F. I. Shaulskiy et al. Moscow, The Academy of Sciences of the USSR Publ., 1955, 446 p. (In Russian)

6. Smekhov A. A., Povorozhenko V. V., Deribas A. T. et al. *Upravleniye gruzovoy i kommercheskoy rabotoy na zheleznodorozhnom transporte* [*Freight operation and commercial work administration in the rail sector*]. Ed. by A. A. Smekhov. Moscow, Transport Publ., 1990, 351 p. (In Russian)

7. Eliseyev S. Y. & Nikolashyn V. M. *Logisticheskoye upravleniye gruzovymy perevozkamy i terminalno-skladskoy deyatelnostyu* [*Logistical management of goods transportation and terminal warehouse operations*]. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2013, 428 p. (In Russian)

8. Kudryavtsev V. A., Kovalev V. I., Kuznetsov A. P. et al. *Osnovy ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog* [*Foundations of railroad service checks*]. Ed. by V. A. Kudryavtsev. Moscow, Profobrizdat Publ., 2002, 352 p. (In Russian)

9. Kurenkov P. V., Mokhonko V. P. & Isakov V. S. Situatsionnoye upravleniye perevozochnym protsessom [Situational management of transportation process]. *Transport: science*, *engineering*, *control*, 2004, no. 11, pp. 14–16. (In Russian)

10. *Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy na zheleznodorozhnom transporte* [*Railroad service checks management*]. Eds by V. I. Kovalev, A. T. Osminin. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2009, 263 p. (In Russian)

11. Rezer S. M. *Kompleksnoye upravleniye perevozochnymy protsessamy v transportnykh uzlakh* [*Integrated control of transportation processes in transportation hubs*]. Moscow, Transport Publ., 1982, 276 p. (In Russian)

12. Malikov O. B. *Perevozky i skladirovaniye tovarov v tsepyakh postavok:* monografiya [*Transportation and storage of goods in supply chains:* monograph]. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2014, 536 p. (In Russian)

13. Chislov O. N. *Teoreticheskiye osnovy ratsionalnogo razmeshcheniya elementov zheleznodorozhnykh promyshlennykh transportno-tekhnologicheskykh system* [*Theoretical foundations on rational distribution of elements of railroad industrial transport and technological systems*]: diss. D. Eng. Sci., specialty 05.22.01. Moscow, MIIT Publ., 2009, 369 p. (In Russian)

14. Balalaev A. S., Chernyshova I. A. & Kostenko A. Y. *Transportno-gruzoviye sistemy zheleznykh dorog::* ucheb. posobiye [*Railroad transportation and cargo systems*: tutorial]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2006, 108 p. (In Russian)

15. Gadzhynskiy A. M. *Sovremenniy sklad. Organizatsiya*, *tekhnologii*, *upravleniye i logistika* [*Modern goods depot. Organization*, *technologies*, *management and logistics*]. Moscow, TK Velby; Prospect Publ., 2007, 143 p. (In Russian)

16. Dybskaya V. V. *Upravleniye skladyrovaniyem v tsepyakh postavok* [*Storing management in supply chains*]. Moscow, Alpha-Press, 2009, 720 p. (In Russian)

17. Miloslavskaya S. V. & Pluzhnikov K. I. *Multimodalniye i intermodalniye perevozky:* ucheb. posobiye [*Multimodal and intermodal transport*: tutorial]. Moscow, RosKonsult Publ., 1999, 368 p. (In Russian)

18. Apattsev V. I., Levin S. B., Nikolashyn V. M. et al. *Logisticheskiye transportno-gruzoviye sistemy:* ucheb. posobiye [*Logistical transport and cargo systems*: tutorial]. Ed. by V. M. Nikolashin. Moscow, Academy Publ., 2003, 304 p. (In Russian)

19. Prokofiyeva T. A. & Sergeyev V. I. *Logisticheskiye tsentry v transportnoy sisteme Rossii:* ucheb. posobiye [*Logistical centers in the Russian transportation*

system: tutorial]. Moscow, Ekonomicheskaya gazeta [Economic journal] Publ., 2012, 522 p. (In Russian)

20. Bowersox D. J., Closs D. J. *Logistika: integrirovannaya tsep postavok* [*Logistical management. The integrated supply chain process*]. Moscow, Olimp-Business Publ., 2006, 640 p. (In Russian)

21. Higgins C. D. & Ferguson M. R. *An exploration of the Freight Village Concept and its applicability to Ontario.* Hamilton, McMaster University Press., 2011, 195 p.

22. Medda Fr. Classification of container ports on the basis of networks. *Yong-An. 12th WCTR*, July 11–15, 2010. Lisbon, Portugal, 2010, pp. 32–36.

23. Middendorf D. *Intermodal terminals database: concepts*, *design*, *implementation and maintenance.* Washington, DC, Bureau of Transportation Statistics U. S. Department of Transportation Press., 1998, 223 p.

24. Musso A. *Progetto di Terminali ed Impianti di Trasporto. Ch. 2.* Rome, Sapienza Università di Roma Press, 2010, 210 p.

25. Notteboom T. & Rodrigue J-P. Inland terminals within North American and European supply chains. *Transport and Communications. Bulletin for Asia and the Pacific*, 2009, no. 78, pp. 1–39.

26. Richards G. *Warehouse management: a complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse.* London, Kogan Page Publ., 2011, 334 p.

27. Rodrigue J.-P. *The geography of transport systems. Ch. 5. International trade and freight distribution.* 3th ed. New York, Routledge Press, 2013, 416 p.

28. Rushton A., Croucher Ph. & Baker P. *The handbook of logistics and distribution management.* London, Kogan Page Publ., 2010, 226 p.

29. Malykov O. B. Gruzoviye termynaly v systeme organizatsii poyezdopotokov [Freight terminals in train flows arrangement system]. *Railway transport*, 2011, no. 9, pp. 74–76. (In Russian)

30. Pokrovskaya O. D. *Logisticheskiye nakopitelno-raspredelitelniye tsentry kak osnova terminalnoy sety regiona:* monografia [*Logistical storage and distribution centers as the basis of the region's terminal network:* monograph]. Novosibirsk, SIBPRINT Publ., 2012, 185 p. (In Russian)

31. Pokrovskaya O. D. *Terminalistica as a new methodology for the study of transport and logistics systems of the regions. Sustainable economic development of regions:* monograph. Vol. 3. Ed. by L. Shlossman. Vienna, East West Press, 2014, 261 p. (see pp. 154–177).

32. Pokrovskaya O. D., Samuilov V. M. & Nevolina A. D. Infrastruktura mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Infrastructure of international transport corridors]. *Innovative transport*, 2013, no. 3 (9), pp. 33–37. (In Russian)

33. Ermolayaev K. N., Afanasenko I. D., Pokrovskaya O. D. et al. *Ekonomika Rossii: proshloye*, *nastoyashcheye*, *budushcheye* [*Russian economy: past*, *present*, *future*]. Under the general editorship of N. A. Adamov. Moscow, ITKOR Publ., 2014, 248 p. (see pp. 116–143). (In Russian)

34. Pokrovskaya O. D. & Korovyakovskiy Y. K. Logistika terminalov: perspektivnoye napravleniye logistiky [Logistics of terminals: perspective trend of logistics]. *Proceedings of Petersburg State Transport University.* Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, no. 3 (44), pp. 155–164. (In Russian)

35. Pokrovskaya O. D. & Samuilov V. M. Organizatsiono-tekhnicheskiye resheniya pry proektirovanii gruzovykh terminalov v sostave mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Organizational and technical solutions in the design of cargo terminals as part of international transport corridors]. *Innovative transport*, 2015, no. 4, pp. 13–24. (In Russian)

36. Pokrovskaya O. D. & Zacheshigriva M. A. Rol Novosibirskogo multimodalnogo transportnogo uzla v transportno-logistichekom klastere Rossii [The role of Novosibirsk multimodal transportation hub in the logistical cluster of Russia]. *Proceedings of Petersburg State Transport University.* Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, no. 3 (44), pp. 85–103. (In Russian)

ТИТОВА Тамила Семеновна – д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой, проректор; *ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент, insight1986@inbox. ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.21/.8

А. А. Белый, Э. С. Карапетов, Е. С. Цыганкова

РАЗВИТИЕ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ВРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК НА ПРИМЕРЕ ПАРКА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Дата поступления: 12.02.2018
Решение о публикации: 18.06.2018

Аннотация

Цель: Анализ и освещение статистических данных, касающихся развития и применения временных нагрузок и соответствующих норм проектирования на примере мостовых сооружений Санкт-Петербурга. **Методы:** Всесторонний трехэтапный (трехступенчатый) анализ технической документации по эксплуатируемым железобетонным мостовым сооружениям города; историко-технический обзор норм и технических условий проектирования, начиная с конца XIX в.; систематизация, статистический анализ, разбиение на этапы и группы. **Результаты:** Представлено развитие норм проектирования и временных нагрузок железобетонных автодорожных мостов. Статистика выполнена на базе парка мостов Санкт-Петербурга, отличающегося как повышенными эстетическими, так и сложными техническими особенностями эксплуатации. Выполнена квалификация временных нагрузок, действовавших на сооружения Санкт-Петербурга, начиная с 1891 г. Проанализированы этапы возникновения и формирования норм обращающейся нагрузки. Выделена определенная особенность в нормировании требований к городским мостам. Приведены примеры соответствующих объектов. Сделан ряд выводов относительно эволюции норм проектирования. **Практическая значимость:** С учетом специфики крупного мегаполиса управление техническим состоянием мостовых сооружений в Санкт-Петербурге представляет собой чрезвычайно ответственную и сложную задачу. Для ее решения необходимы достоверные, точные и актуальные сведения по истории проектирования объектов, обращающейся нагрузки (как проектной, так и текущей). Для использования в практике эксплуатации железобетонных мостовых сооружений как наиболее массовых объектов транспортной инфраструктуры города выполнен статистический анализ. С практической точки зрения эти сведения позволят с достаточной долей вероятности обеспечить и поддерживать заданные нормативные (проектные) уровни надежности, безопасности и долговечности мостовых сооружений.

Ключевые слова: Железобетонные мосты, нормы проектирования, временная нагрузка, управление техническим состоянием, статистика обращающейся нагрузки.

***Andrei A. Belyi,** Cand. Eng. Sci., associate professor, andbeliy@mail.ru; **Eduard S. Karapetov,** Cand. Eng. Sci., professor, eskar@yandex.ru; **Ekaterina S. Tsygankova,** postgraduate student, engineer, rino4ka5@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) DESIGN NORMS

AND LIVE LOAD DEVELOPMENT BY THE EXAMPLE OF SAINT PETERSBURG DEPOT OF REINFORCED CONCRETE AUTOMOBILE ROAD BRIDGES

Summary

Objective: To analyze and cover the statistical data concerning the development and application of live load and relevant design standards by the example of Saint Petersburg bridge constructions. **Methods:** A comprehensive three-stage analysis of technical documentation on the operated reinforced concrete bridge constructions of the city was applied. Historical and technical review of norms and specifications of design, since the end of the 19th century was conducted. Systematization, statistical analysis and splitting into stages and groups were carried out. **Results:** The article presents the development of design standards and temporary loads of reinforced concrete highway bridges. The statistics is made on the basis of the depot of Saint Petersburg bridges. The latter is characterized by the increased esthetic, and difficult technical operation features. Classification of temporary loads on structures of Saint Petersburg since 1891 was carried out. The stages of occurrence and formation of circulating load norms were analyzed. A certain feature in regulation of requirements for urban bridges was singled out. Examples of the relevant objects were given. A number of conclusions concerning the evolution of design standards were made. **Practical importance:** Taking into account the specificity of the large megalopolis, management of technical condition of bridge constructions in Saint Petersburg represents an extremely responsible and difficult task. Authentic, exact and relevant data on the history of design of facilities, circulating load (both design and current) is necessary for the solution of the task in question. Statistical analysis was carried out to apply operation of reinforced concrete bridge constructions in practice as the most mass transportation facilities of the city. From a practical point of view the data in question will make it possible to provide and support the set standard (design) levels of reliability, safety and durability of bridge constructions with a sufficient share of probability.

Keywords: Reinforced concrete bridges, design standards, mobile load, technical condition management, circulating load statistics.

Введение

История мостостроения в городе на Неве характеризует Санкт-Петербург как динамично развивающийся мегаполис (как в понимании XX–XIX вв., так и в современной терминологии), расположенный на территории с обширным количеством естественных водных преград [1]. Несмотря на то, что в XX в. большое количество водотоков было засыпано или ликвидировано, в настоящее время более 70 рек, каналов и артерий пересекают город в разных направлениях [2]. Это предопределило появление и стремительное развитие в городе мостовых сооружений практически всех существующих типов и исполнений (по материалу, статической схеме и др.).

Таким образом, современное мостовое хозяйство Санкт-Петербурга характеризуется наличием различных искусственных дорожных сооружений. Как было установлено авторами ранее [3–5], преобладают железобетонные мосты и путепроводы (свыше 50 % от общего числа, всего около 300 внутригородских[1]).

Санкт-Петербургские железобетонные мостовые сооружения исчисляют свою «жизнь» с начала XX в., с момента появления, а затем и развития автомобильного транспорта в России. Возраст некоторых из них приближается и даже превысил 100 лет.

Естественно, что в начале прошлого века временные нагрузки, действовавшие на сооружения, были несравненно меньше современных.

[1] Имеются ввиду «внутригородские» объекты на дорогах общего пользования, без учета сооружений, расположенных на магистралях КАД и ЗСД, запроектированных по специальным техническим условиям.

До конца XIX в. мостовые сооружения обычно рассчитывались на отдельные, интуитивно принятые нагрузки, руководствуясь рекомендациями инженеров-практиков, авторов книг по мостам и т. п., либо на так называемые «испытательные нагрузки», принимаемые при заключении контракта на их строительство. Первые официальные расчетные нагрузки на безрельсовые мосты (шоссейные мосты, мосты под обыкновенную дорогу, как тогда их называли) были приняты согласно циркуляру № 18 от 2 января 1891 г. Департамента шоссейных и водяных дорог в виде конных фур весом 8,2 т и толпы людей интенсивностью 450 кг/м^2 (как в сочетании с фурами, так и без них). В последующих нормативных документах 1906 и 1910 гг. при проектировании мостов в качестве эксплуатационных нагрузок принимались конные фуры, паровые катки с различными весовыми характеристиками, а также толпы людей.

В связи с появлением в начале XX в. на улицах городов и загородных дорогах страны автомобилей и увеличением их количества мосты с 1913 г. стали рассчитывать на комбинацию автомобильной с другими нагрузками (фурами, паровыми катками, толпой и др.), а мосты стали называть автогужевыми. В качестве автомобильной нагрузки впервые были приняты колонны 9-тонных грузовиков, которые загружались в виде двух встречных рядов со сближенной установкой в каждом ряду трех грузовиков.

По мере развития и утяжеления автотранспортных средств, увеличения их габаритных размеров, появления специальных тяжелых нагрузок нормы временных подвижных нагрузок на автодорожные и городские мосты неоднократно пересматривались и менялись. При этом следует отметить, что эволюция нагрузок протекала плавно, но с тенденцией постоянного их возрастания. Наиболее существенные изменения в нормативных временных подвижных нагрузках в XX в. произошли с 30-х по 60-е годы, а после перехода в 1962 г. на расчет мостов по методу предельных состояний – в 60–80-е годы. Более подробно соответствующая информация изложена в [6].

Известно, что вопросами этапизации и классификации нагрузок, изменявшихся за более чем 100-летний срок, занимались ученые в нашей стране. При этом уделялось внимание как «эволюционной» составляющей, так и прогнозированию тенденций в данной сфере (см., например, работы [6–18]). Однако следует отметить, что первоначальная полноценная классификация дана еще в нормативном документе ВСН 32–78 [19], выполненная для достоверной оценки грузоподъемности балочных пролетных строений автодорожных мостов так называемым способом «по нормам проектирования».

Итогом настоящего исследования стали уточненная классификация и разбивка на этапы временных нагрузок, действовавших на сооружения Санкт-Петербурга, начиная с 1891 г. Данные получены в результате анализа работ [6–19] и архивных материалов старейшей специализированной эксплуатирующей организации страны – СПб ГБУ «Мостотрест» [20, 21].

Результаты

На рис. 1 приведены классификация и разбивка на этапы действовавших на мостовые сооружения временных нагрузок.

Период с 1875 по 1930 г. являлся начальным этапом в становлении и формировании требований и правил к нормированию обращающейся нагрузки. Для него характерны определенная разрозненность, противоречивость, а также то, что требования отличались от региона к региону.

С 1930-х годов были введены нормы, согласно которым для расчета искусственных сооружений принималась нагрузка в зависимости от класса и назначения дороги. Очередное изменение произошло в 1986 г., когда появилась новая автомобильная нагрузка по схеме АК (нагрузка автомобильная, где К – класс нагрузки). Дальнейшее обновление

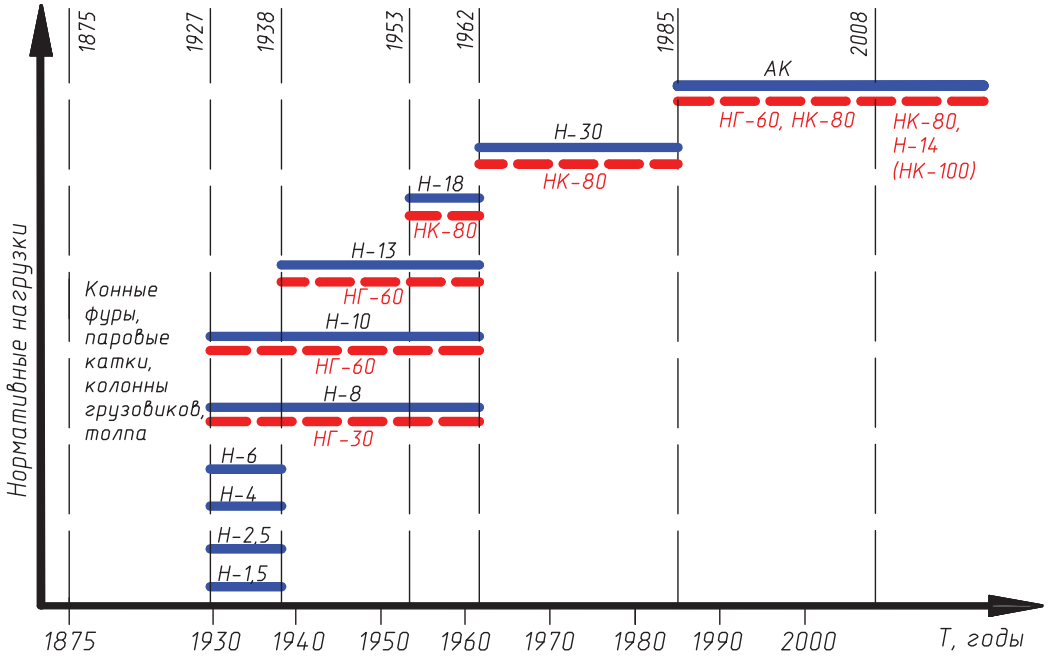


Рис. 1. Нормативные нагрузки на отечественные автодорожные мосты

ТАБЛИЦА 1. Поэтапная классификация временных нагрузок для объектов Санкт-Петербурга

Год введения или издания норм	Наименование нормативного документа	Издающая организация	Основные расчетные параметры	Период применения норм (в части нагрузок)	Примечание
1891	Циркуляр № 18 от 02.01.1891 г.	Департамент шоссейных и водяных дорог	Конные фуры весом 8,2 т, пешеходная нагрузка 440 кг/м	1902–1906	
1906	Технические условия для ремонта мостов г. Петербурга	Городское управление г. Петербурга	Конные фуры весом 22 т (капитальные и каменные мосты) и 10,5 т (деревянные и временные); вес от толпы – 530 и 440 кг/м соответственно; паровой каток весом 15 т	1906–1913	
1910	Технические условия от 18.11.1910 г.	Институт инженеров путей сообщения	То же, что и в предшествующий период, но введен коэффициент, динамики, $K_d = (1 + \mu)$	1910–1913	
1911	Приказ № 51 от 2.03.1911 г.	Министерство путей сообщения (МПС)			

Продолжение табл. 1

Год введения или издания норм	Наименование нормативного документа	Издающая организация	Основные расчетные параметры	Период применения норм (в части нагрузок)	Примечание
1913	Приказ № 96 от 1913 г.	МПС	Колонны грузовиков весом по 9 т (два встречных ряда автомобилей; три автомобиля в каждом ряду сближены); паровые катки 15 и 12 т; интенсивность толпы 530 и 440 кг/м	1913–1922	
1922	Приказ № 3925 от 08.11.1922 г.	Народный комиссариат путей сообщения (НКПС)	Колонна грузовиков весом 10, 7 и 4 т соответственно для массивных, деревянных и наплавных мостов; катки 15, 9 и 3 т; нагрузка от толпы – 400 кг/м	1922–1927	
1926	Временные технические условия и нормы проектирования железобетонных сооружений	Госплан СССР и НКПС	8 классов Н1–Н8 (от 1 до 8 т), нагрузка от толпы $q_т$ = 400–200 кг/м	1927–1931	
1927	Нормы мостов под обыкновенную дорогу 22.07.1927 г.	НКПС			
1931	Технические условия, правила и нормы проектирования, изыскания, постройки, ремонта и содержания автогужевых дорог и мостовых сооружений 1931 г.	ЦУДОРТРАНС НКПС	Временные нагрузки – колонны автомобилей, классы Н10, Н8, Н6, Н4, Н2,5, Н1,5 (2 полосы распределенной нагрузки); трактор Т20; $q_т$ = 400–100 кг/м	1931–1938	
1938	Технические условия на сооружение автомобильных дорог и мостов 1.02.1938 г.	Гушосдор НКВД	Временные нагрузки – колонны автомобилей, классы Н13, Н10, Н8; трактор Т60 и Т25; $q_т$ = 400–300 кг/м	1938–1943	

Продолжение табл. 1

Год введения или издания норм	Наименование нормативного документа	Издающая организация	Основные расчетные параметры	Период применения норм (в части нагрузок)	Примечание
1943	Технические условия на проектирование искусственных сооружений на автодорогах 3.03.1943 г.	Гушосдор НКВД	То же, что и в предшествующий период, за исключением класса Н13	1943–1948	Действовали во время Великой Отечественной войны
1948	Правила и указания по проектированию железобетонных, металлических, бетонных и каменных искусственных сооружений на автомобильных дорогах	Гушосдор МВД	Временные нагрузки – колонны автомобилей, классы Н13, Н10, Н8; гусеничная нагрузка НГ60 и НГ30; трамвайная нагрузка Т-13 и Т-11; $q_т$ = 500–400 кг/м	1948–1953	
1948	Технические условия и нормы проектирования искусственных сооружений на городских путях сообщения	Министерство коммунального хозяйства РСФСР	Временные нагрузки – колонны автомобилей, классы Н13, Н10, Н8; гусеничная нагрузка НГ60 и НГ30; трамвайная нагрузка Т-13 и Т-11; $q_т$ = 500–400 кг/м	1948–1953	Для городов
1953	Нормы подвижных вертикальных нагрузок для расчета искусственных сооружений на авто Н106-53, 1.04.1953 г.	Госстрой СССР	То же, что и в предшествующий период + Н18; специальная нагрузка НК-80	1953–1962	
1962	Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб СН 200-62	МПС	Н30 и НК-80 для капитальных мостов, Н10 и НГ60 – для временных; $q_т$ = 400 кг/м	1962–1984	

Окончание табл. 1

Год введения или издания норм	Наименование нормативного документа	Издающая организация	Основные расчетные параметры	Период применения норм (в части нагрузок)	Примечание
1984	СНиП 2.05.03–84 «Мосты и трубы»	Госстрой СССР	А11 и НК-80 для капитальных мостов, А8 и НГ60 – для временных мостов; вагон метро – общий вес 60 т с давлением на ось 15 т; трамвай – вес вагона 30 т с давлением на ось 7,5 т; $q_т = 400 – 2\lambda$ кг/м	1984-…	Переиздан с корректировками в 1991 г.
1999	МГСН 2.05.99 «Проектирование городских мостовых сооружений»	Правительство Москвы	То же + А14 и НК-176	1999–…	На территории Москвы
2002	СНиП 32-5-2002 «Мосты и трубы. Проектирование, строительство и приемка в эксплуатацию» (проект)		Н14 (НК-100), А14		Не был утвержден
2007	ГОСТ Р 52748–2007 «Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения»	Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии	А14 и Н14 (НК-100,8) для всех, кроме деревянных; для последних – А11 и Н-11 (НК-80)	2008–…	
2011	СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы». Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*	Министерство регионального развития РФ	А14 и НК-100 (100,8) для всех, кроме деревянных; для последних – А11 и НК-80	2011–…	
2017	СП 259.1325800. 2016 «Мосты в условиях плотной городской застройки. Правила проектирования»	Минстрой РФ	А14 и Н14 для магистральных улиц; А8 и Н8 для местных улиц; А5 и Н5 для пешеходных зон	2017–…	Для городов с населением 500 тыс. человек и более

норм предусматривало увеличение нагрузок вследствие интеграции экономики во Всемирную Торговую Организацию (ВТО) и процесса глобализации [6, 8].

Этапы развития временных нагрузок целостно можно представить в виде таблицы. Так, в табл. 1 зафиксирована хронология для условий Санкт-Петербурга.

Следующим этапом анализа явилось изучение проектной и/или исполнительной документации по построенным (реконструированным) объектам города, расположенным на дорогах общего пользования. Всего подобных мостовых сооружений в Санкт-Петербурге, выполненных из железобетона, около 300. По некоторым из них полностью отсутствует какая-либо информация, часть находится в стадии ремонта или реконструкции. По этим причинам для «чистоты эксперимента» подобные объекты были выведены из такой ступени исследования, и в конечном итоге в табл. 2, отражающей данные по абсолютному и относительному распределению железобетонных мостовых сооружений по нормам проектирования, их сумма составляет 269 шт. Для наглядности данные табл. 2 графически отображены на рис. 2.

Таким образом, доля условно «современных» объектов, запроектированных под нагрузки А11 и более поздние, составляет менее 10% от общего числа рассматриваемых сооружений.

Использование табл. 1 и 2 позволяет выполнить и представить еще одно распределение, целью которого является соотношение количества объектов от норм проектирования. Результат данной ступени анализа приведен в табл. 3 и на рис. 3.

Порядка 40% сооружений запроектированы под нормы ранее 1962 г. (СН 200–62), когда произошел один из ключевых моментов в принципах расчета мостовых сооружений – от метода расчета по допускаемым напряжениям перешли к методу расчета по предельным состояниям.

На рис. 3 видно, что в парке мостов присутствует ряд «объектов-долгожителей». Например, до сих пор эксплуатируется Большой Ильинский мост через Охту постройки 1912 г., спроектированный по техническим условиям 1906 г. под конные фуры и паровые катки (рис. 4).

Сохранилось еще несколько мостов постройки 20-х–30-х годов XX в., исполненных по нормам 1922 г. (рис. 5).

Вместе с тем можно упомянуть мосты постройки 30-х–70-х годов XX в.: Володарский мост, мост Александра Невского, малые мосты, например через р. Лубья (Малый Ильинский мост и ему подобные в районе Ржевка–

ТАБЛИЦА 2. Распределение железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга по проектным нагрузкам

Нагрузка	Количество сооружений	Нагрузки	Количество сооружений	Сумма	Доля в общем количестве, %
А11	2	А11 НК-80	23	25	9,29
Н30	27	Н30 НК-80	109	136	50,56
Н18	15	Н18 НК 80	28	43	15,99
Н13	5	Н13 НГ60 (Т60)	12	17	6,32
Н10	18	Н10 НГ60 (Т60)	22	40	14,87
Н8	3	Н8 Т60	1	4	1,49
Колонны грузовиков (нормы 1913 и 1922 гг.)				3	1,12
Конные фуры (нормы 1891, 1906 и 1910 гг.)				1	0,36
				269	100,00

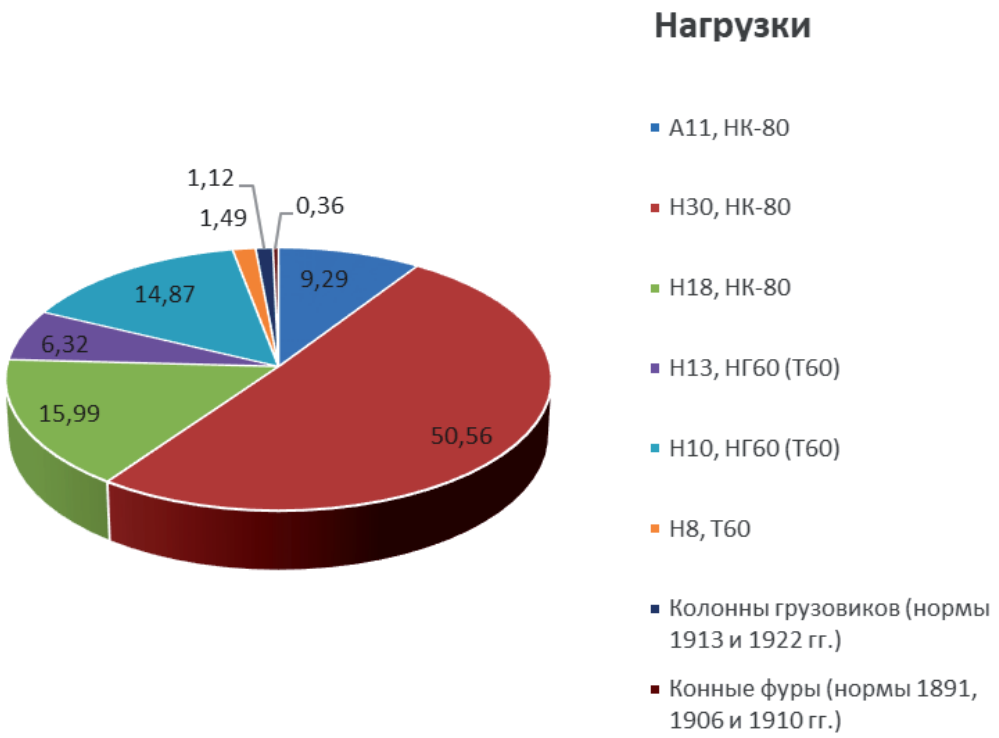


Рис. 2. Распределение сооружений по проектным нагрузкам

ТАБЛИЦА 3. Распределение сооружений по нормам проектирования

Норма	Циркуляр № 18	ТУ 1906 г.	ТУ 1910 г., Приказ № 51	Приказ № 96	Приказ № 3925	ТУ 1926 (1927) г.	ТУ 1931 г.	ТУ 1938 г.	ТУ 1943 г.	Правила 1948 г.	Н 106–53	СН 200–62 и СН 365–67	СНИиП 2.05.03–84 и более поздние документы
Год издания	1891	1906	1910 (1911)	1913	1922	1926 (1927)	1931	1938	1943	1948	1953	1962 (1967)	1984
Период действия	1902–1906	1906–1913	1910–1913	1913–1922	1922–1927	1927–1931	1931–1938	1938–1943	1943–1948	1948–1953	1953–1962	1962–1984	1984–настоящее время
Количество сооружений	0	1	0	0	3	2	8	4	6	33	47	140	25
Доля в общем количестве	0,00	0,37	0,00	0,00	1,12	0,74	2,97	1,49	2,23	12,27	17,47	52,04	9,29

Рис. 3. Распределение сооружений по нормам проектирования

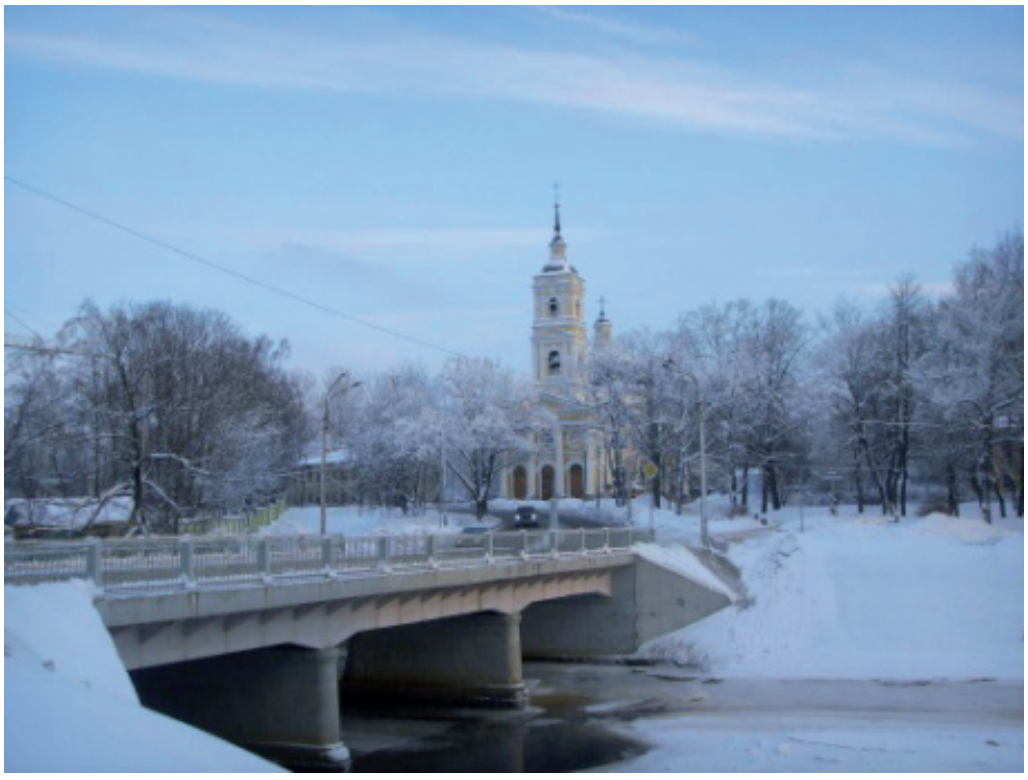


Рис. 4. Общий вид Большого Ильинского моста через р. Охта в Санкт-Петербурге

Пороховые), которые не выдержали роста нагрузки и интенсивности движения. Упомянутые сооружения через 30–50 лет эксплуатации были реконструированы, усилены или сняты с эксплуатации [22]. Одной из возможных причин снижения срока службы сооружений

Рис. 5. Общий вид Архангелогородского (ныне Шлиссельбургского) моста через Обводный канал в Санкт-Петербурге

можно считать не совсем грамотный подход к назначению временных расчетных нагрузок в процессе их эволюционных изменений в городской среде.

Чтобы не вводить читателя в заблуждение и во избежание возникновения вопросов по поводу возможности эксплуатации сооружений старых лет проектировки под современные нагрузки (см. рис. 4, 5), отметим следующее. Мосты, которые приведены в качестве примера, и другие подобные сооружения Санкт-Петербурга в разные годы были реконструированы или усилены с сохранением первоначального внешнего вида. Их современное техническое состояние в целом отвечает требованиям по безопасности и грузоподъемности.

Заключение

Уточненная классификация и разбивка на этапы временных нагрузок, действовавших на сооружения Санкт-Петербурга, способствуют дальнейшему развитию нормирования основных проектных положений транспортных сооружений. Этапы формирования расчетных нагрузок показывают величину грузоподъемности городских мостов и позволяют сделать вывод о возможности их дальнейшей несущей способности.

В статье представлена статистика, касающаяся норм проектирования и обращающихся нагрузок на автодорожные железобетонные мостовые сооружения Санкт-Петербурга. Проиллюстрированы этапы развития указанных норм, приведены распределения как в абсолютном, так и относительном формате. Отмечена определенная специфика в нормировании требований к городским мостам на первых этапах их эксплуатации. Приведены конкретные примеры объектов. Изложенные в статье данные могут быть полезны специалистам в области управления техническим состоянием мостов, а также дают статистический материал для широкого круга исследователей.

По нашему мнению, в настоящий момент назрела необходимость перехода к нагрузкам, учитывающим длину загружения линии влияния. Данные нагрузки уже имеют широкую апробацию за рубежом. Основное их достоинство – возможность более точного использования свойств материалов, а также учета фактического воздействия транспортных средств и пешеходов на элементы мостов.

Библиографический список

1. Богданов Г. И. Петербургские мосты : монография / Г. И. Богданов. – СПб. : Изд-во «Белое и черное», 2006. – 183 с.

2. Богданов Г. И. В гранит оделася Нева, мосты повисли над водами… : монография / Г. И. Богданов, В. И. Ярохно. – СПб. : Голанд, 2009. – 174 с.

3. Карапетов Э. С. Эксплуатационное состояние железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга / Э. С. Карапетов, А. А. Белый // Сб. трудов «125 лет в мостостроении». – СПб. : ПГУПС, 2008. – С. 62–68.

4. Белый А. А. Способ оценки технического состояния железобетонных мостов и путепроводов Санкт-Петербурга / А. А. Белый // Транспортное строительство. – 2009. – № 6. – С. 10–13.

5. Белый А. А. Анализ технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга / А. А. Белый // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – Белгород : РИЦ БГТУ им. В. Г. Шухова, 2017. – № 3. – С. 37–44. DOI : 10.12737/24624

6. Карапетов Э. С. Содержание и реконструкция городских транспортных сооружений : учеб. пособие / Э. С. Карапетов, В. Н. Мячин, Ю. С. Фролов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. – 300 с.

7. Боханова С. В. Нормативные нагрузки от сверхтяжелых автотранспортных средств / С. В. Боханова // Вопросы нормирования потребительских свойств мостов / под ред. А. И. Васильева. – М. : ОАО «ЦНИИС», 2002. – С. 24–28.

8. Овчинников И. Г. История развития Российских норм проектирования мостов : учеб. пособие / И. Г. Овчинников, П. П. Ефимов, И. И. Овчинников. – Саратов : СГТУ, 2004. – 96 с.

9. Боханова С. В. Необходимость введения на мостах нормативных нагрузок, отвечающих современным темпам развития автомобильной промышленности / С. В. Боханова // Науч. труды ОАО «ЦНИИС». – М. : ОАО «ЦНИИС», 2005. – Вып. 226. – С. 45–48.

10. Васильев А. И. Вероятностный подход к нормированию автомобильных нагрузок на мосты / А. И. Васильев, Нгуен Вьет Фыонг // Транспортное строительство. – 2011. – № 8. – С. 30–31.

11. Саламахин П. М. Недостатки действующих нормативных вертикальных временных нагрузок на автодорожные мостовые сооружения / П. М. Саламахин // Транспортное строительство. – 2012. – № 11. – С. 28–32.

12. Васильев А. И. Нормы нагрузок на мосты от автотранспортных средств общего пользования / А. И. Васильев, Ю. М. Егорушкин, Н. В. Илюшин // Транспортное строительство. – 2014. – № 4. – С. 12–14.

13. Нигаматова О. И. Системы управления состоянием мостовых сооружений / О. И. Нигаматова, И. Г. Овчинников // Интернет-журн. «Науковедение». – 2015. – Т. 7, № 3. – URL : http://naukovedenie.ru/PDF/09TVN315.pdf (дата обращения : 08.02.2018). DOI : 10.15862/09TVN315

14. Саламахин П. М. Требования к нормам на вертикальные нагрузки на мостовые сооружения / П. М. Саламахин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2015. – № 1 (71). – С. 24–26.

15. Бокарев С. А. Влияние тяжеловесного движения на искусственные сооружения / С. А. Бокарев, Ю. Н. Мурованный, А. М. Усольцев // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 4. – С. 25–28.

16. Быстров В. А. Качество и инновационность проектирования – пути управления безопасностью городских надземных и подземных транспортных сооружений / В. А. Быстров, Г. А. Ярошутин // Вестн. гражданских инженеров. – 2016. – № 6 (59). – С. 168–172.

17. Москвич В. К. Анализ актуальности и проблем оценки состояния мостовых сооружений / В. К. Москвич, М. В. Нененко // Науч. журн. строительства и архитектуры. – 2016. – № 3 (43). – С. 68–75.

18. Антонюк А. А. Принципы информационного моделирования транспортных сооружений / А. А. Антонюк, С. В. Чижов // Интернет-журн. «Науковеде-

ние». – 2017. – Т. 9, № 3. – URL : http://naukovedenie.ru/PDF/70TVN317.pdf (дата обращения : 08.02.2018).

19. Инструкция по определению грузоподъемности железобетонных балочных пролетных строений автодорожных мостов. ВСН 32–78. – Минавтодор РСФСР. – М. : Транспорт, 1979. – 142 с.

20. Карапетов Э. С. История развития мостового хозяйства Санкт-Петербурга. Проблемы эксплуатации городских мостовых сооружений : учеб. пособие / Э. С. Карапетов, А. А. Белый. – СПб. : ООО «Центр техн. информации „ТехИнформ“», 2010. – 32 с.

21. Петров Д. Ю. СПб ГУП «Мостотрест» : 80 лет безупречной работы / Д. Ю. Петров, А. А. Белый // Дороги. Инновации в строительстве. – 2012. – № 19. – СПб. : ООО «Центр техн. информации „ТехИнформ“», 2012. – С. 34–36.

22. Белый А. А. Опыт обследования усиленных и реконструированных мостовых объектов Санкт-Петербурга / А. А. Белый, Э. С. Карапетов // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : материалы VIII Междунар. науч.-практич. конференции. 13 октября 2017 г. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – С. 13–20.

References

1. Bogdanov G. I. *Peterburgskiye mosty:* monografiya [*Bridges of Saint Petersburg:* monograph]. Saint Petersburg, “Beloye i chernoye” Publ., 2006, 183 p. (In Russian)

2. Bogdanov G. I. & Yarokhno V. I. *V granit odelasya Neva*, *mosty povisly nad vodamy…*: monografiya. Saint Petersburg, Holand Publ., 2009, 174 p. (In Russian)

3. Karapetov E. S. & Beliy A. A. Ekspluatatsionnoye sostoyaniye zhelezobetonnykh mostovykh sooruzheniy Sankt Peterburga [Operation state of Saint Petersburg ferroconcrete bridgework]. *Sbornik trudov “125 let v mostostroenii”* [*Coll. papers “125 years in bridge building”*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2008, pp. 62–68. (In Russian)

4. Beliy A. A. Sposob otsenky tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh mostov i puteprovodov Sankt Peterburga [Estimation method of technical state of ferroconcrete bridges and overbridges of Saint Petersburg]. *Transport construction*, 2009, no. 6, pp. 10–13. (In Russian)

5. Beliy A. A. Analyz tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh zhelezobetonnykh mostovykh sooruzheniy Sankt Peterburga [Technical state analysis of Saint Petersburg ferroconcrete bridgework in operation]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [*Bull. of BSTU named after V. G. Shukhov*], 2017, no. 3, pp. 37– 44. Belgorod, RITs [Regional Information Centre] of BSTU named after V. G. Shukhov, 2017. DOI: 10.12737/24624

6. Karapetov E. S., Myachin V. N. & Frolov Y. S. *Soderzhaniye i rekonstruktsiya gorodskykh transportnykh sooruzheniy:* ucheb. posobiye [*Maintenance and reconstruction of urban transport works*: tutorial]. Moscow, Learning and teaching educational centre of railway transport Publ., 2013, 300 p. (In Russian)

7. Bokhanova S. V. Normativniye nagruzky ot sverkhtyazhelykh avtotransportnykh sredstv [Characteristic loads from superheavy motor vehicles]. *Voprosy normirovaniya potrebitelskykh svoistv mostov* [*The issues of useful quality standardization of bridges*]. Ed. by A. I. Vasiliyev. Moscow, OAO “TsNIIS” [Central Scientific Research Institute of Construction], 2002, pp. 24–28. (In Russian)

8. Ovchinnikov I. G., Efimov P. P. & Ovchinnikov I. I. *Istoriya razvitiya Rossiyskykh norm proektirovaniya mostov:* ucheb. posobiye [*Design standards of bridges in Russia: the history of development*: tutorial]. Saratov, SSTU Publ., 2004, 96 p. (In Russian)

9. Bokhanova S. V. Neobkhodimost vvedeniya na mostakh normativnykh nagruzok, otvechayushchym sovremennym tempam razvitiya avtomobilnoy promyshlennosty [The necessity to introduce characteristic loads on bridges, that meet modern development rates of motor-car industry]. *Nauch. Trudy OAO “TsNIIS”* [*Coll. papers OAO “TsNIIS”*]. Moscow, OAO “TsNIIS” [Central Scientific Research Institute of Construction] Publ., 2005, issue 226, pp. 45–48. (In Russian)

10. Vasilyev A. I. & Nguyen Vyet Fyong. Veroyatnostniy podkhod k normirovaniyu avtomobilnykh nagruzok na mosty [Probabilistic approach to standardization of vehicle loads on bridges]. *Transport construction*, 2011, no. 8, pp. 30–31. (In Russian)

11. Salamakhyn P. M. Nedostatky deistvuyushchykh normativnykh vertikalnykh vremennykh nagruzok na avtodorozhniye mostoviye sooruzheniya [Drawbacks of real characteristic vertical live loads on motor vehicle bridgeworks]. *Transport construction*, 2012, no. 11, pp. 28–32. (In Russian)

12. Vasiliyev A. I., Yegorushkyn Y. M. & Ilyushyn N. V. Normy nagruzok na mosty ot avtotransportnykh sredstv obshchego polzovaniya [Bridge loading norms for public motor vehicles]. *Transport construction*, 2014, no. 4, pp. 12–14. (In Russian)

13. Nigmatova O. I. & Ovchinnikov I. G. Sistemy upravleniya sostoyaniyem mostovykh sooruzheniy [Bridgework condition management systems]. *Internet-zhurnal "Naukovedeniye"* [*Online magazine "Science of Science"*], 2015, vol. 7, no. 3. URL: http://naukovedenie.ru/PDF/09TVN315.pdf (accessed: 08.02.2018). DOI: 10.15862/09TVN315

14. Salamakhyn P. M. Trebovaniya k normam na vertikalniye nagruzky na mostoviye sooruzheniya [Requirements to norms on vertical loads for bridgeworks]. *Science and engineering in road industry*, 2015, no. 1 (71), pp. 24–26. (In Russian)

15. Bokarev S. A., Murovanniy Y. N., Usoltsev A. M. Vliyaniye tyazhelovesnogo dvizheniya na iskusstvenniye sooruzheniya [The influence of heavyweight traffic on engineering structures]. *Railroad transport*, 2016, no. 4, pp. 25–28. (In Russian)

16. Bystrov V. A. & Yaroshutyn G. A. Kachestvo i innovatsionnost proektirovaniya – puty upravleniya bezopasnostyu gorodskykh nadzemnykh i podzemnykh transportnykh sooruzheniy [Design quality and innovation – the ways of safety management of urban above ground and underground transport works]. *Bulletin of civil engineers*, 2016, no. 6 (59), pp. 168–172. (In Russian)

17. Moskvich V. K. & Nenenko M. V. Analyz aktualnosty i problem otsenky sostoyaniya mostovykh sooruzheniy [Bridgeworks: the analysis of relevance and problems of state assessment]. *Engineering and Architecture Science Journal*, 2016, no. 3 (43), pp. 68–75. (In Russian)

18. Antonyuk A. A. & Chyzhov S. V. Printsypy informatsionnogo modelirovaniya transportnykh sooruzheniy [Information modeling principles for transport works]. *Internet-zhurnal "Naukovedeniye"* [*Online magazine "Science of Science"*], 2017, vol. 9, no. 3. URL: http://naukovedenie.ru/PDF/70TVN317.pdf (accessed: 08.02.2018).

19. *Instruktsiya po opredeleniyu gruzopodyemnosty zhelezobetonnykh balochnykh proletnykh stroyeniy avtodorozhnykh mostov. VSN 32–78* [*Instruction on bearing ratio test of ferroconcrete girders of highway bridges. Branch Construction Norms 32–78*]. The RSFSR Minavtodor. Moscow, Transport Publ., 1979, 142 p. (In Russian)

20. Karapetov E. S. & Beliy A. A. *Istoriya razvitiya mostovogo khozyaistva Sankt Peterburga. Problemy ekspluatatsii gorodskykh mostovykh sooruzheniy:* ucheb. posobiye [*The history of development of bridge facilities in Saint Petersburg. Operation problems of urban bridgeworks*: tutorial]. Saint Petersburg, OOO "Technical information center "TekhInform" Publ., 2010, 32 p. (In Russian)

21. Petrov D. Y. & Beliy A. A. *SPb GUP "Mostotrest": 80 let bezuprechnoy raboty. Dorogy. Innovatsii v stroitelstve* [*SPb GUP «Mostotrest»: 80 years of outstanding work. Roads. Innovations in the construction industry*]. Saint Petersburg, OOO "Technical information center "TekhInform", 2012, no. 19, pp. 34–36. (In Russian)

22. Beliy A. A. & Karapetov E. S. Opyt obsledovaniya usilennykh i rekonstruirovannykh mostovykh obyektov Sankt Peterburga. Obsledovaniye zdaniy i sooruzheniy: problemy i puty ikh resheniya [The experience of examining reinforced and reconstructed bridgeworks in Saint Petersburg. Examination of buildings and constructions: problems and ways of solution]. *Proceedings of the 8th International research and training conference.* October, 13th, 2017. Saint Petersburg, Polytechnic University Publ., 2017, pp. 13–20. (In Russian)

*БЕЛЫЙ Андрей Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, andbeliy@mail.ru; КАРАПЕТОВ Эдуард Степанович – канд. техн. наук, профессор, eskar@yandex.ru; ЦЫГАНКОВА Екатерина Сергеевна – аспирант, инженер, rino4ka5@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004.492.2

М. Н. Василенко, П. Е. Булавский, П. А. Василенко

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ КИБЕРАТАК НА ЭЛЕКТРОННУЮ ТЕХНИЧЕСКУЮ ДОКУМЕНТАЦИЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Дата поступления:10.04.2018
Решение о публикации: 10.05.2018

Аннотация

Цель: Выполнение анализа вариантов кибератак на электронную техническую документацию систем обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте. **Методы:** Приведена оценка специфики содержания документации железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) в системах электронного документооборота и возможности приведения кибератак в реальных условиях эксплуатации. **Результаты:** Показана возможность опасного отказа систем управления движением поездов в результате кибернарушений типа «ошибка» в технической документации. Разработана классификация кибератак на электронные базы технической документации и выявлена ее уязвимость. **Практическая значимость:** Доказана необходимость разработки специальных мер защиты электронных баз технической документации ЖАТ в отношении кибернарушений типа «ошибка» и предложены варианты практической реализации методов защиты при кибератаках.

Ключевые слова: Техническая документация ЖАТ, умышленные ошибки, электронная техническая документация, способ проведения кибератаки, кибербезопасность.

Mikhail N. Vasilenko, D. Eng. Sci., professor; **Petr E. Bulavskiy,** D. Eng. Sci., associate professor, pbulavsky@gmail.com (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University); ***Petr A. Vasilenko,** engineer, vasilenko.p.al@gmail.com (OOO «IMSAT»). ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF CYBERATACKS ON ONLINE TECHNICAL DOCUMENTATION OF RAILROAD AUTOMATION AND TELEMECHANICS

Summary

Objective: To analyze modifications of cyberattacks on online technical documentation of railroad security systems. **Methods:** The specificity of railroad automation and telemechanics (RAT) documentation maintenance in electronic document management systems was estimated and presented. Also the assessment of enforceability of cyberattacks under actual operating conditions was given. **Results:** The possibility of critical failure of train control systems resulting from cyber faults of error type in technical documentation was demonstrated. A classification of cyberattacks on electronic databases of technical documentation was introduced. Vulnerability of the latter was uncovered. **Practical importance:** The necessity to develop special security measures for electronic databases of RAT technical documentation was justified. It concerned cyber faults of error type. Moreover, practical implementation alternatives of security methods in case of cyberattacks were introduced.

Keywords: Technical documentation RAT (Railroad Automation and Telemechanics), intentional errors, online technical documentation, cyberattack realization method, cybersecurity.

Определение видов технической документации

Инструкция по ведению технической документации (ТД) ЖАТ устанавливает правила хранения, внесения изменений и обновления исполнительной, конструкторской, технологической и программной документации (ТД) на устройства и системы сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) [1].

Согласно инструкции, различают следующие виды ТД:

• проектная – содержащая материалы в текстовой форме и в виде карт (схем, чертежей), определяющие функционально-технологические, конструктивные и инженерно-технические решения для обеспечения строительства, реконструкции объектов ЖАТ, их частей, а также капитального ремонта;

• рабочая – разрабатываемая в целях реализации в процессе строительства или модернизации технических и технологических решений, как одновременно с подготовкой проектной документации, так и после нее;

• исполнительная – комплект рабочих чертежей в составе исполнительной документации на вводимый в эксплуатацию объект ЖАТ, откорректированный проектной организацией после ввода в эксплуатацию устройств и систем СЦБ, с учетом внесенных при вводе изменений и соответствующий введенным в действие устройствам и системам СЦБ;

• конструкторская – совокупность конструкторских документов, содержащих в зависимости от их назначения данные, необходимые для изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта продукции;

• технологическая – совокупность технологических документов, определяющих технологические процессы изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта продукции, номенклатура и комплектность которых определяются в зависимости от типа и характера производства;

• эксплуатационно-программная – необходима для обеспечения функционирования и эксплуатации устройств и систем СЦБ, выполненных на базе аппаратно-программных средств.

Ошибки, недостатки, несоответствия в принципиальных и монтажных схемах, выявленные в процессе строительно-монтажных и пусконаладочных работ, должны быть устранены до ввода объекта в эксплуатацию и утверждены главным инженером проекта или лицом, его заменяющим.

Начальник дистанции СЦБ своим распоряжением назначает руководителя, ответственного за выполнение работ по вводу в эксплуатацию устройств и систем СЦБ, который в течение 10 дней после ввода объекта в эксплуатацию организовывает подготовку копий принципиальных и монтажных схем с изменениями по результатам строительно-монтажных и пусконаладочных работ (регулировочный экземпляр) для передачи их на корректировку в проектную организацию и получения исполнительной ТД (ИТД) в бумажной и электронной формах.

Электронная версия ИТД должна передаваться в файлах редактируемого формата ОФТД или КАСПР для ведения ИТД в процессе эксплуатации средствами АРМ-ВТД. Файлы формата КАСПР конвертируются в файлы формата ОФТД средствами конвертера АРМ-ВТД. Выполнение работ по переводу действующей ИТД в электронный вид средствами АРМ-ВТД осуществляется в плановом порядке.

Этапы создания и эксплуатации ТД ЖАТ

Жизненный цикл систем ЖАТ (СЖАТ) весьма сложен, включает в себя ряд этапов и требует непрерывного документального сопровождения с большим объемом ТД, как представлено в таблице.

По технологии проектирования и ведения ТД ЖАТ можно сделать следующие выводы:

1. С момента начала разработки до момента снятия СЖАТ с эксплуатации идет процесс создания, внесения изменений и ведения ТД,

Этапы жизненного цикла СЖАТ

Этапы жизненного цикла СЖАТ	Участники создания СЖАТ	Результаты создания СЖАТ
Разработка системы	Организации и фирмы-разработчики	Документация разработчика
Сертификация на безопасность	Сертификационные лаборатории	Сертификационные документы
Разработка и утверждение типовых материалов проектирования	ГТСС и фирмы-разработчики СЖАТ	Типовая проектная документация (ТПД)
Проектирование на объекте	Проектные организации	Проектная техническая и рабочая документация (ПРТД)
Производство деталей и узлов СЖАТ	Заводы-изготовители	Изменения и дополнения ПРТД
Строительство на объекте	Строительно-монтажные поезда и бригады	Изменения и дополнения ПРТД
Пусконаладочные работы на объекте	Бригады пусконаладки	ИТД
Приемка в эксплуатацию	Комиссия по приемке	ИТД
Эксплуатация (20–40 лет)	Группы ТД и электромеханики дорог	Ведение и сопровождение ИТД, внесение изменений
Модернизация и реконструкция СЖАТ	Проектные организации и дороги	Внесение изменений в ИТД
Снятие с эксплуатации	Комиссия ОАО «РЖД»	Утилизация ТД

которая является эталонной моделью процессов производства, строительства и эксплуатации.

2. До настоящего времени этот процесс производится с использованием бумажных носителей (БТД). Несмотря на переход проектировщиков на электронную техническую документацию (ЭТД), все согласования и утверждения выполняются на БТД.

3. По данным отчетов Служб автоматики и телемеханики в одной дистанции СЦБ хранится и сопровождается в среднем от 20 до 100 тыс. листов формата А4. В этот список входят:

4. Схематические планы станций, перегонов, переездов:

• двухниточные планы и схемы канализации тягового тока;

• кабельные сети напольного и внутрипостового оборудования;

• таблицы взаимозависимости стрелок и сигналов;

• принципиальные электрические схемы;

• монтажные электрические схемы;

• схемы аппаратов управления и устройств микропроцессорной техники;

• схемы устройств энергоснабжения и питания;

• документация на программное обеспечение (ПО).

5. Учитывая вышесказанное, было показано [2–10], что затраты на БТД велики и необходим переход на ЭТД.

Вопросы состояния разработки и внедрения электронной технологии ведения ТД ЖАТ изложены в работе [11]. В ней определены основные проблемы внедрения системы электронного документооборота (СЭД) ЖАТ в настоящее время:

• создание электронной базы данных контрольных экземпляров ТД;

• доведение технологии ЭТД до конечного пользователя;

• завершение работ по созданию автоматизированной системы экспертизы схемных решений;

• внедрение электронной подписи всех видов ТД ЖАТ;

• обеспечение кибербезопасности ЭТД с учетом специфики ЖАТ.

Классификация кибератак на ЭТД ЖАТ

Анализ современного состояния вопроса позволяет предложить следующие классификации.

По характеру проведения кибератаки (КА)

КА типа «Вирус»

Основные характеристики: внезапность, массовость, блокировка работы или уничтожение ПО. Кража персональных данных или информационных баз данных действующих систем.

Способы реализации: чаще всего вирус попадает в систему специально, но вносит его сам пользователь. Вирус можно получить по электронной почте, с зараженного носителя, скачав зараженную программу в Интернете, и т. д.

Последствия: разрушение ПО, блокировка системы на некоторое время или окончательно, кража базы данных или ее части.

Примеры

• В сентябре 2010 г. компьютерный вирус Stuxnet поразил компьютеры сотрудников АЭС в Бушере. Президент Ирана признал, что вирус создал проблемы в функционировании центрифуг комплекса по обогащению урана в Натанзе. По мнению экспертов, Stuxnet стал первым вирусом, который был использован как кибероружие.

• 27 июня 2017 г. в результате уязвимости в программном обеспечении сначала компьютеры украинских, а затем и российских компаний поразил вирус-вымогатель Petya. Примечательно, что вирус требовал выкуп, но при поступлении денег все равно удалял зашифрованные данные пользователей, т. е. его целью было не столько получение выгоды, сколько блокировка работы компаний. Под удар попали такие компании как аэропорт Харькова, Чернобыльская АЭС, «Сбербанк», «Хоум Кредит», «Роснефть» и «Евраз». Также сообщения о заражении поступали из Италии, Израиля, Сербии, Венгрии, Румынии, Польши, Аргентины, Чехии, Германии, Великобритании, США, Дании, Нидерландов, Испании, Индии, Франции и Эстонии.

КА типа «Хакерская Атака»

Основные характеристики: внезапность; в отличие от вируса, который заражает все компьютеры, хакерская атака обычно направлена на одну систему (организацию, базу данных) и проводится с первоначальной целью вывести из строя сервера.

Способы реализации: атака производится группой хакеров, чтобы разными способами обойти защиту системы или вывести ее из строя при помощи многочисленных запросов.

Последствия: блокировка работы системы и полная потеря управления над системой, кража баз данных, возможность перехвата управления системы злоумышленниками.

Примеры

• 5 октября 2014 г. был проведен взлом серверов метрополитена Сеула северокорейскими хакерами. Им удалось вскрыть защиту двух серверов и через них проникнуть на рабочие компьютеры 210 сотрудников метро, установив на 58 из них вредоносное ПО. Руководство Сеульской подземки, в свою очередь, заявило, что кибервзломщикам «удалось приникнуть лишь на офисные компьютеры, не связанные с системами управления движением поездов и энергоснабжения».

• 21 июня 2015 г. массированной атаке хакеров подверглись наземные информационные системы польской авиакомпании LOT, в

результате чего в аэропорту Варшавы имени Фредерика Шопена были отложены десятки международных и внутренних рейсов. Вовремя не смогли вылететь 1,4 тыс. человек.

КА типа «кибернарушение» (КН)

Основные характеристики: данный вид кибератаки принципиально отличается от остальных, так как он преследует другие цели.

Способы реализации: совершается при помощи целенаправленного, но скрытого изменения кода существующей программы, системы управления, внесения изменения в базы данных или ЭТД.

Последствия: кража данных в процессе эксплуатации системы; блокировка управления системы в ответственный момент, целенаправленное создание технологической операции, при которой может случится катастрофа (крушение).

Примеры

• В 2014 г. в Германии жертвой атаки стал один из металлургических заводов. Используя социальную инженерию, хакеры, благодаря доступу к компьютеру одного сотрудника, смогли получить доступ к внутренней сети системы управления. В результате стало невозможным включить одну из домен, что нанесло огромный ущерб предприятию.

• 23 декабря 2015 г. случились перебои в подаче электроэнергии на Украине, они были сбоем в работе ПО, которое было модифицировано до этого вирусом. Атака была совершена сразу на несколько объектов энергосети. Одновременно был атакован и центр обслуживания энергосети, чтобы клиенты не смогли сообщать о перебоях с электричеством. Эксперты посчитали данный инцидент первым отключением электричества, вызванным кибератакой.

По объектам проникновения в ЭТД ЖАТ

Можно указать следующие возможные варианты:

1. ПК инженеров-электромехаников. 20–30 тыс. человек занимаются эксплуатацией устройств ЖАТ, включая задачи монтажных работ, замены приборов, пусконаладочных работ при модернизации и реконструкции ЖАТ. Использование ЭТД в качестве эталона для выполнения работ с действующими устройствами ЖАТ приводит к ошибкам в действующих системах.

2. ПК инженеров групп ТД ШЧ, ШЛ, Ш (2000–3000 человек), занимающихся содержанием (ведением) ЭТД в соответствии с действующей инструкцией по ведению ТД ЖАТ.

3. ПК инженеров – проектировщиков, производственных участков, строителей, бригад пусконаладочных работ, занимающихся разработкой проектов ЭТД и их реализацией в производстве и строительстве. В этих процессах всегда существует необходимость корректировки, внесения изменений и дополнений в ЭТД [1].

4. Электронные базы данных ТД (БДТД) на серверах проектных институтов, ШЧ, Ш и ЦШ, где осуществляются хранение, архивирование, копирование и резервирование ЭТД.

5. Каналы связи всех разработчиков, пользователей и эксплуатационников ЭТД.

По способу проведения КА и КН на объектах проникновения

Классификация КА по способу проведения приведена в статье [12] и согласуется с известными фактами:

• несанкционированный просмотр защищаемой информации на экране мониторов администратора или пользователей информационной системы;

• вывод защищаемой информации на неучтенные носители;

• подбор аутентифицирующей информации администраторов или пользователей информационной системы;

• доступ к функционирующим штатным средствам ведения ТД не допущенных к ним лиц (несанкционированный доступ);

• несанкционированное изменение конфигурации (настроек) программно-технических средств;

• модификация ведущихся в электронном виде регистрационных протоколов (журналов регистрации);

• несанкционированное подключение к техническим средствам информационных систем устройств, способных накапливать или каким-либо способом передавать защищаемую информацию;

• несанкционированная модификация программных средств;

• использование недекларированных возможностей (НДВ) ПО;

• блокирование или уничтожение информации, а также разрушение или искажение данных, в том числе путем внедрения вирусов ПО различных типов;

• модификация защищаемой информации, хранящейся на съемных носителях;

• перехват защищаемой информации при ее передаче по каналам связи, расположенными за пределами защиты;

• перехват защищаемой информации путем несанкционированного подключения к кабельным системам, коммутационному и серверному оборудованию, размещенному в пределах систем защиты;

• целенаправленное искажение или уничтожение защищаемой информации, а также навязывание ложной (специально сформированной нарушителем) информации при ее передаче по каналам связи;

• перенаправление потоков данных путем воздействия через каналы связи;

• целенаправленное искажение или навязывание ложных команд управления, передаваемых по каналам связи;

• нарушение в каналах связи вследствие преднамеренной загрузки трафика ложными сообщениями.

По последствиям воздействия КА и КН на ЭТД можно различать следующие: уничтожение ЭТД, кража ЭТД, частичное повреждение ЭТД, преднамеренное внесение ошибок в ЭТД.

Заключение

Электронные базы ТД активно создаются и уже используются при разработке, внедрении и эксплуатации ЖАТ. Как показано в статье, они являются основой информационного обеспечения СЖАТ, так как содержат всю необходимую информацию о принципах построения, обеспечения безопасности, производства, строительства и эксплуатации СЖАТ.

Базы данных (БДТД) и отдельные электронные документы ЖАТ велики по объему информации (сотни гигабайт), территориально распределены по многим пользователям и имеют широкий доступ к внутренней структуре и содержанию.

В настоящее время не разработаны специальные средства защиты БДТД ЖАТ от несанкционированного доступа, возможности которого показаны в статье. До сих пор не внедрена электронно-цифровая подпись ТД и не решены вопросы кибербезопасности.

Особую опасность представляют кибератаки на ИТД, реализованную в действующую СЖАТ и являющуюся эталоном для внесения изменений, контроля исправности, диагностики, мониторинга и организации процессов технического обслуживания.

Ошибки, внесенные в результате кибератак (кибернарушений) в БДТД ЖАТ, трудно обнаруживаются, могут маскироваться и приводить к опасным отказам в управлении движением поездов.

Библиографический список

1. Инструкция по ведению технической документации железнодорожной автоматики и телемеханики. – В ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 06.10.2017 г. № 2034р.

2. Василенко М. Н. Интеллектуальная система электронного документооборота в хозяйстве железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, Д. В. Зуев, Д. В. Седых, П. А. Василенко // Сб. трудов конференции «TIS-2017». – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 247–254.

3. Василенко М. Н. Автоматизированная система экспертизы схемных решений железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, Д. В. Зуев, А. М. Горбачев, Е. В. Григорьев // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 5 (36). – С. 64–68.

4. Булавский П. Е. Автоматизация информационного обеспечения руководителей железнодорожного транспорта на основе внедрения электронного документооборота / П. Е. Булавский, М. Н. Василенко, А. А. Корниенко, А. Д. Хомоненко // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – 2012. – Вып. 2 (31). – С. 116–118.

5. Василенко М. Н. Применение теории и методов экспертизы схемных решений ЖАТ для повышения качества ведения технической документации / М. Н. Василенко, А. М. Горбачев // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 6 (43). – С. 34–39.

6. Василенко М. Н. Автоматизированная система экспертизы схемных решений железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, А. М. Горбачев, Р. Т. Мустафаев // Автоматика. Связь. Информатика. – 2013. – № 4. – С. 11–13.

7. Василенко М. Н. Электронный документооборот в хозяйстве СЦБ / М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Зуев // Автоматика. Связь. Информатика. – 2014. – № 8. – С. 2–3.

8. Василенко М. Н. Безбумажная технология ведения технической документации ЖАТ / М. Н. Василенко, Д. В. Зуев // Автоматика. Связь. Информатика. – 2014. – № 4. – С. 34–35.

9. Василенко М. Н. Современные информационные технологии работы с технической документацией / М. Н. Василенко, Д. В. Зуев // Автоматика. Связь. Информатика. – 2014. – № 5. – С. 24–25.

10. Василенко М. Н. Экономическое обоснование принятия решений в логистических центрах ОАО РЖД в реальном масштабе времени / М. Н. Василенко, Д. В. Зуев // Всерос. информ.-аналит. журн. Железнодорожное дело. – 2015. – № 1. – С. 20–21.

11. Василенко М. Н. Состояние внедрения и перспективы развития интеллектуального электронного документооборота хозяйства железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, Д. В. Зуев, Д. В. Седых, П. А. Василенко // Автоматика на транспорте. – 2018. – № 2. – С. 33–39.

12. Василенко М. Н. Кибербезопасность технической документации железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, Д. В. Зуев // Транспорт Российской Федерации – 2015. – № 2 (57). – С. 55–58.

References

1. *Instruktsiya po vedeniyu tekhnicheskoy dokumentatsii zheleznodorozhnoy avtomatiky i telemekhaniky* [*Instruction on railroad automation and telemechanics technical documentation maintenance*]. V red. rasporyazheniya OAO "RZhD" [In the wording of OAO "Russian Railways"]. Instruction dated November 6th, 2017, no. 2034 p (In Russian)

2. Vasilenko M. N., Zujev D. V., Sedykh D. V. & Vasilenko P. A. Intellektualnaya sistema elektronnogo dokumentooborota v khosyaistve zheleznodorozhnoy avtomatiky i telemekhaniky [Intelligent system of electronic document management in the railroad automation and telemechanics industry]. *Coll. papers of the "TIS-2017" conference.* Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2017, pp. 247–254. (In Russian)

3. Vasilenko M. N., Zujev D. V., Gorbachev A. M. & Grigoriyev E. V. Avtomatizirovannaya sistema ekspertizy skhemnykh resheniy zheleznodorozhnoy avtomatiky i telemekhaniky [Computer-aided design expertise system of railroad automation and telemechanics]. *Transport of the Russian Federation*, 2012, no. 5 (36), pp. 64–68. (In Russian)

4. Bulavskiy P. E., Vasilenko M. N., Kornienko A. A. & Khomonenko A. D. Avtomatizatsiya informatsionnogo obespecheniya rukovoditeley zheleznodorozhnogo transporta na osnove vnedreniya elektronnogo dokumentooborota [Information support automatization of railroad transport senior management based on implementation of electronic document flow]. *Proceedings of Petersburg State Transport University.* Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012, issue 2 (31), pp. 116–118. (In Russian)

5. Vasilenko M. N. & Gorbachev A. M. Primeneniye teorii i metodov ekspertizy skhemnykh resheniy ZhAT dlya povysheniya kachestva vedeniya tekhnicheskoy dokumentatsii [Application of RAT design expertise theory and methods to improve the quality of technical

documentation management]. *Transport of the Russian Federation*, 2012, no. 6 (43), pp. 34–39. (In Russian)

6. Vasilenko M. N., Gorbachev A. M. & Mustafaev R. T. Avtomatizirovannaya sistema ekspertizy skhemnykh resheniy zheleznodorozhnoy avtomatiky i telemekhaniky [Computer-aided design expertise system of railroad automation and telemechanics]. *Automation. Telecommunication. Informatics*, 2013, no. 4, pp. 11–13. (In Russian)

7. Vasilenko M. N., Trokhov V. G. & Zujev D. V. Elektronniy dokumentooborot v khozyaistve STsB [Electronic document flow in SCB facilities]. *Automation. Telecommunication. Informatics*, 2014, no. 8, pp. 2–3. (In Russian)

8. Vasilenko M. N. & Zujev D. V. Bezbumazhnaya tekhnologiya vedeniya tekhnicheskoy dokumentatsii ZhAT [Paperless technology of RAT technical documentation management]. *Automation. Telecommunication. Informatics*, 2014, no. 4, pp. 34–35. (In Russian)

9. Vasilenko M. N. & Zujev D. V. Sovremenniye informatsionniye tekhnologii raboty s tekhnicheskoy dokumentatsiyey [Modern information technologies for technical documentation management]. *Automation. Telecommunication. Informatics*, 2014, no. 5, pp. 24–25. (In Russian)

10. Vasilenko M. N. & Zujev D. V. Ekonomicheskoye obosnovaniye prinyatiya resheniy v logisticheskykh tsentrakh OAO RZhD v realnom masshtabe vremeny [Economic justification of decision-making in logistic centers of OAO Russian Railways on a real-time basis]. *All-Russian information analytical journal "Railways"*, 2015, no. 1, pp. 20–21. (In Russian)

11. Vasilenko M. N., Zujev D. V., Sedykh D. V. & Vasilenko P. A. Sostoyaniye vnedreniya i perspektivy razvitiya intellektualnogo elektronnogo dokumentooborota khozyaistva zheleznodorozhnoy avtomatiky i telemekhaniky [Implementation condition and development prospects of intellectual electronic documentation flow of railroad automation and telemechanics industry]. *Transport automation*, 2018, no. 2, pp. 33–39. (In Russian)

12. Vasilenko M. N. & Zujev D. V. Kiberbezopasnost tekhnicheskoy dokumentatsii zheleznodorozhnoy avtomatiky i telemekhaniky [Cyber security of railroad automation and telemechanics technical documentation]. *Transport of the Russian Federation*, 2015, no. 2 (57), pp. 55–58. (In Russian)

ВАСИЛЕНКО Михаил Николаевич – д-р техн. наук, профессор; БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич – д-р техн. наук, доцент, pbulavsky@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); *ВАСИЛЕНКО Петр Алексеевич – инженер, vasilenko.p.al@gmail.com (ООО «ИМСАТ»).

УДК 656.022.5

А. М. Горбачев

ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПИСАНИЙ МАРШРУТНОГО ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА

Дата поступления: 22.05.2018
Решение о публикации: 07.06.2018

Аннотация

Цель: Обзор международного и отечественного опыта построения математических моделей представления расписаний и графиков движения. **Методы:** Проведен анализ возможности применения существующего международного опыта организации перевозок на городском маршрутном транспорте в части составления расписаний для условий постсоветских стран. **Результаты**: Установлена необходимость разработки специализированных математических моделей расписаний маршрутного городского транспорта, пригодных для эксплуатации в условиях действующих в России технологических норм и ограничений организации движения. **Практическая значимость:** Обоснована целесообразность внедрения и развития отечественных информационных систем, предназначенных для планирования организации работы городского маршрутного транспорта.

Ключевые слова: Маршрутное расписание, периодическое расписание, апериодическое расписание, математическая модель, городской транспорт.

Alexey M. Gorbachev, Cand. Eng. Sci., ag@agpage.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) OVERVIEW OF THE ROUTE PUBLIC TRANSPORT MATHEMATICAL MODELS

Summary

Objective: To survey international and domestic experience of building mathematical models for timetable and schedule presentation. **Methods:** The analysis of applicability of the current international experience in transport management in the sphere of public route transport was carried out. It particularly concerned scheduling for ex-USSR countries. **Results:** The necessity to develop special-purpose mathematical models of route public transport schedule was justified. The schedule models in question being serviceable under the limitations of current technology-based standards and traffic management restrictions in Russia. **Practical importance:** Implementation and development of domestic intelligence systems, designed to organize the management of public route transport operation, is of great relevance for economic development of the country.

Keywords: Route timetable, periodic timetable, noncyclic timetable, mathematical model, public transport.

Непрерывно растущие транспортные потоки требуют постоянного повышения качества планирования организации движения городского и магистрального транспорта. Составление расписаний является важнейшим этапом планирования работы маршрутного транспорта на всех уровнях организации движения (от стратегического с горизонтом планирования в несколько лет до оперативного с горизонтом планирования в несколько часов или суток).

В зависимости от математического аппарата, используемого для решения задачи синтеза, расписания движения делятся на периодические и апериодические. Исторически первым типом расписаний были апериодические графики движения поездов магистрального транспорта, что было связано с низкой частотой их движения [1].

Апериодические (непериодические и нециклические, см. работы [2–4]) расписания – это такие расписания, в которых отсутствует требование обязательного повторения событий через заданный период времени *T*. Под событиями, применительно к маршрутному транспорту, понимаются времена прибытия (T_{Arr}) и отправления с конечных станций (T_{Dep}) с фиксированными интервалами. Ограничения по данной конечной станции накладываются прежде всего прибытиями и отправлениями предыдущих и следующих транспортных средств, а также другими событиями, которые отличаются в разных математических моделях процессов организации движения (например, моменты начала и окончания работы конечных станций и парков (депо), длительности технических стоянок, смен транспортных бригад на линии и т. д.). Целевая функция оптимизации – это, как правило, равномерность интервалов транспортных средств по отправлению. Решение такой задачи в общем виде для потоков под наименованием проблемы получения допустимого распределения (feasible distribution problem – FDP) найдено при помощи линейного программирования и впервые рассмотрено в [2]. Задача решается на основе модифицированного алгоритма, впервые предложенного для решения задачи с раскрасками. Сложность алгоритма полиномиальная. Наложение дополнительных условий может свести задачу к числу NP-сложных. Такими примерами являются, в частности, задача построения расписаний с учетом маршрутов пассажиров [3] и в определенных случаях наложение ограничений по пропускной способности [4].

Для работы городского общественного транспорта практически всегда использовались периодические (циклические) расписания. Периодические расписания – это расписания, действие которых повторяется через конкретный (обычно небольшой) промежуток времени *Period*. Они предпочтительнее для пассажиров при условии, что *Period* – относительно небольшая величина [1]. Математическая модель для периодических расписаний была предложена в работе [5]. В ней же приведено доказательство того, что задача нахождения допустимого периодического расписания является NP-сложной. По этой причине для решения задачи применяются различные эвристики и методы направленного поиска, имеющие в худшем случае экспоненциальную сложность [6, 7]. Необходимо отметить, что в контексте исследований по теории расписаний под нахождением допустимого расписания понимается задача определения допустимых времен отправления и прибытия транспортных средств с учетом ограничений при известной структуре самого маршрутного расписания. В основной задаче теории расписаний количество рейсов каждого транспортного средства, интервалы технического обслуживания, стоянки, на которых осуществляется техническое обслуживание и где предоставляются обеды и выполняются смены транспортных бригад, и т. д. входят в исходные данные. Проблемы построения и оптимизации периодических расписаний получили развитие в работах [8–11]. Приведенные в них модели обеспечивают наибольшее удобство для пассажира, задавая на промежутке времени стабильный интервал отправления транспортных средств *T*. Вместе с тем периодические расписания, как правило, не учитывают особенности графиков работы транспортных бригад, что приводит к менее рациональному распределению рабочего времени, особенно при наличии утренних и вечерних часов «пик».

Несмотря на указанные особенности, многие страны Европы еще в XX в. перешли на периодические графики движения поездов магистрального и городского транспорта. Первой страной была Нидерланды (1939 г.), затем Дания (1974 г.), Швейцария (1984 г.), Бельгия и Австрия (1991 г.). В Германии переход на гра-

фики движения с фиксированным интервалом движения начался в 1979 г. с междугородних поездов и завершился в 1993 г. [1]. Перспективным направлением разработок является планирование графиков движения с учетом необходимости стыковки различных поездов на пересадочных узлах.

Ключевыми особенностями в СССР и других странах Варшавского договора являлись движение маршрутных транспортных средств преимущественно в общем потоке (соответственно времена хода значительно изменяются по периодам суток из-за заторов в движении), возможность закрепления бригад (водитель и кондуктор) за транспортными средствами, жесткая привязка расписания к графикам работы водителей, предоставление обедов бригадам во время стоянки транспортных средств на конечных станциях и т. д. [12, 13].

Эти отличия актуальны и в настоящее время [13–16], поэтому рассмотрим их подробнее.

В результате дискретного изменения значений времен хода по часам суток при построении расписания возникает задача обратного отсчета, когда при вычислении, например, по времени прибытия на конечную станцию T_{Arr} времени выхода из парка (депо) может оказаться, что точного результата просто не существует, если время рейса пришлось на границу периодов суток (переходное время).

Из-за жесткой привязки графиков движения к графикам работы транспортных бригад возникает проблема простоя, к примеру, трамваев во время обедов. При этом в случае применения периодических расписаний при таких технологических ограничениях минимальное значение периода будет равно максимальному времени технологической стоянки (обед, техническая стоянка, смена), что, как правило, недопустимо для городского транспорта.

Для расписаний, учитывающих перечисленные выше ограничения, построение периодических расписаний с периодом *Period*, практически обосновано только в случае, когда в течение периода интервал не является слишком большим, т. е. продолжительность технических и обеденных стоянок сравнима с временем стандартной стоянки. На практике величины стоянок (например, стандартной и обеденной) существенно отличаются. Задание одинаковых стоянок на уровне максимальной для обеспечения постоянного и одинакового интервала приведет к существенным простоям подвижного состава. Это и объясняет применение апериодических расписаний на городском наземном транспорте в России.

Первые попытки автоматизации процесса построения расписаний применительно к городскому транспорту (в частности, автобусам) в СССР предпринимались в 60-е годы XX в. в Москве [3, 11]. Однако результаты этой работы не нашли широкого использования на практике [12]. Задача решалась для расписаний с двумя конечными станциями (без маневровых передвижений и командировочных рейсов), движение между которыми осуществлялось по одной основной трассе. Полный список ограничений приведен в [12]. Основными достижениями [3, 12] были матричное представление расписаний в форме модифицированной таблицы без обгонов, практическая реализация алгоритмов в виде программ для ЭВМ того времени и др.

Результаты разработки современного программного обеспечения по автоматизации управления городским транспортом России приведены в [13–18]. Так, в [13–15] рассматривается Автоматизированная Система Управления Городским Электрическим Транспортом, имеющая модульную структуру и действующая в Санкт-Петербурге, в [16, 17] – система, используемая в Москве и многих других городах России, в [18] – система автоматизации построения расписаний трамваев и троллейбусов, внедренная в Иркутске. Однако работы [14–18] носят обзорный характер, и в них отсутствует описание математических моделей, положенных в основу программного обеспечения.

Это объясняет необходимость разработки отдельной модели апериодических расписаний городского транспорта с учетом указанных выше особенностей организации движения, характерных для нашей страны.

Библиографический список

1. Lindner T. Train schedule optimization in public rail transport : PhD thesis / T. Lindner. – Braunschweig : Technische Universität Braunschweig, 2000. – 128 p.

2. Rockafellar R. T. Network flows and monotropic optimization / R. T. Rockafellar. – Belmont : Athena Scientific, 1998. – 634 p.

3. Антошвили М. Е. Оптимизация городских автобусных перевозок / М. Е. Антошвили, С. Ю. Либерман, И. В. Спирин. – М. : Транспорт, 1985. – 102 с.

4. Schmidt M. E. Integrating routing decisions in public transport problems / M. E. Schmidt. – New York : Springer Science + Business Media, 2014. – 227 p. (Springer Optimization and Its Applicaions. Vol. 89). DOI 10.1007/978-1-4614-9566-6_2.

5. Serafani P. A mathematical model for periodic scheduling problems / P. Serafani, W. Ukovich // SIAM J. Disc. Math. – USA : Society for Industrial and Applied Mathematics, 1989. – Vol. 2 (4). – P. 550–581.

6. Cacchiani V. Non-cyclic train timetabling and comparability graphs / V. Cacchiani, A. Caprara, P. Toth // Operations Research Letters. – 2010. – Vol. 38(3). – P. 179–184.

7. Odijk M. A. A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables / M. A. Odijk // Transportation Research. Pt B. – Great Britain : Elsevier, 1996. – P. 455–464.

8. Cacchiani V. Nominal and robust train timetabling problems / V. Cacchiani, P. Toth // European Journal of Operational Research. – 2012. – Vol. 219. – P. 727–737.

9. Liebchen C. The modeling power of the periodic event scheduling problem : Railway timetables and beyond / C. Liebchen, R. Möhring // Algorithmic methods for railway optimization / Eds by F. Geraets, L. Kroon, A. Schoebel, D. Wagner, C. Zaroliagis. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2007. – Vol. 4359 of Lecture Notes in Computer Science. – P. 3–40.

10. Liebchen C. Periodic timetable optimization in public transport : PhD thesis / C. Liebchen. – Belrin : Technische Universität Publ., 2006. – 156 p.

11. Liebchen C. Performance of algorithms for periodic timetable optimization / C. Liebcher, M. Proksch, F. H. Wagner // Computer-aided systems in public transport / Eds by G. Fandel, W. Trockel, M. Hickman, P. Mirchandani, S. Voß. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2008. – Vol. 600 of Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. – P. 151–180.

12. Антошвили М. Е. Организация городских автобусных перевозок с применением математических методов и ЭВМ / М. Е. Антошвили, Г. А. Варелопуло, М. В. Хрущев. – М. : Транспорт, 1974. – 104 с.

13. Горбачев А. М. Автоматизация синтеза расписаний городского электрического транспорта / А. М. Горбачев // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2014. – Вып. 4 (41).– С. 27–32.

14. Василенко М. Н. Автоматизированная Система Управления Городским Электротранспортом / М. Н. Василенко, А. М. Горбачев, Р. Т. Мустафаев // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе : материалы XII междунар. конференции молодых ученых «IT+SE'14». – Крым, Ялта ; Гурзуф. – 2014. – С. 102–105.

15. Горбачев А. М. Оптимизация построения расписаний городского электрического транспорта / А. М. Горбачев // Сб. материалов V Междунар. науч.-практич. конференции «ИнтеллектТранс-2015». – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 228–230.

16. Гуревич Г. А. Автоматический расчет расписаний движения наземного маршрутизированного транспорта / Г. А. Гуревич, С. Б. Перцович // Автотранспортное предприятие. – № 5. – М. : Транснавигация, 2006. – С. 38–41.

17. Гуревич Г. А. Новая версия автоматизированной общегородской системы формирования и сопровождения расписаний маршрутизированного транспорта / Г. А. Гуревич, Е. В. Финько, С. Б. Перцович // Автотранспортное предприятие. – № 12. – М. : Транснавигация, 2010. – С. 18–21.

18. Домбровский М. Ю. Рациональная методика формирования расписания движения подвижного состава городского электрического транспорта / М. Ю. Домбровский // Вестн. ИрГТУ. – Иркутск : ГТУ, 2013. – № 11 (82). – С. 15–19.

References

1. Lindner T. *Train schedule optimization in Public Rail Transport.* PhD thesis. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig Press, 2000, 128 p.

2. Rockafellar R. T. Network flows and monotropic optimization. Belmont, Athena Scientific Press, 1998, 634 p.

3. Antonshvili M. E., Liberman S. Y. & Spirin I. V. *Optimizatsiya gorodskykh avtobusnykh perevozok* [*Urban bus service optimization*]. Moscow, Transport Publ., 1985, 102 p. (In Russian)

4. Schmidt M. E. *Integrating Routing Decisions in public transport problems*. New York, Springer Science + Business Media Press, 2014, 227 p. (Springer Optimization and Its Applicaions, no. 89). DOI 10.1007/978-1-4614-9566-6_2.

5. Serafani P. & Ukovich W. A mathematical model for periodic scheduling problems. *SIAM J. Disc. Math.*, USA, Society for Industrial and Applied Mathematics Publ., 1989, vol. 2 (4), pp. 550–581.

6. Cacchiani V., Caprara A. & Toth P. Non-cyclic train timetabling and comparability graphs. *Operations Research Letters*, 2010, vol. 38 (3), pp. 179–184.

7. Odijk M. A. A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables. *Transportation Research, pt B*, 1996, vol. 30 (6), pp. 455–464.

8. Cacchiani V. & Toth P. Nominal and robust train timetabling problems. *European Journal of Operational Research*, 2012, vol. 219, pp. 727–737.

9. Liebchen C. & Möhring R. The modeling power of the periodic event scheduling problem: Railway timetables and beyond. *Algorithmic methods for Railway optimization.* Eds by F. Geraets, L. Kroon, A. Schoebel, D. Wagner, C. Zaroliagis. Berlin, Heidelberg, Springer Press, 2007, pp. 3–40. (Vol. 4359 of Lecture Notes in Computer Science.)

10. Liebchen C. *Periodic timetable optimization in public transport.* PhD thesis. Belrin, Technische Universität Press, 2006, 156 p.

11. Liebchen C., Proksch M. & Wagner F. H. Performance of algorithms for periodic timetable optimization. *Computer-aided systems in Public Transport*. Eds by G. Fandel, W. Trockel, M. Hickman, P. Mirchandani, S. Voß. Berlin, Heidelberg, Springer Press, 2008, pp. 151–180. (Vol. 600 of Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems.)

12. Antonshvili M. E., Varelopulo G. A. & Khrushchev M. V. *Organizatsiya gorodskykh avtobusnykh perevozok s prymeneniyem matematicheskykh metodov i EVM* [*Urban bus service management using mathematical methods and ECM*]. Moscow, Transport Publ., 1974, 104 p. (In Russian)

13. Gorbachev A. M. Avtomatizatia sinteza raspizaniy gorodskogo elektrotransporta [Automatization syntesis of schedule urban-electric transport]. *Proceedings of Petersburg State Transport University.* Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, issue 4(41), pp. 27–32. (In Russian)

14. Vasilenko M. N., Gorbachev A. M. & Mustafaev R. T. Avtomatizirovannaya Sistema Upravleniya Gorodskym Elektrotransportom [Computer-Aided Urban-Electric Transport Management System]. *Proceedings of the XII International conference of young scholars IT+SE'14.* Yalta, Gurzuf, 2014, pp. 102–105. (In Russian)

15. Gorbachev A. M. Optimizatchia postroenia raspizaniy gorodskogo elektrotransporta [Optimization constration of schedule urban-electric transport]. *Information technologyes in science, education, telecommunication and bizness. Proceedings V International scientific and practical conference "IntellektTrans-2015".* Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, pp. 228–230. (In Russian)

16. Gurevich G. A. & Pertsovich S. B. Avtomaticheskiy raschet raspisaniy dvizheniya nazemnogo marshrutizirovannogo transporta [Automatic calculation of land route transport timetables]. *Transport enterprise*. Moscow, Transnavigatsiya Publ., 2006, no. 5, pp. 38–41. (In Russian)

17. Gurevich G. A., Finko E. V. & Pertsovich S. B. Novaya versiya avtomatizirovannoy obshchegorodskoy sistemy formirovaniya i soprovozhdeniya raspisaniy marshrutizirovannogo transporta [The new release of computer-aided public system designed to form and maintain the route transport timetable]. *Transport enterprise*. Moscow, Transnavigatsiya Publ., 2010, no. 12, pp. 18–21. (In Russian)

18. Dombrovskiy M. Y. Ratsionalnaya metodika formirovaniya raspisaniya dvizheniya podvizhnogo sostava gorodskogo elektricheskogo transporta [An intelligent method designed to form the rolling stock timetable of urban electric transport]. *Bulletin of Irkutsk National Research Technical University*, 2013, no. 11 (82), pp. 15–19. (In Russian)

ГОРБАЧЕВ Алексей Михайлович – канд. техн. наук, ag@agpage.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.15

Е. В. Городнова, А. А. Минченко, Е. А. Суворова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ СЛОЖЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ ДОРОЖНОЙ НАСЫПИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ УПЛОТНЕНИЯ ВЗРЫВАМИ УДЛИНЕННЫХ ЗАРЯДОВ

Дата поступления: 11.07.2018
Решение о публикации: 29.09.2018

Аннотация

Цель: Создание прочного основания для автомобильных и железных дорог. **Методы:** Применена буровзрывная технология, сопровождающаяся созданием вертикальных песчаных дрен с использованием энергии взрыва. Данный метод предполагает ускорение консолидации слабых органических грунтов, а также уплотнение рыхлых песков, являющихся основанием дорожной насыпи. **Результаты:** На основе проведенных научно-исследовательских работ по уменьшению деформаций земляного полотна при строительстве скоростной автомобильной дороги получены такие величины как коэффициент пористости и показатель плотности сложения песчаного слоя. Представлено их сравнение до и после проведения работ. **Практическая значимость:** В результате работ произошло уплотнение песчаных грунтов основания дорожной насыпи. Использование буровзрывной технологии, формирующей песчаные дрены, позволило не только стабилизировать толщу слабых грунтов, но и уплотнить рыхлые пески, обеспечивая прочность и устойчивость основания дорожной насыпи.

Ключевые слова: Плотность сложения, основание дорожных сооружений, уплотнение песчаных грунтов взрывами, статическое зондирование, коэффициент пористости.

Elena V. Gorodnova, Cand. Eng. Sci., associated professor, elena.gorodnova@mail.ru; **Anastasiya A. Minchenko**, Cand. Geol. and Miner. Sci., assistant, anastasija.korobko@yandex.ru; ***Ekaterina A. Suvorova**, postgraduate student, suvorova_e_a@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) THE STUDY OF SANDY SOILS DENSITY IN THE SUBGRADE OF ROAD EMBANKMENT WHEN COMPACTED BY EXPLOSIONS OF ELONGATED CHARGES

Summary

Objective: To create a solid subgrade for highways and railways fulfillment. **Methods:** Drilling and blasting technology with vertical sand drains formation and explosion energy use was applied. The method in question assumes acceleration of weak organic soils consolidation and loose sands ompaction in the subgrade of the road embankment. **Results:** Research work was carried out to reduce deformations in the road embankment during the high-speed road construction. Based on the research data, the porosity coefficient and the density index of the sand layer, being the subgrade of the road embankment, were obtained. The article presents a comparison between the results calculated before and after the work. **Practical importance:** When comparing the results of cone penetration test in soil, obtained at different stages of work, the conclusion was made that the sands in the subgrade of the road embankment were compacted. This fact implies that the application of drilling and blasting technology at sand drains formation results both in weak soils stabilization and also in loose sands compaction. The range of conducted works provides durability and stability in the subgrade of the road embankment.

Keywords: Sandy soils density, road embankment basis, sandy soils compaction with explosions use, static sounding, coefficient of soil porosity.

В мировой практике строительства известны технологии, позволяющие поддерживать стабильное состояние земляного полотна, а также его долговечность, обеспечивая тем самым безопасность движения транспортных средств, сохранность дорожной одежды или верхнего строения железнодорожного пути [1].

Начиная 1949 г. в Ленинграде под руководством В. А. Флорина, профессора Ленинградского политехнического института (ныне СПбГТУ), проводились обширные теоретические и экспериментальные исследования явлений разжижения и уплотнения несвязных грунтов при динамических воздействиях, в результате чего были разработаны методики, позволяющие оценить плотность и динамическую устойчивость грунтов, а также рекомендации к уплотнению несвязных водонасыщенных грунтов взрывами.

Успешное применение взрывов для уплотнения водонасыщенных песчаных грунтов в СССР было связано в основном с гидротехническим строительством. Впервые в больших объемах уплотнение грунтов было выполнено на строительствах Волжской и Горьковской ГЭС сотрудниками лаборатории механики грунтов Ленинградского политехнического института в 1951–1953 гг. На этих объектах глубинными и поверхностными взрывами качественно уплотнено более 150 тыс. м^3 песчаных грунтов [2].

Технология с использованием энергии взрыва применялась для уплотнения грунтов при возведении комплекса защитных сооружений Ленинграда от наводнений в 1987–1988 гг. Из зарубежного опыта развития стабилизации грунтов взрывами известны примеры строительства автострад на территории Польши.

Взрывами возможно не только стабилизировать водонасыщенные несвязные грунты (пески, плывуны, каменные наносы), но и основания, сложенные органическими грунтами (торф, ил, сапропель), а также уплотнить рыхлые пески, из которых формируется основание дорожной насыпи [3].

Специалистами кафедры «Основания и фундаменты» ПГУПС под руководством проф. В. М. Улицкого разработана и утверждена проектная документация, а также выполнена научно-исследовательская работа как по закреплению и усилению слабой толщи под основанием насыпи, так и по уплотнению песка дорожного полотна с помощью песчаных дрен, образованных с использованием буровзрывной технологии.

Участок входит в состав скоростной автомобильной дороги Москва – Санкт-Петербург, находящийся в Бологовском районе Тверской области. Строительная площадка представляет собой подход к мосту через р. Коломенка длиной 300 м и шириной 64 м.

Первоначальное положение моста предполагалось над руслом реки, через которое был запроектирован однопролетный мост с подходными насыпями высотой до 5 м. При забивке опытных свай под мостовую опору происходило их погружение на бóльшую глубину, чем в проекте («сваи проваливались»). Устройство свайного поля оказалось невозможным из-за неточных изысканий. В связи с этим проектировщики приняли решение о переносе русла в новое местоположение, и запроектированный ранее мост был построен на 150 м дальше первоначального положения. Оставалась нерешенной проблема создания подходной насыпи к мосту на участке, где ранее протекала река.

Проблема, с которой столкнулись при производстве работ на подходах к мосту, заключалась в потере устойчивости земляного полотна. Перед специалистами ПГУПС стояла задача с помощью буровзрывной технологии [4] сформировать вертикальные песчаные дрены, ускоряющие консолидацию слабых органических (торфов) и связных текучих и текучепластичных (суглинков и глин) грунтов, а также уплотнить рыхлые пески, из которых устраивалось основание дорожной насыпи.

Создание песчаных дрен в грунтовом основании с использованием энергии взрыва традиционно заключается во взрывании удлиненного заряда на всю глубину камуфлетной скважины с заданным шагом [5]. Нами применялись раз-

личные длины зарядов, а также варьировалась сетка расположения шага скважин. Результаты использования данной методики контролировались геодезическими наблюдениями и статическим зондированием.

Научно-исследовательские работы по оценке качества работ включали: 1) проведение инженерно-геофизических изысканий по характерным разрезам; 2) мониторинг изменения порового давления в толще песчаных и глинистых грунтов; 3) геодезический мониторинг осадочных марок.

В начале производства работ по бурению камуфлетных скважин специалистами ПГУПС были выявлены существенные отличия в напластовании грунтов от ранее представленных в материалах изысканий. В связи с этим дополнительно исследовалось геологическое строение территории под проектируемой насыпью, уточнялись инженерно-геологические разрезы и свойства слагающих его грунтов. Инженерно-геологические условия рассматриваемого участка осложнены наличием болотных отложений (торф и заторфованные пески) и «слабых грунтов», представленных глинами текучими, суглинками текучими и текучепластичными.

Геофизическими методами контролировалось изменение плотности сложения и влажности массива грунта [6], которые изменялись в процессе ведения буровзрывных работ. Геофизические методы включали электроразведку,

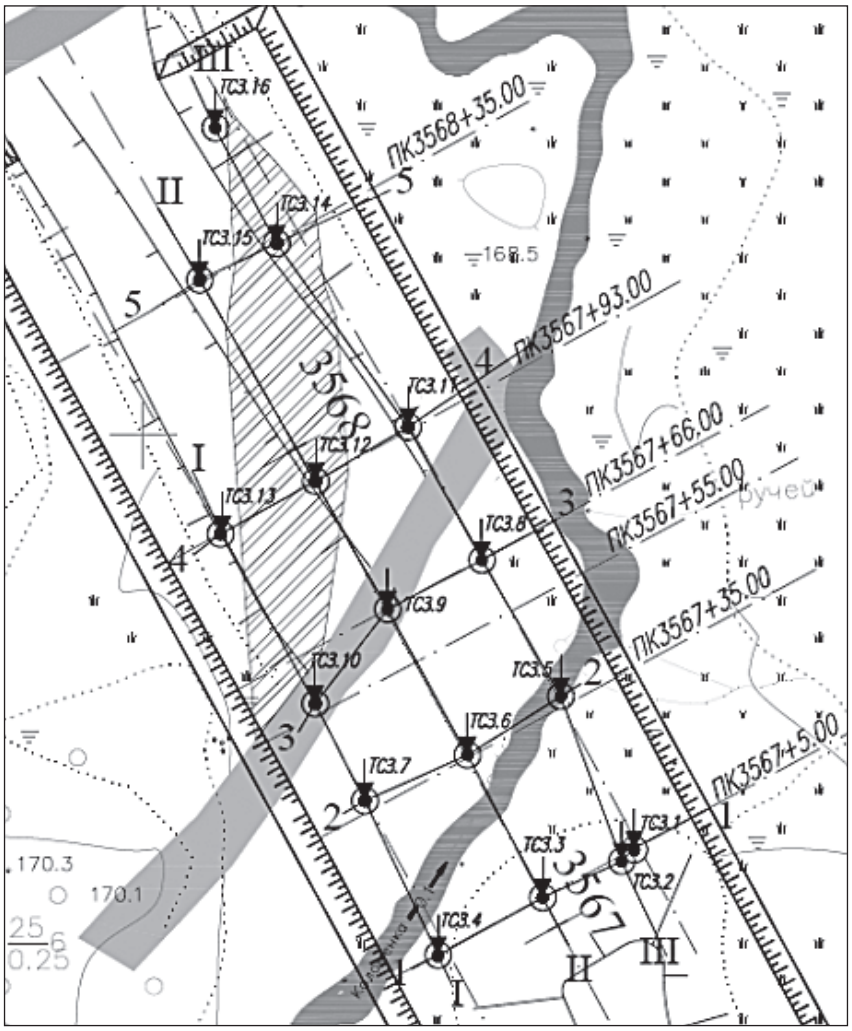


Рис. 1. План производства работ с расположением ТСЗ
(ПК – пикет, разрезы: 1–5 – поперек дороги, I–III – вдоль дороги)

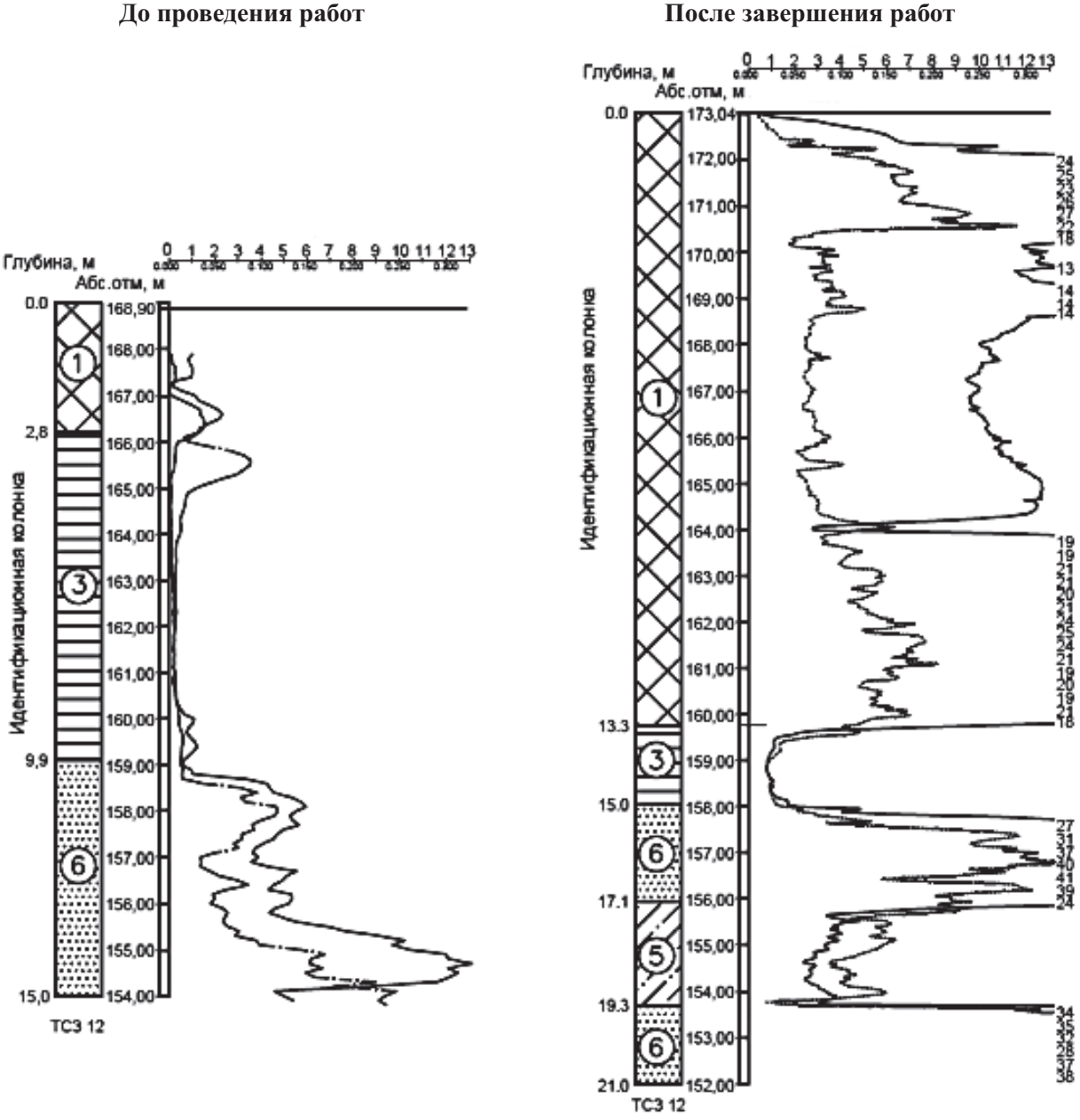


Рис. 2. Паспорт испытания грунтов статическим зондированием:
цифры в кружках: 1 – насыпные пески (t, IV); 3 – глина текучая, суглинки текучепластичные и текучие (QIII-IV); 5 – супесь твердая и пластичная (g, QIII); 6 – пески разной крупности (QII-III). Сплошная кривая – лобовое сопротивление, q_c, МПа, штрихпунктирная – боковое трение, f_s, МПа

сейсморазведку и георадиолокационное профилирование. Их результаты позволили подтвердить факт стабилизации грунтового основания. Работы выполнялись с привлечением специалистов Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

Данные комплексных инженерно-геофизических исследований показали, что после проведения взрывных работ до глубины 20 м от поверхности наблюдаются уменьшение скоростей продольных волн и увеличение скоростей поперечных волн, что свидетельствует

ТАБЛИЦА 1. Изменение коэффициента пористости для различных этапов работ

ТСЗ по оси автомобильной дороги	Коэффициент пористости				Соотношение изменения плотности сложения, %
	1-й этап	Плотность сложения	2-й этап	Плотность сложения	
3	0,674	Средняя	0,513	Плотный	24
6	0,586	Средняя	0,499	Плотный	15
9	0,640	Средняя	0,640	Средняя	0
12	0,667	Средняя	0,550	Плотный	17
15	0,547	Плотный	0,536	Плотный	2

о произошедшем уплотнении грунтов и понижении их влажности.

Геодезические наблюдения за высотным положением осадочных марок, установленных по оси земляного полотна и пригрузочным бермам, позволило оценить абсолютные величины деформаций, неравномерности и скорости их развития.

В процессе работ, выполненных ПГУПС, проводилось бурение контрольных скважин и вблизи каждой скважины выполнялась точка статического зондирования (ТСЗ). Полученные данные позволили оценить изменения, происходящие в массиве грунта, и качество выполненных буровзрывных работ [7]. План расположения ТСЗ представлен на рис. 1.

Анализ данных зондирования до и после стабилизации грунтов подтвердил факт уплотнения рыхлых песков. Для наглядности на рис. 2 представлено изменение геологического разреза, исследуемого в одной и той же ТСЗ до начала и после завершения работ. В результате зафиксировано не только увеличение лобового и бокового сопротивлений грунта, но и уменьшение мощности слабого слоя (см. рис. 2, слой 3). Из разреза видно, что насыпной песок (слой 1), ранее находившийся в рыхлом состоянии, был уплотнен до плотного состояния. При этом для обеспечения проектной отметки верха дорожной насыпи дополнительно производилась отсыпка песка. Таким образом, произошло увеличение мощности слоя 1 от 2,6 до 13,3 м.

Стабилизация проводилась в несколько этапов. Для подтверждения качества уплотнения песчаного грунта в табл. 1 и 2 приведены результаты, в которых сравнивалось изменение коэффициента пористости и плотности сложения песчаного слоя.

По полученным величинам сопротивления зонда перерасчетом определен коэффициент пористости на 1-м и 2-м этапах производства буровзрывных работ. Результаты сопоставления значений коэффициента пористости представлены в табл. 1.

Плотность сложения песчаных грунтов выполнена в соответствии с ГОСТ 25100–2011 [8]. По данным табл. 1 можно судить об уменьшении коэффициента пористости и изменении плотности сложения.

По величинам бокового сопротивления, согласно [9], найдена степень плотности сложения песков на 1-м и 3-м этапах производства буровзрывных работ. Результаты сопоставления сведены в табл. 2. Плотность сложения песков определялась с интервалом в 1 м по глубине исследуемого разреза.

Пески, из которых формировалось основание дорожной насыпи, уплотнились в результате работ. Отсюда следует, что применение буровзрывной технологии, сопровождающееся образованием песчаных дрен, позволяет не только стабилизировать толщу слабых грунтов, но и уплотнить рыхлые пески [10]. Комплекс проведенных работ обеспечивает прочность и устойчивость земляного полотна дорожной насыпи.

В результате увеличения скоростей и нагрузок от транспорта и подвижного состава на

ТАБЛИЦА 2. Результаты сопоставления степени плотности сложения песков на 1-м и 3-м этапах производства буровзрывных работ

Отметка	Глубина, м	ТСЗ 15				ТСЗ 9				ТСЗ 3			
		Результаты на 1-м этапе		Результаты на 3-м этапе		Результаты на 1-м этапе		Результаты на 3-м этапе		Результаты на 1-м этапе		Результаты на 3-м этапе	
		q_c, МПа	I_d	q_c, МПа	I_d	q_c, МПа	I_d	q_c, МПа	I_d	q_c, МПа	I_d	q_c, МПа	I_d
172,25	0	7,4	Средней плотности	21,5	Очень плотные	9,9	Средней плотности			0,08	Очень рыхлые		
171,25	1	5,9	Средней плотности	10,0	Плотные	2,8	Рыхлые	33,2	Очень плотные	4,3	Рыхлые	15,5	Средней плотности
170,25	2	4,1	Рыхлые	5,7	Средней плотности	3,9	Рыхлые	9,8	Средней плотности	3,5	Рыхлые	12,1	Средней плотности
169,25	3	4,2	Рыхлые	8,8	Средней плотности	3,1	Рыхлые	23	Очень плотные	3,9	Рыхлые	10,3	Средней плотности
168,25	4	3,9	Рыхлые	10,7	Плотные	3	Рыхлые	23,1	Очень плотные	3,3	Рыхлые	12,6	Средней плотности
167,25	5	4,2	Рыхлые	13,2	Плотные	3,1	Рыхлые	25,3	Очень плотные	6,8	Средней плотности	13,3	Средней плотности
166,25	6	5,6	Средней плотности	14,3	Плотные	5,7	Средней плотности	15	Плотные	4,7	Рыхлые	23	Очень плотные
165,25	7	6,6	Средней плотности	15,1	Плотные	5,9	Средней плотности	12	Плотные	7,2	Средней плотности	18,2	Средней плотности
164,25	8	6,4	Средней плотности	15,4	Плотные	3,4	Рыхлые	11,5	Плотные	7,7	Средней плотности	23,3	Очень плотные

Окончание табл. 2

Отметка	Глубина, м	ТСЗ 15				ТСЗ 9				ТСЗ 3			
		Результаты на 1-м этапе		Результаты на 3-м этапе		Результаты на 1-м этапе		Результаты на 3-м этапе		Результаты на 1-м этапе		Результаты на 3-м этапе	
		q_c, МПа	I_d	q_c, МПа	I_d	q_c, МПа	I_d	q_c, МПа	I_d	q_c, МПа	I_d	q_c, МПа	I_d
163,25	9	3,7	Средней плотности	2	Очень рыхлые	4,5	Рыхлые	23,8	Очень плотные	5,9	Средней плотности	15,3	Средней плотности
162,25	10	6,6	Средней плотности	16,8	Плотные	5,9	Средней плотности	16,9	Плотные	5,1	Средней плотности	19,4	Средней плотности
161,25	11	23,0	Очень плотные	23,2	Очень плотные	5,9	Средней плотности	17,5	Плотные	5,3	Средней плотности	14,2	Средней плотности
160,25	12	30,0	Очень плотные	28,8	Очень плотные	6,14	Средней плотности	16,7	Плотные	5,4	Средней плотности	13,2	Средней плотности
159,25	13			28,9	Очень плотные	8,4	Средней плотности	17,1	Плотные	4,9	Рыхлые	12,7	Средней плотности
158,25	14			35,7	Очень плотные	5,2	Средней плотности	16	Плотные	5,6	Средней плотности	12,7	Средней плотности
157,25	15			43,4	Очень плотные	0,9	Очень рыхлые	19,1	Плотные	4,5	Рыхлые	13,5	Средней плотности
156,25	16					1,0	Очень рыхлые			6,5	Средней плотности	16,1	Средней плотности

грунты основания дорожного полотна необходимо решать вопросы его стабилизации на стадии строительства, используя современные и экономически рациональные технологии. В связи с этим важно проводить исследования в области уплотнения и стабилизации слабых грунтов.

Библиографический список

1. Городнова Е. В. Реконструкция промышленных объектов в сложных инженерно-геологических условиях Северо-Запада / Е. В. Городнова, А. В. Бенин // Сб. трудов XI науч.-практич. конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». – СПб. : Нац. минер.-сырьевой ун-т «Горный» ; М. : Геомаркетинг, 2015. – С. 26–29.

2. Улицкий В. М. Усиление слабых грунтов оснований дорожных сооружений / В. М. Улицкий, М. А. Шашкин, Е. В. Городнова, Z. Sikora, M. Wyroslak // Сб. трудов Междунар. науч.-технич. конференции «Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение», посвященной 80-летию образования кафедры геотехники СПбГАСУ и 290-летию Российской науки. – СПб. : СПбГАСУ, 2014. – Ч. I. – С. 101–109.

3. Улицкий В. М. Стабилизация грунтов в основаниях дорожных сооружений по технологии микровзрывов / В. М. Улицкий, Р. Имиолек, Е. В. Городнова, М. А. Шашкин // Дороги. Инновации в строительстве. – 2013. – № 30. – С. 95–96.

4. Улицкий В. М. Стабилизация грунтов при строительстве железных и автомобильных дорог микровзрывами / В. М. Улицкий, Е. В. Городнова // Сб. трудов III Междунар. науч.-технич. конференции ФГБОУ ВПО ПГУПС «Применение геоматериалов при строительстве и реконструкции транспортных объектов». – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 56–57.

5. Иванов П. Л. Уплотнение малосвязных грунтов взрывами / П. Л. Иванов. – М. : Недра, 1983. – 230 с.

6. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. – М. : Министерство транспорта Российской Федерации; Федеральное дорожное агентство, 2004. – 62 с.

7. Болдырев Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса : монография / Г. Г. Болдырев. – Пенза : ПГУАС, 2008. – 696 с.

8. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. – М. : Стандартинформ, 2011. – 38 с.

9. Свод правил 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. – М. : Федеральное агентство по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству, 2012. – 160 с.

10. Кушнарев Д. М. Использование энергии взрыва в строительстве / Д. М. Кушнарев. – М. : Стройиздат, 1973. – 288 с.

References

1. Gorodnova E. V. & Benin A. V. Rekonstruktsiya promyshlennykh obyektov v slozhnykh inzhenerno-geologicheskykh usloviyakh Severo-Zapada [Industrial reconstruction in complex geotechnical conditions of North-West]. *Sbornik trudov XI nauchno-prakticheskoy konferentsii "Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitelstve v Rossiyskoy Federatsii"* [*Coll. papers of the 11th research and practical conference "Development prospects of engineering investigations in building in the Russian Federation"*]. Saint Petersburg, Saint Petersburg Mining University Publ., Moscow, Geomarketing Publ., 2015, pp. 26–29. (In Russian)

2. Ulitskiy V. M., Shashkin M. A., Gorodnova E. V., Sikora Z. & Wyroslak M. Usileniye slabykh gruntov osnovaniy dorozhnykh sooruzheniy [Soil strengthening for the subgrade support]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremenniye geotekhnologii v stroitelstve i ikh nauchno-tekhnicheskoye soprovozhdeniye"*, *posvyashchennoy 80-letiyu obrazovaniya kafedry Geotekhniky SPbGASU i 290-letiyu Rossiyskoy nauky* [*Coll. papers of the International research and technical conference "Modern geotechnologies in building and R&D support"*, *dedicated to the 80th anniversary of SPbGASU Geotechnics Chair foundation and 290th anniversary of the Russian Science*]. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2014, pt I, pp. 101–109. (In Russian)

3. Ulitskiy V. M., Imiolek R., Gorodnova E. V. & Shashkin M. A. Stabilizatsiya gruntov v osnovaniyakh dorozhnykh sooruzheniy po tekhnologii mikrovzryvov

[Soil stabilization in the road structure bases using the technology of microexplosions]. *Dorogy. Innovatsii v stroitelstve* [*Roads. Innovations in building*], 2013, no. 30, pp. 95–96. (In Russian)

4. Ulitskiy V. M. & Gorodnova E. V. Stabilizatsiya gruntov pry stroitelstve zheleznykh i avtomobilnykh dorog mikrovzryvamy [Soil stabilization during the construction of railroads and motorways by means of microexplosions]. *Sbornik trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii FGBOU VPO PGUPS "Primeneniye geomaterialov pry stroitelstve i rekonstruktsii transportnykh obyektov"* [*Coll. papers of the 3rd International research and training conference FGBOU VPO PGUPS "Application of geomaterials in building and reconstruction of transportation facilities"*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, pp. 56–57. (In Russian)

5. Ivanov P. L. *Uplotneniye malosvyznykh gruntov vzryvamy* [*Soil compaction with explosions*]. Moscow, Nedra Publ., 1983, 230 p. (In Russian)

6. *Posobie po proektirovaniyu zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog na slabyh gruntah* [*Textbook for projecting earthen linen of motor*(*-car*) *roads on weak soils*]. Moscow, Ministerstvo transporta Rossijskoj Federacii, Federal'noe dorozhnoe agentstvo, 2004, 62 p. (In Russian)

7. Boldyrev G. G. *Metody opredeleniya mekhanicheskykh svoistv gruntov. Sostoyaniye voprosa* [*Test methods on mechanical behavior of soil. State-of-the-art*]. Penza, Penza State University of Architecture and Building Publ., 2008, 696 p. (In Russian)

8. *GOST 25100–2011. Grunty. Klassifikatsiya* [*State Standard 25100–2011. Soils. Classification*]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 38 p. (In Russian)

9. Svod pravil 47.13330.2012. Inzhenerniye izyskaniya dlya stroitelstva. Osnovniye polozheniya [*Regulations 47.13330.2012. Geotechnical investigations for construction. Guidelines*]. Moscow, Federal'noe agentstvo po stroitelstvu i zhilizhno-kommunal chozaistvo Publ., 2012, 160 p. (In Russian)

10. Kushnarev D. M. *Ispolzovaniye energii vzryva v stroitelstve* [*The use of explosion energy in building*]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1973, 288 p. (In Russian)

ГОРОДНОВА Елена Владимировна – канд. техн. наук, доцент; elena.gorodnova@mail.ru; МИНЧЕНКО Анастасия Андреевна – канд. геол.-минер. наук, ассистент, anastasija.korobko@yandex.ru; *СУВОРОВА Екатерина Андреевна – аспирант, suvorova_e_a@gmail.com. (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.424.1

В. В. Грачев

МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ОХЛАЖДАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ ТЕПЛОВОЗА

Дата поступления: 15.03.2018
Решение о публикации: 12.04.2018

Аннотация

Цель: Разработка математической модели нестационарного теплообмена в охлаждающем устройстве (ОУ) тепловоза, обеспечивающей возможность анализа влияния краевых условий (коэффициентов теплоотдачи, температур или тепловых потоков на границах элементов системы) на динамические характеристики ОУ как объекта регулирования и диагностики. **Методы:** Описание нестационарного теплообмена в элементах ОУ осуществляется с использованием метода элементарных балансов, законов термодинамики, методов решения нелинейных алгебраических уравнений. **Результаты:** Разработана математическая модель работы ОУ тепловоза в переходных режимах, вызванных изменением режима работы силовой установки тепловоза, вентиляторов ОУ, температуры окружающего воздуха и технического состояния ОУ. **Практическая значимость:** Предложенная модель может применяться для отладки алгоритмов управления работой ОУ тепловоза и диагностирования его технического состояния по данным подсистемы бортовой диагностики.

Ключевые слова: Нестационарный теплообмен, охлаждающее устройство тепловоза, математическая модель, подсистема бортовой диагностики.

Vladimir V. Grachev, Cand. Eng. Sci., associate professor, v_Grach@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) UNSTEADY HEAT TRANSFER MODEL IN THE COOLING APPARATUS OF THE DIESEL LOCOMOTIVE

Summary

Objective: To develop a mathematical model of unsteady heat transfer in a cooling apparatus (CA) of a diesel locomotive. The model in question makes it possible to perform influence analysis of boundary conditions (heat-exchange coefficients, temperatures or heat flow rates on the boundaries of elements of the system) on the dynamic behavior of the CA as an object of control and diagnostic operation. **Methods:** The description of unsteady heat transfer in components of the CA was carried out by means of the balance method, laws of thermodynamics, as well as methods for solving nonlinear algebraic equations. **Results:** The mathematical model of the CA diesel locomotive operation was developed in transient conditions. The latter were caused by interruptions in operating conditions of power equipment of the diesel locomotive, the CA fans, free-air temperature and the CA technical condition. **Practical importance:** The presented model can be used in testing the CA operation control algorithms and diagnosis of its technical condition according to the data obtained from the subsystem of on-board diagnostics.

Keywords: Unsteady heat transfer, cooling apparatus of a diesel locomotive, mathematical model, subsystem of on-board diagnostics.

Постановка задачи

Практически все известные методы контроля технического состояния охлаждающих устройств (ОУ) предполагают определение коэффициентов теплопередачи теплообмен-

ных аппаратов системы на основании решения уравнений теплообмена и теплового баланса в установившемся режиме работы [1–4].

При использовании релейной системы управления вентиляторами ОУ всегда работает в неустановившихся (нестационарных) режимах, поэтому применять такие методы для оперативного контроля его технического состояния невозможно.

Между тем состояние теплообменных аппаратов оказывает влияние не только на показатели теплового баланса ОУ в установившемся режиме работы, но и на динамические характеристики ОУ в переходных режимах. Однако эти характеристики практически не используются для диагностики ОУ. В [5] описаны способы оценки теплорассеивающей способности (ТРС) ОУ тепловоза по скорости изменения температуры теплоносителя в переходных режимах работы ОУ или силовой установки тепловоза. Однако данные способы предполагают известными значения теплоотдачи в теплоноситель во всех режимах работы дизеля и законы ее изменения в переходных процессах, равно как и законы изменения искомых показателей ТРС ОУ в этих процессах, в связи с чем точность и достоверность таких способов требует весьма тщательной проверки.

С целью анализа влияния различных параметров состояния ОУ на ее динамические характеристики была разработана одномерная конечно-разностная модель теплопередачи в ОУ (рис. 1), решающая задачу расчета нестационарного теплообмена в элементах ОУ при работе последней в переходных режимах, вызванных изменением краевых условий (коэффициентов теплоотдачи, температур или тепловых потоков на границах элементов системы).

Основные принципы построения модели теплопередачи в ОУ

В модели анализируется тепловое состояние двух основных агрегатов ОУ: источника

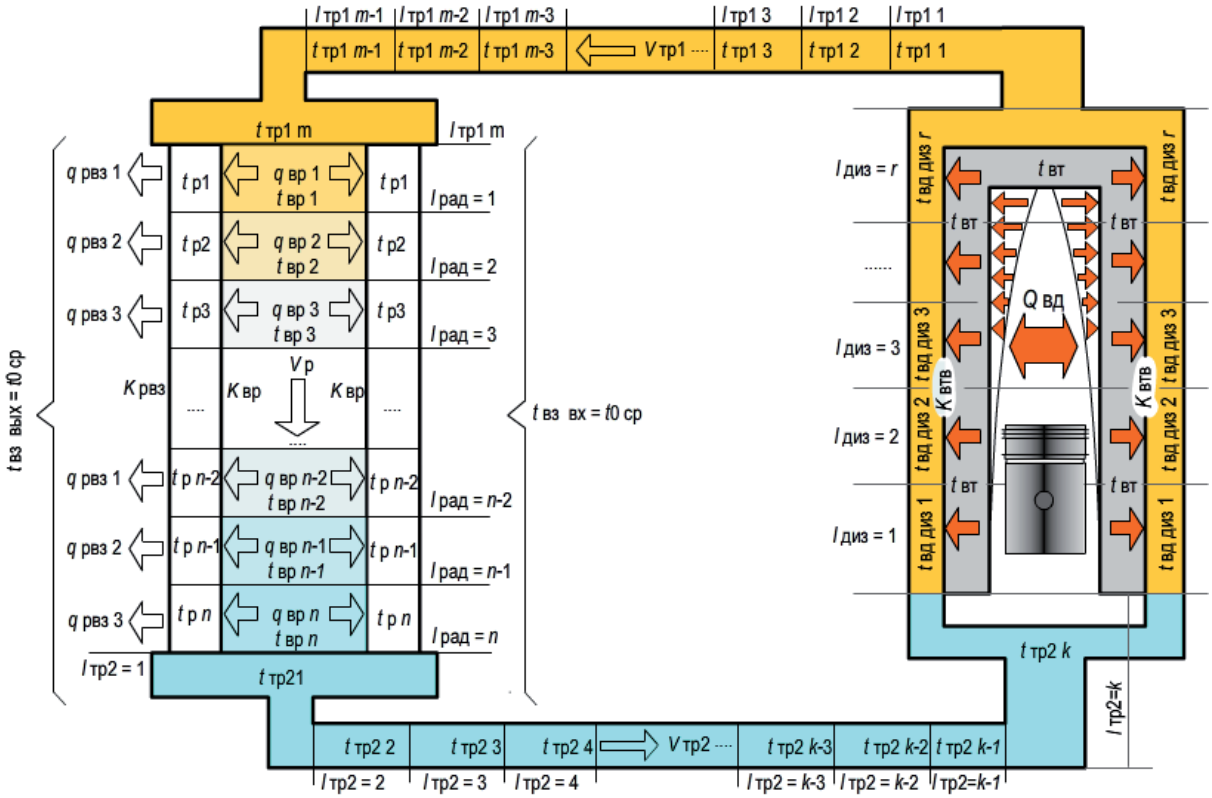


Рис. 1. Структурная схема модели теплопередачи в ОУ дизеля

тепловой энергии, выделяемой в теплоноситель (цилиндра дизеля), и теплоотводящего устройства (радиатора), связанных между собой «горячей» и «холодной» трубами.

Для каждого из агрегатов рассматриваются область теплоносителя и область оболочки, через которую осуществляется теплообмен с окружающей средой (охлаждающий воздух или рабочее тело в камере сгорания цилиндра). Каждая из областей разбивается на элементарные геометрические формы, соответствующие объемам теплоносителя и оболочки, заключенным между двумя изотермическими плоскостями, которые перпендикулярны вектору скорости движения теплоносителя. При этом расстояние dx между плоскостями в каждой элементарной форме равно перемещению теплоносителя за выбранный шаг интегрирования $d\tau$. Принимается, что движение теплоносителя в каждом агрегате ОУ ламинарное, скорость движения теплоносителя в пределах каждого элементарного объема постоянна и определяется текущей производительностью насоса, поперечное сечение элементарного объема оболочки не зависит от ее радиуса, что дает возможность считать конечно-разностную модель ОУ плоскосимметричной с регулярной сеткой в пределах каждого агрегата ОУ.

Теплообмен между элементарными объемами каждой расчетной области (теплоносителем и оболочкой) задается граничными условиями третьего рода, коэффициент теплообмена принимается постоянным по всей поверхности теплообмена в агрегате ОУ.

Принятые допущения позволяют использовать для описания теплового состояния элементарных объемов в каждой расчетной области метод элементарных балансов [6, 7], причем каждый элементарный объем рассматривается как условный параллелепипед (рис. 2, 3) и обладает следующими свойствами:

1) параллельные плоскости, перпендикулярные вектору скорости теплоносителя, являются изотермическими поверхностями, изменение температуры между ними внутри параллелепипеда теплоносителя линейно, внутри параллелепипеда оболочки – отсутствует;

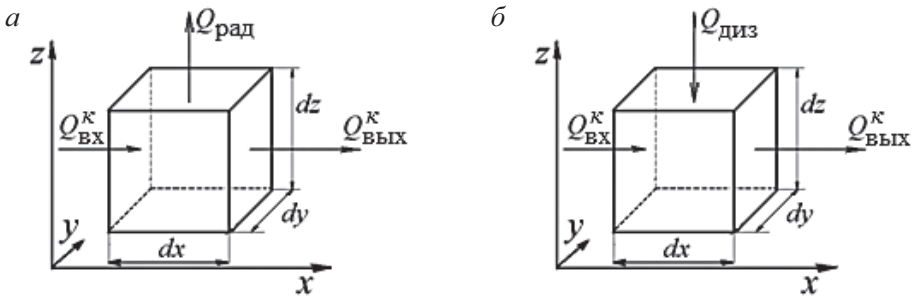


Рис. 2. Элементы потока теплоносителя в трубках радиатора (*а*) и водяной полости втулки цилиндра дизеля (*б*)

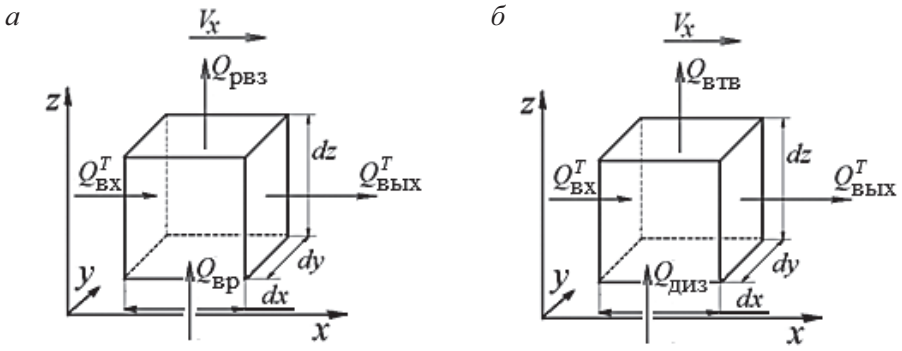


Рис. 3. Элементы оболочки радиатора (*а*) и втулки цилиндра дизеля (*б*)

2) температура во всех точках любого поперечного (т. е. перпендикулярного вектору скорости теплоносителя) сечения параллелепипеда одинакова и равна температуре на оси параллелепипеда;

3) средний за время $d\tau$ поток через все боковые поверхности пропорционален начальному в пределах шага $d\tau$ температурному градиенту, коэффициент теплообмена по всем боковым поверхностям одинаков;

4) изменение энтальпии параллелепипеда определяется изменением температуры в его средней точке;

5) перенос теплоты теплопроводностью внутри потока теплоносителя отсутствует.

Описание процессов теплопередачи в элементах ОУ и дизеля

Теплопередача в радиаторе

Тепловое состояние элементарного параллелепипеда в потоке жидкости зависит от конвективного теплообмена с предыдущим (относительно направления движения потока) параллелепипедом и теплоотдачи в стенку трубки радиатора.

Количество тепла (в кДж), поступившего в текущий i-й элементарный параллелепипед из предыдущего $(i-1)$-го элемента за время $d\tau$ в результате конвекции, определяется по формуле

$$dQ_{\text{вх}} = v_x \cdot dy \cdot dz \cdot \rho_{\text{в}} \cdot C_v(t_{\text{вых}}^{i-1}) \cdot t_{\text{вых}}^{i-1} \cdot d\tau,$$

в которой v_x – скорость движения потока, м/с; $\rho_{\text{в}}$ – плотность теплоносителя (воды), кг/м^3; $t_{\text{вых}}^{i-1}$ – температура теплоносителя в плоскости $x = 0$ (на выходе из предыдущего по потоку элемента), °С; $C_v(t_{\text{вых}}^{i-1})$ – теплоемкость теплоносителя (воды) при температуре $t_{\text{вых}}^{i-1}$, кДж/кг·гр.

Количество тепла (в кДж), унесенного конвекцией из текущего i-го элементарного параллелепипеда в следующий по направлению движения потока элемент за время $d\tau$, равно

$$dQ_{\text{вых}} = v_x \cdot dy \cdot dz \cdot \rho_{\text{в}} \cdot C_v(t_{\text{вых}}^{i}) \cdot t_{\text{вых}}^{i} \cdot d\tau,$$

где $t_{\text{вых}}^{i}$ – температура теплоносителя в плоскости $x = dx$, °С.

Количество тепла (в кДж), отведенного из текущего i-го элементарного параллелепипеда в i-й элемент радиатора за время $d\tau$, составляет

$$dQ_{\text{рад}} = \left(\frac{t_{\text{вых}}^{i-1} + t_{\text{вых}}^{i}}{2} - t_{\text{р}}^{i}\right) \cdot \frac{K_{\text{вр}}}{l_{\text{рад}}} \cdot d\tau,$$

здесь $t_{\text{р}}^{i}$ – температура элемента радиатора, граничащего с рассматриваемым элементом потока, °С; $K_{\text{вр}}$ – коэффициент теплопередачи от воды к трубкам радиатора для всего ОУ, кВт/гр; $l_{\text{рад}} = b \cdot l_{\text{тр}}$ – количество элементарных параллелепипедов во всех трубках радиатора; b – количество трубок радиатора; $l_{\text{тр}}$ – количество элементов в одной трубке.

Уравнение элементарного теплового баланса потока теплоносителя в установившемся режиме работы ОУ

$$\begin{gathered} dQ_{\text{вх}} = dQ_{\text{вых}} + dQ_{\text{рад}} \rightarrow \\ \rightarrow v_x \cdot dy \cdot dz \cdot \rho_{\text{в}} \cdot C_v\left(t_{\text{вых}}^{i-1}\right) \cdot t_{\text{вых}}^{i-1} \cdot d\tau = \\ = v_x \cdot dy \cdot dz \cdot \rho_{\text{в}} \cdot C_v\left(t_{\text{вых}}^{i}\right) \cdot t_{\text{вых}}^{i} \cdot d\tau + \\ + \left(\frac{t_{\text{вых}}^{i-1} + t_{\text{вых}}^{i}}{2} - t_{\text{р}}^{i}\right) \cdot \frac{K_{\text{вр}}}{b \cdot l_{\text{тр}}} \cdot d\tau, \end{gathered}$$

откуда после элементарных преобразований получаем

$$\begin{gathered} C_v\left(t_{\text{вых}}^{i-1}\right) \cdot t_{\text{вых}}^{i-1} = C_v\left(t_{\text{вых}}^{i}\right) \cdot t_{\text{вых}}^{i} + \\ + \left(\frac{t_{\text{вых}}^{i-1} + t_{\text{вых}}^{i}}{2} - t_{\text{р}}^{i}\right) \cdot \frac{K_{\text{вр}}}{g \cdot l_{\text{тр}}}, \end{gathered} \qquad (1)$$

где g – производительность водяного насоса, кг/с.

При определении теплового состояния оболочек (трубок радиатора и стенок гильз цилиндра) в дополнение к перечисленным выше допущениям учитываются еще два: темпера-

тура в каждой точке *i*-го элемента оболочки в течение шага $d\tau$ остается постоянной; градиент температуры внутри каждого элемента оболочки равен нулю.

С учетом этих допущений развернутое уравнение элементарного теплового баланса для элемента трубки радиатора имеет вид

$$\left(t_{\text{р}}^{i}-t_{\text{вз}}\right)\cdot K_{\text{рвз}}=\frac{\lambda_{\text{р}}}{\rho_{\text{р}}}\cdot\frac{t_{\text{р}}^{i-1}-2\cdot t_{\text{р}}^{i}+t_{\text{р}}^{i+1}}{\Delta x^{2}}\times$$
$$\times M_{\text{р}}+(\frac{t_{\text{вых}}^{i-1}+t_{\text{вых}}^{i}}{2}-t_{\text{р}}^{i})\cdot K_{\text{вр}}, \qquad (2)$$

здесь $M_{\text{р}}$ – масса радиатора ОУ, кг; $t_{\text{вз}}$ – средняя температура воздуха, °С; $\lambda_{\text{р}}$ – коэффициент теплопроводности меди, кВт/м·гр; $\rho_{\text{р}}$ – плотность меди, кг/м^3; Δx – длина элемента трубки радиатора, м.

Уравнения (1) и (2) описывают стационарный теплообмен в элементарном объеме потока теплоносителя и трубки радиатора. Если допустить, что проходное сечение и условия внутреннего и внешнего теплообмена во всех трубках радиатора одинаковы, то, поскольку теплоноситель движется параллельно по всем *b* трубкам радиатора, уравнения (1) и (2) могут быть отнесены к элементам длиной *dx* одновременно всех *b* трубок радиатора, т. е. к *элементарному слою* радиатора.

В неустановившемся режиме работы ОУ разность между количеством тепловой энергии, подведенной к элементу потока теплоносителя и оболочки и отведенной от него, расходуется на увеличение энтальпии элементарного объема соответственно потока и оболочки. В этом случае уравнения элементарных балансов для элементарного слоя радиатора длиной (высотой) $dx=v_x\cdot d\tau$ можно записать так:

– для теплоносителя

$$g\cdot C_v\left(t_{\text{вых}}\right)\cdot dt_{\text{вых}}=$$
$$=dQ_{\text{вх}}-\left(dQ_{\text{вых}}+dQ_{\text{то}}\right)\rightarrow$$
$$\rightarrow\frac{dt_{\text{вых}}^{i}}{d\tau}=\frac{C_v\left(t_{\text{вых}}^{i-1}\right)}{C_v\left(t_{\text{вых}}^{i}\right)}\cdot t_{\text{вых}}^{i-1}-t_{\text{вых}}^{i}-$$
$$-(\frac{t_{\text{вых}}^{i-1}+t_{\text{вых}}^{i}}{2}-t_{\text{р}}^{i})\cdot\frac{K_{\text{вр}}}{l_{\text{тр}}\cdot g\cdot C_v\left(t_{\text{вых}}^{i}\right)}; \qquad (3)$$

– для радиатора

$$dt_{\text{р}}\cdot C_{\text{р}}\left(t_{\text{р}}\right)\cdot\frac{M_{\text{р}}}{b\cdot l_{\text{тр}}}=dQ_{\text{вх}}^{\text{Т}}+dQ_{\text{вр}}-dQ_{\text{рвз}}\rightarrow$$
$$\rightarrow\frac{dt_{\text{р}}^{i}}{d\tau}=\frac{\lambda_{\text{р}}}{\rho_{\text{р}}\cdot C_{\text{р}}\left(t_{\text{р}}^{i}\right)}\cdot\frac{\partial^2 t_{\text{р}}}{\partial x^2}+$$
$$+\left(\frac{t_{\text{вых}}^{i-1}+t_{\text{вых}}^{i}}{2}-t_{\text{р}}^{i}\right)\times$$
$$\times\frac{K_{\text{вр}}}{C_{\text{р}}\left(t_{\text{р}}^{i}\right)\cdot M_{\text{р}}}-(t_{\text{р}}^{i}-t_{\text{вз}})\cdot\frac{K_{\text{рвз}}}{C_{\text{р}}\left(t_{\text{р}}^{i}\right)\cdot M_{\text{р}}}. \qquad (4)$$

Уравнения (3) и (4) описывают нестационарный теплообмен в элементарном слое радиатора (теплоносителе и трубках). В разностной форме они будут иметь вид (в °С)

$$\Delta t_{\text{вых}}^{i}=$$
$$=\left(\begin{array}{c}\frac{C_v\left(t_{\text{вых}}^{i-1}\right)}{C_v\left(t_{\text{вых}}^{i}\right)}\cdot t_{\text{вых}}^{i-1}-t_{\text{вых}}^{i}-\\-(\frac{t_{\text{вых}}^{i-1}+t_{\text{вых}}^{i}}{2}-t_{\text{р}}^{i})\times\\\times\frac{K_{\text{вр}}}{l_{\text{р}}\cdot g\cdot C_v\left(t_{\text{вых}}^{i}\right)}\end{array}\right)\cdot\Delta\tau, \qquad (5)$$

$$\Delta t_{\text{р}}^{i}=\left(\begin{array}{c}\frac{\lambda_{\text{р}}}{\rho_{\text{р}}}\cdot\frac{t_{\text{р}}^{i-1}-2\cdot t_{\text{р}}^{i}+t_{\text{р}}^{i+1}}{\Delta x^{2}}+\\+\left(\frac{t_{\text{вых}}^{i-1}+t_{\text{вых}}^{i}}{2}-t_{\text{р}}^{i}\right)\times\\\times\frac{K_{\text{вр}}}{M_{\text{р}}}-(t_{\text{р}}^{i}-t_{\text{вз}})\cdot\frac{K_{\text{рвз}}}{M_{\text{р}}}\end{array}\right)\times$$
$$\times\frac{\Delta\tau}{C_{\text{р}}\left(t^{i}\right)}. \qquad (6)$$

Теплопередача в дизеле

При расчете теплового состояния охлаждающей жидкости и оболочки дизеля в дополнение к вышеуказанным учитываются следующие допущения:

1) весь подвод тепла к охлаждающей жидкости осуществляется в водяных полостях втулок и крышек цилиндров;

2) средняя величина тепловой мощности $Q_{\text{гвт}}$, отводимой от рабочего тела в стенки втулок цилиндров на каждой позиции контроллера, постоянна во времени и пропорциональна эффективной мощности дизеля;

3) удельный тепловой поток $q_{\text{гвт}}$ в стенку втулки изменяется по длине втулки в соответствии с зависимостью (в кВт/м)

$$q_{\text{гвт}}(x) = k \cdot x^2,$$

где $x = i \cdot dx$ – расстояние от начала водяной полости втулки до текущего i-го ее элемента, м.

Коэффициент k определяется из условия

$$Q_{\text{гвт}} = \int_0^{L_{\text{вт}}} k \cdot x^2 \cdot dx = k \cdot \frac{{L_{\text{вт}}}^3}{3} =$$

$$= K_{\text{вд}} \cdot N_{e\,\text{диз}} \rightarrow k = \frac{3 \cdot K_{\text{вд}} \cdot N_{e\,\text{диз}}}{{L_{\text{вт}}}^3},$$

в котором $Q_{\text{гвт}}$ – тепловая мощность, отводимая от рабочего тела в стенки втулок цилиндров, кВт; $L_{\text{вт}}$ – эквивалентная длина втулки цилиндра и крышки, м; $N_{e\,\text{диз}}$ – текущая эффективная мощность дизеля, кВт; $K_{\text{вд}}$ – коэффициент, характеризующий величину теплоотвода в воду в долях от эффективной мощности дизеля.

Тогда $q_{\text{гвт}}(x)$ равно (в кВт/м)

$$q_{\text{гвт}}(x) = k \cdot x^2 = \frac{3 \cdot K_{\text{вд}} \cdot N_{e\,\text{диз}}}{{L_{\text{вт}}}^3} \cdot x^2 =$$

$$= \frac{3 \cdot K_{\text{вд}} \cdot N_{e\,\text{диз}}}{{L_{\text{вт}}}^3} \cdot (i \cdot dx)^2.$$

Уравнение элементарного теплового баланса для i-го элементарного слоя теплоносителя водяной системы дизеля имеет вид

$$dQ_{\text{вд вых}} = dQ_{\text{вд вх}} + dQ_{\text{втв}} \rightarrow$$

$$\rightarrow C_v\left(t^{i-1}_{\text{вд вых}}\right) \cdot t^{i-1}_{\text{вд вых}} = C_v\left(t^{i}_{\text{вд вых}}\right) \cdot t^{i}_{\text{вд вых}} +$$

$$+ (t^{i}_{\text{вт}} - \frac{t^{i-1}_{\text{вд вых}} + t^{i}_{\text{вд вых}}}{2}) \cdot \frac{K_{\text{втв}}}{g \cdot l_{\text{диз}}}, \qquad (7)$$

где $t^{i}_{\text{вд вых}}$ – температура воды на выходе из i-го элементарного слоя дизеля, °С; $K_{\text{втв}}$ – коэффициент теплоотдачи от стенок втулок цилиндров дизеля в охлаждающую воду, кВт/°С; $l_{\text{диз}}$ – количество элементарных слоев водяной системы дизеля.

Запишем уравнение элементарного теплового баланса для элементарного слоя втулок системы охлаждения дизеля в установившемся режиме с учетом разностной аппроксимации второй производной:

$$dQ_{\text{втв}} = dQ_{\text{вт}} + dQ_{\text{гвт}} \rightarrow$$

$$\rightarrow (t^{i}_{\text{вт}} - \frac{t^{i-1}_{\text{вд вых}} + t^{i}_{\text{вд вых}}}{2}) \cdot \frac{K_{\text{втв}}}{M_{\text{вт}}} =$$

$$= \frac{\lambda_{\text{вт}}}{\rho_{\text{вт}}} \cdot \frac{t^{i-1}_{\text{вт}} - 2 \cdot t^{i}_{\text{вт}} + t^{i+1}_{\text{вт}}}{\Delta x^2} +$$

$$+ \frac{3 \cdot K_{\text{вд}} \cdot N_{e\,\text{диз}}}{{l_{\text{диз}}}^2 \cdot M_{\text{вт}}} \cdot i^2, \qquad (8)$$

здесь $M_{\text{вт}}$ – суммарная масса втулок с рубашками и крышек цилиндров дизеля, кг; $\lambda_{\text{вт}}$ – теплопроводность чугуна, кВт/м·°С; $\rho_{\text{вт}}$ – плотность чугуна, кВт/м·°С.

Уравнения (7) и (8) описывают стационарный теплообмен в элементарных слоях потока теплоносителя и элементов (втулок и крышек цилиндров) системы охлаждения.

В неустановившемся (нестационарном) режиме работы ОУ уравнения элементарных балансов для элементарных слоев $dx = v_x \cdot d\tau$ теплоносителя и железа системы охлаждения дизеля будут иметь вид

– для теплоносителя

$$dq_{\text{вд вых}} = dQ_{\text{вд вых}} - dQ_{\text{вд вх}} + dQ_{\text{втв}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{dt^i_{\text{вд вых}}}{d\tau} = \frac{C_v\left(t^{i-1}_{\text{вд вых}}\right)}{C_v\left(t^i_{\text{вд вых}}\right)} \cdot t^{i-1}_{\text{вд вых}} + \\ + \left(t^i_{\text{вт}} - \frac{t^{i-1}_{\text{вд вых}} + t^i_{\text{вд вых}}}{2}\right) \times \\ \times \frac{K_{\text{втв}}}{l_{\text{диз}} \cdot g \cdot C_v\left(t^i_{\text{вд вых}}\right)} - t^i_{\text{вд вых}}, \quad (9)$$

где $dq_{\text{вд вых}}$ – изменение энтальпии слоя теплоносителя, кДж;

для элементарного слоя железа системы охлаждения дизеля

$$dq_{\text{вт}} = dQ_{\text{вт}} + dQ_{\text{гвт}} - dQ_{\text{втв}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{dt^i_{\text{втвт}}}{d\tau} = \frac{\lambda_{\text{вт}}}{\rho_{\text{вт}} \cdot C_{\text{вт}}\left(t^i_{\text{вт}}\right)} \cdot \frac{\partial^2 t_{\text{вт}}}{\partial x^2} + \\ + \frac{3 \cdot K_{\text{вд}} \cdot N_{e\,\text{диз}}}{C_{\text{вт}}\left(t^i_{\text{вт}}\right) \cdot {l_{\text{диз}}}^2 \cdot M_{\text{вт}}} \cdot i^2 - \\ - (t^i_{\text{вт}} - \frac{t^{i-1}_{\text{вд вых}} + t^i_{\text{вд вых}}}{2}) \cdot \frac{K_{\text{втв}}}{C_{\text{вт}}\left(t^i_{\text{вт}}\right) \cdot M_{\text{вт}}}. \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) описывают нестационарный теплообмен в системе охлаждения дизеля. В разностной форме их можно записать следующим образом (в °С):

$$\Delta t^i_{\text{вд вых}} = \\ = \left(\begin{array}{c} \frac{C_v\left(t^{i-1}_{\text{вд вых}}\right)}{C_v\left(t^i_{\text{вд вых}}\right)} \cdot t^{i-1}_{\text{вд вых}} + \\ + \left(t^i_{\text{вт}} - \frac{t^{i-1}_{\text{вд вых}} + t^i_{\text{вд вых}}}{2}\right) \times \\ \times \frac{K_{\text{втв}}}{l_{\text{диз}} \cdot g \cdot C_v\left(t^i_{\text{вд вых}}\right)} - t^i_{\text{вд вых}} \end{array} \right) \cdot \Delta\tau, \quad (11)$$

$$\Delta t^i_{\text{вт}} = \\ = \left(\begin{array}{c} \frac{\lambda_{\text{вт}}}{\rho_{\text{вт}}} \cdot \frac{t^{i-1}_{\text{вт}} - 2 \cdot t^i_{\text{вт}} + t^{i+1}_{\text{вт}}}{\Delta x^2} + \\ + \frac{3 \cdot K_{\text{вд}} \cdot N_{e\,\text{диз}}}{{l_{\text{диз}}}^2 \cdot M_{\text{вт}}} \times \\ \times i^2 - (t^i_{\text{вт}} - \frac{t^{i-1}_{\text{вд вых}} + t^i_{\text{вд вых}}}{2}) \times \\ \times \frac{K_{\text{втв}}}{M_{\text{вт}}} \end{array} \right) \times \\ \times \frac{\Delta\tau}{C_{\text{вт}}\left(t^i_{\text{вт}}\right)}. \quad (12)$$

Решение уравнений модели теплопередачи в охлаждающем устройстве тепловоза

Решение уравнений модели осуществляется в два этапа. На первом этапе рассчитываются параметры установившегося режима работы ОУ решением системы нелинейных алгебраических уравнений (1), (2), (7), (8):

$$C_v\left(t^{i-1}_{\text{вых}}\right) \cdot t^{i-1}_{\text{вых}} = C_v\left(t^i_{\text{вых}}\right) \cdot t^i_{\text{вых}} + \\ + \left(\frac{t^{i-1}_{\text{вых}} + t^i_{\text{вых}}}{2} - t^i_{\text{р}}\right) \cdot \frac{K_{\text{вр}}}{g \cdot l_{\text{тр}}},$$

$$\left(t^i_{\text{р}} - t_{\text{вз}}\right) \cdot K_{\text{рвз}} = \frac{\lambda_{\text{р}}}{\rho_{\text{р}}} \cdot \frac{t^{i-1}_{\text{р}} - 2 \cdot t^i_{\text{р}} + t^{i+1}_{\text{р}}}{\Delta x^2} \times \\ \times M_{\text{р}} + \left(\frac{t^{i-1}_{\text{вых}} + t^i_{\text{вых}}}{2} - t^i_{\text{р}}\right) \cdot K_{\text{вр}},$$

$$i = 1, ..., l_{\text{рад}},$$

$$C_v\left(t^{j-1}_{\text{вд вых}}\right) \cdot t^{j-1}_{\text{вд вых}} = C_v\left(t^j_{\text{вд вых}}\right) \cdot t^j_{\text{вд вых}} + \\ + \left(t^i_{\text{вт}} - \frac{t^{j-1}_{\text{вд вых}} + t^j_{\text{вд вых}}}{2}\right) \cdot \frac{K_{\text{втв}}}{g \cdot l_{\text{диз}}},$$

$$\left(t^j_{\text{вт}} - \frac{t^{j-1}_{\text{вд вых}} + t^j_{\text{вд вых}}}{2}\right) \cdot \frac{K_{\text{втв}}}{M_{\text{вт}}} = \\ = \frac{\lambda_{\text{вт}}}{\rho_{\text{вт}}} \cdot \frac{t^{j-1}_{\text{вт}} - 2 \cdot t^j_{\text{вт}} + t^{j+1}_{\text{вт}}}{\Delta x^2} + \frac{3 \cdot K_{\text{вд}} \cdot N_{e\,\text{диз}}}{{l_{\text{диз}}}^2 \cdot M_{\text{вт}}} \cdot j^2,$$

$$j = 1, ..., l_{\text{диз}},$$

$$t^0_{\text{вых}} = t^{l\text{диз}}_{\text{вд вых}}, \quad (13)$$

$$t^0_{\text{вд вых}} = t^{l\text{рад}}_{\text{вых}},$$

$$t^0_{\text{р}} = t^0_{\text{вых}},$$

$$t^0_{\text{вт}} = t^{l\text{рад}}_{\text{вых}}.$$

В результате решения системы (13) определяются исходные установившиеся распределения температуры воды $t^1_{\text{вых}0},\ldots,t^{l\text{рад}}_{\text{вых}0}$ и трубок $t^1_{\text{тр}0},\ldots,t^{l\text{рад}}_{\text{тр}0}$ радиатора, а также температуры воды $t^1_{\text{вд вых}0},\ldots,t^{l\text{диз}}_{\text{вд вых}0}$ и средней температуры гильз цилиндров дизеля $t^1_{\text{вт}0},\ldots,t^{l\text{диз}}_{\text{вт}0}$ при известных коэффициентах теплоотдачи $K_{\text{вр}}$, $K_{\text{рвз}}$, $K_{\text{втв}}$, средней температуре воздуха в радиаторе $t_{\text{вз}}$, производительности водяного насоса g, мощности теплоотдачи в воду $K_{\text{вд}} \cdot N_{e\,\text{диз}}$.

Для охлаждающего устройства тепловоза 2ТЭ116У на 11-й позиции контроллера производительность водяного насоса основного контура охлаждения, согласно [8], составляет 18 кг/с. Для шага $d\tau$ = 0,1 с количеством элементов радиатора $l_{\text{рад}}$ = 17, дизеля $l_{\text{диз}}$ = 12, т. е. система (13) для 11-й позиции контроллера этого тепловоза включает 52 нелинейных алгебраических уравнения. Нелинейность ей доставляет зависимость теплоемкости воды C_v от температуры, которая учитывается известными зависимостями [8]. В других режимах работы размерность системы (11) будет изменяться: увеличиваться при уменьшении позиции контроллера (производительности насоса) и уменьшаться при ее увеличении.

На втором этапе моделирования для каждого шага $\Delta\tau$ осуществляется последовательное решение разностных уравнений (5), (6), (11), (12), в результате которого определяются изменения выходных температур элементов теплоносителя $\Delta t^1_{\text{вых}},\ldots,\Delta t^{l\text{рад}}_{\text{вых}}$ в радиаторе и $\Delta t^1_{\text{вд вых}},\ldots,\Delta t^{l\text{диз}}_{\text{вд вых}}$ в дизеле, температур $\Delta t^1_{\text{тр}0},\ldots,\Delta t^{l\text{рад}}_{\text{тр}0}$ трубок радиатора и $\Delta t^1_{\text{вт}0}$, …, $\Delta t^{l\text{диз}}_{\text{вт}0}$ втулок цилиндра дизеля за шаг $\Delta\tau$, а также их значения в конце шага.

Кроме того, температуры $t_{\text{тр1}m}$ элементов «горячей» и $t_{\text{тр2}k}$ «холодной» труб смещаются на один шаг, соответственно в сторону радиатора и дизеля, т. е. по направлению движения теплоносителя в трубах.

Проверка адекватности модели

Проверка адекватности разработанной модели осуществлялась сопоставлением:

1) распределения температуры втулок цилиндров дизеля в установившемся (стационарном) режиме работы дизеля 1А-5Д49, полученного термометрированием втулок одноцилиндрового отсека дизеля [9, 10], и аналогичного распределения, рассчитанного с использованием описанной модели;

2) кривых изменения перепада температур на входе и выходе из дизеля при работе последнего на 11-й позиции контроллера с включенной штатной САРТ тепловоза, полученных в результате анализа данных регистрации подсистемы диагностики системы МСУ-ТП тепловоза 2ТЭ116У, и аналогичных кривых, построенных при моделировании соответствующего режима работы ОУ тепловоза.

Результаты сравнения распределения температуры по высоте втулки, полученной термометрированием при работе отсека дизеля Д49 в номинальном режиме, с постоянной температурой воды на входе в дизель 79 °С и результатов моделирования работы ОУ в режиме поддержания такой же температуры на входе в дизель с использованием релейной САРТ приведены на рис. 4. Как из него следует, отличие расчетной температуры стенки втулки от температуры, полученной термометрированием в соответствующем режиме, не превышает 7,5 %, что с учетом задач, которые предполагается решать с помощью разработанной модели, можно считать очень хорошим результатом.

Изменения температуры воды в точках установки датчиков температуры воды на выходе из дизеля и воды на выходе из радиатора при работе дизель-генераторной установки тепловоза 2ТЭ116У на 11-й позиции контроллера, полученные при моделировании и анализе

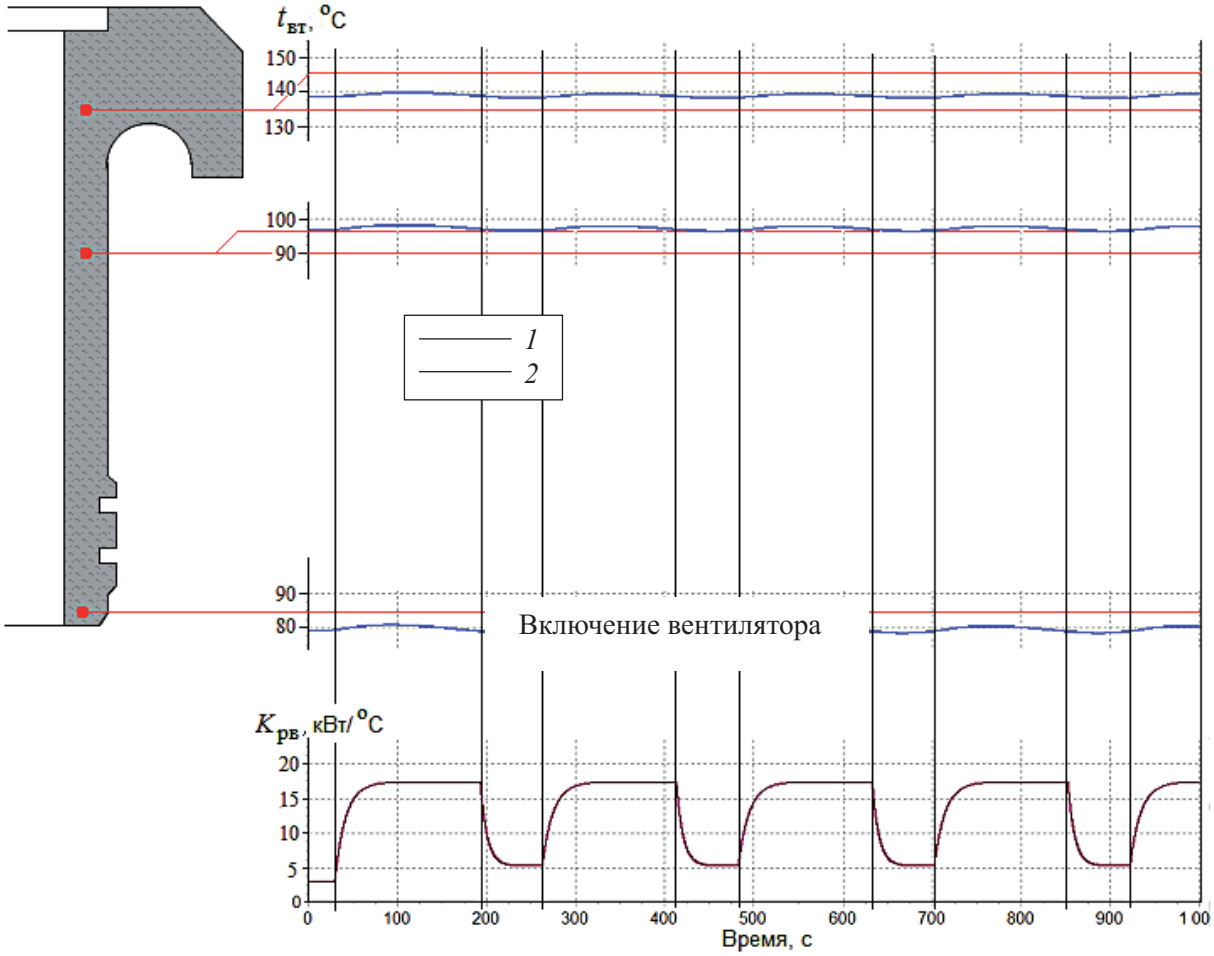


Рис. 4. Сравнение результатов расчета (*1*) и термометрирования (*2*) втулки цилиндра

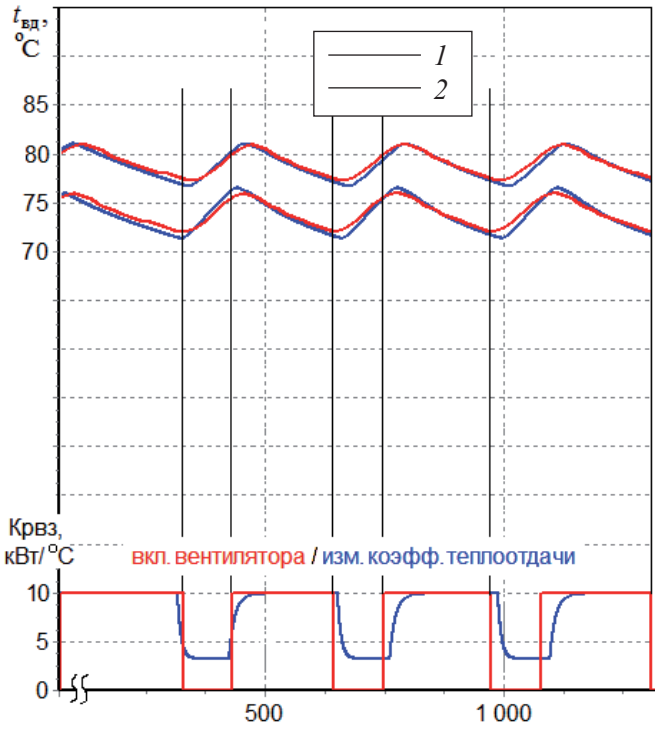


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования (*1*) и мониторинга (*2*) работы ОУ тепловоза 2ТЭ116У на 11-й позиции контроллера

данных регистрации подсистемы бортовой диагностики системы МСУ-ТП, представлены на рис. 5. Видно, что отличие результатов моделирования изменения температуры воды на входе и выходе из дизеля тепловоза 2ТЭ116У на 11-й позиции контроллера в переходном процессе, вызванном включением и отключением вентилятора, от данных мониторинга параметров ДГУ тепловоза в соответствующем режиме его работы не превышает 1,5 %, что является очень хорошим результатом и позволяет использовать разработанную модель для решения широкого круга задач, связанных с исследованиями ОУ тепловозов.

Библиографический список

1. Михеев В. А. Оценка технического состояния функциональных элементов системы охлаждения дизельной энергетической установки / В. А. Михеев // Актуальные вопросы технических наук : материалы III Междунар. науч. конференции (г. Пермь, апрель 2015 г.). – Пермь : Меркурий, 2015. – С. 122–125.

2. Сковородников В. А. Моделирование системы охлаждения тепловозов с целью оптимизации количества параметров контроля / В. А. Сковородников, В. А. Михеев // Вестн. СибАДИ (Омск). – 2009. – Вып. 1 (11). – С. 61–66.

3. Федотов М. В. Способ технического диагностирования системы охлаждения дизеля. – Патент № 2534185 Рос. Федерации : МПК G 01 M 15/09, F 01 P 5/14 / М. В. Федотов, С. И. Ким, А. И. Нестеров ; заявитель и патентообладатель Науч.-исслед. и конструк.-технолог. ин-т подвижного состава. – Заявл. № 2013125790/06 от 05.06.2013 ; опубл. 27.11.2014. – Бюл. № 33.

4. Носов А. Н. Повышение эксплуатационной надежности элементов системы охлаждения дизелей тепловозов : дис. … канд. техн. наук, специальность : 05.22.07 / А. Н. Носов. – Самара : СамГУПС, 2004. – 243 с.

5. Горин А. В. Методы контроля теплотехнического состояния охлаждающих устройств тепловозов в эксплуатации : дис. канд. техн. наук, специальность : 05.22.07 / А. В. Горин. – М. : ВНИИЖТ, 2016. – 240 с.

6. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.

7. Котовский В. Н. Теплопередача : Тексты лекций / В. Н. Котовский. – М. : Моск. гос. ун-т гражданской авиации, 2015. – 76 с.

8. Володин А. И. Моделирование на ЭВМ работы тепловозных дизелей / А. И. Володин. – М. : Транспорт, 1985. – 216 с.

9. Никитин Е. А. Тепловозные дизели типа Д49 / Е. А. Никитин, В. М. Ширяев, В. Г. Быков и др. ; под ред. Е. А. Никитина. – М. : Транспорт, 1982. – 255 с.

10. Третьяков А. П. Исследования тепловозного и напряженного состояния цилиндровых втулок дизеля типа ЧН 26/26 / А. П. Третьяков, В. Г. Байбошкин, М. А. Салтыков и др. // Труды МИИТ. –1975. – Вып. 479. – С. 29–38.

References

1. Mikheyev V. A. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya funktsionalnykh elementov systemy okhlazhdeniya dizelnoy energeticheskoy ustanovky [The assessment of technical condition of functional elements of the diesel-powered power plant cooling system]. *Aktualniye voprosy tekhnicheskykh nauk: materialy III Mezhdunar. nauch. konferentsii.* Perm, aprel 2015 g. [*Topical issues of engineering sciences: proceedings of the III International research conference*. Perm, April 2015]. Perm, Mercury Publ., 2015, pp. 122–125. (In Russian)

2. Skovorodnikov V. A. & Mikheyev V. A. Modelirovaniye sistemy okhlazhdeniya teplovozov s tselyu optimizatsii kolichestva parametrov kontrolya [Modeling of a cooling system for a diesel locomotive in order to optimize the number of control parameters]. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University*. Omsk, SibADI Publ., 2009, issue 1 (11), pp. 61–66. (In Russian)

3. *Sposob tekhnicheskogo dignostirovaniya sistemy okhlazhdeniya dizelya: patent № 2534185. The Russian Federation: MPK (IPC) G 01 M 15/09 F 01 P 5/14* [*The method of technical diagnostics of the diesel-engine cooling system: patent № 2534185. The Russian Federation: MPK (IPC) G 01 M 15/09 F 01 P 5/14*]. M. V. Fedotov, S. I. Kim, A. I. Nesterov; patent applicant The Rolling Stock Scientific Research and Tech-

nology Institute. N 2013125790/06. Appl. 05.06.2013; publ. 27.11.2014. Bul. no. 33. (In Russian)

4. Nosov A. N. *Povysheniye ekspluatatsionnoy nadezhnosty elementov sistemy okhlazhdeniya dizeley teplovozov* [*Diesel-engine cooling system elements: the improvement of service reliability*]: diss. Cand. Eng. Sci., speciality: 05.22.07. Samara, SamGUPS Publ., 2004, 243 p. (In Russian)

5. Gorin A. V. *Metody kontrolya teplotekhnicheskogo sostoyaniya ohklazhdayushchykh ustroistv teplovozov v ekspluatatsii* [*Control methods for thermotechnical condition of cooling devices designed for diesel locomotives in operation*]: dis. Cand. Eng. Sci., specialization: 05.22.07. Moscow, VNIIZhT Publ., 2016, 240 p. (In Russian)

6. Mikheyev M. A. & Mikheyeva I. M. *Osnovy teploperedachy* [*Heat-transfer principles*]. Moscow, Energiya Publ., 1977, 344 p. (In Russian)

7. Kotovskiy V. N. *Teploperedacha. Teksty lektsiy* [*Heat transfer. The scripts*]. Moscow, Moscow State University of Civil Aeronautics Publ., 2015, 76 p. (In Russian)

8. Volodin A. I. *Modelirovaniye na EVM raboty teplovoznykh dizeley* [*Computer modeling of diesel locomotive engines operation*]. Moscow, Transport Publ., 1985, 216 p. (In Russian)

9. Nikityn E. A., Shiryaev V. M., Bykov V. G. et al. *Teplovozniye dvigately tipa D49* [*D49-type diesel locomotive engines*]. Ed. by E. A. Nikityn. Moscow, Transport Publ., 1982, 255 p. (In Russian)

10. Tretyakov A. P., Saltykov M. A., Baiboshkin V. G. et al. Issledovaniya teplovoznogo i napryazhennogo sostoyaniya tsilindrovykh vtulok dizelya tipa ChN 26/26 [The study of diesel and stress state of ChN 26/26 type cylinder bushing of a diesel engine]. *Proceedings of MIIT*, 1975, issue 479, pp. 29–38. (In Russian)

ГРАЧЕВ Владимир Васильевич – канд. техн. наук, доцент, v_Grach@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 65.011.56:625.12

А. В. Индейкин, О. Н. Куранова, А. К. Черных, Г. Г. Чентурия

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРАНСПОРТНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Дата поступления: 31.05.2018
Решение о публикации: 08.06.2018

Аннотация

Цель: Получение аналитических зависимостей для расчета объемов профильной кубатуры насыпей (полунасыпей), выемок (полувыемок), а также резервов, кавальеров, водоотводных канав и других сооружений. **Методы:** Применяются интегральное исчисление и стереометрия. **Результаты:** Выведены новые аналитические зависимости для расчета объемов профильной кубатуры насыпей (полунасыпей), выемок (полувыемок), а также резервов, кавальеров, водоотводных канав. Определены относительные погрешности расчета указанных объемов профильной кубатуры по сравнению с традиционными методами расчета этих величин. Проведены математическое доказательство предлагаемых аналитических зависимостей, а также их анализ. **Практическая значимость:** На основе рассмотренных зависимостей возможно повышение точности расчета объемов профильной кубатуры насыпей (полунасыпей), выемок (полувыемок), а также резервов, кавальеров, водоотводных канав. Результаты исследований могут быть применены при создании информационных систем, оперативно реализующих предложенные аналитические зависимости более эффективных расчетных показателей, а также при планировании проведения больших объемов земляных работ.

Ключевые слова: Объемы земляных работ, поперечные сечения переменной площади, определенный интеграл, призматоид, погрешности расчетов, повышение точности расчетов.

Andrey V. Indeykin, D. Eng. Sci., professor, tm@pgups.ru; **Olga N. Kuranova,** Cand. Eng. Sci., associate professor, olga_kuranova@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University); ***Andrey K. Chernykh,** D. Eng. Sci., associate professor, nataliachernykh@mail.ru (Saint Petersburg Army National Guard Military Institute); **Georgiy G. Chanturiya,** postgraduate student, g-o-g-i-@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) ON THE IMPROVEMENT OF COMPUTATIONAL ACCURACY DURING THE CONSTRUCTION OF TRANSPORTATION LINES

Summary

Objective: To obtain analytic dependences for profile cubage volume calculation of subgrades (side hill fills), ditch cuts (side hill cuts), as well as borrow pits, soil banks, drainage ditches and other structures. **Methods:** Integral calculus and stereometry was applied. **Results:** New analytic dependencies for profile cubage volume calculation of subgrades (side hill fills), ditch cuts (side hill cuts), borrow pits, soil banks and drainage ditches were deducted. Relative errors of calculating the given profile cubage volume were determined in comparison with conventional methods for calculating the values in question. Mathematical demonstration of the given analytic dependencies, as well as the analysis of the latter was carried out. **Practical importance:** Computational accuracy of profile cubage volume of subgrades (side hill fills), ditch cuts (side hill cuts), borrow pits, soil banks and drainage ditches may be improved based on the examined dependencies. Research results may be applied in the design of information systems. The latter promptly implement the introduced analytic dependencies of more effective calculation indices and test planning of large earthwork volumes.

Keywords: Earthwork volumes, cross sections of variable area, definite integral, prismatoid, calculation errors, computational accuracy increase.

Введение

В настоящее время для подсчета объемов профильной кубатуры насыпей (полунасыпей), выемок (полувыемок), а также резервов, кавальеров, водоотводных канав и других сооружений используются аналитические зависимости, номограммы, графики, специальные счетные линейки, таблицы и реализованные компьютерные программы [1–10].

Перечисленные способы базируются на геометрических зависимостях, которые, в силу того, что участки земляного полотна представляют собой сложные геометрические фигуры, не позволяют получить точные, с точки зрения математики, результаты. В практическом аспекте это приводит к возрастанию временных и стоимостных затрат на выполнение земляных работ, включая и выполнение расчетов объемов работ. Поэтому разработка методов, позволяющих уменьшить указанные затраты за счет большей точности расчетов при определении объемов земляных работ и достаточно просто реализуемых в среде существующих пакетов прикладных программ, является достаточно актуальной.

В статье найдены обоснованные аналитические зависимости для расчетов объемов земляных масс различных видов, которые могут служить основой упомянутых выше методов. Следует подчеркнуть, что полученные с помощью предложенных формул результаты являются точными.

В соответствии с [5] наиболее сложными для расчетов являются участки земляного полотна на местности, имеющей продольный уклон основания насыпи, поэтому вычисления будут проводиться в рамках данного условия.

Расчет объема прямолинейного участка насыпи

Рассчитаем объем участка земляного полотна (насыпи), представляющего собой сложную геометрическую фигуру – призматоид с поперечным сечением переменной площади (рис. 1), который делим на две части: приз-

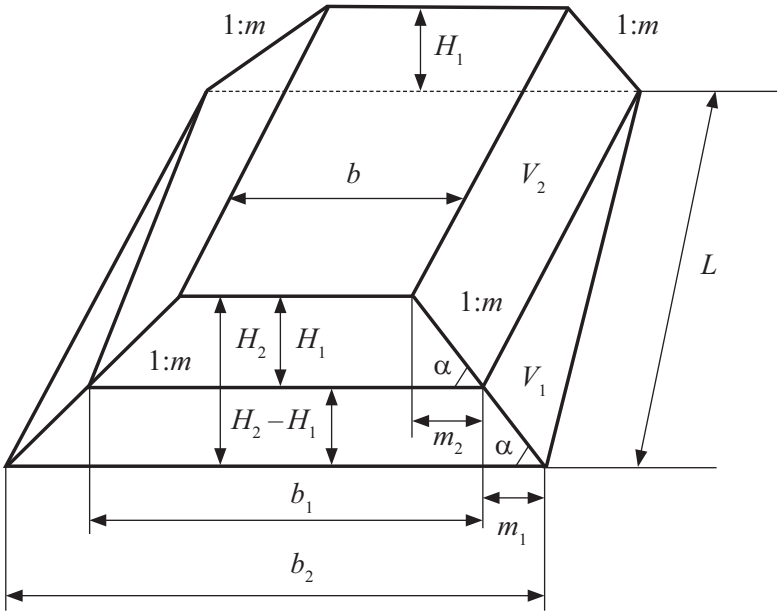


Рис. 1. Основные показатели участка насыпи (без сливной призмы): $H_1(H_2)$ – минимальная (максимальная) высота участка насыпи; b (b_2) – ширина основной площадки (основания) участка насыпи; b_1 – ширина основания призматоида; L – длина участка насыпи; m_1 и m_2 – горизонтальные проекции откосов; α – угол наклона откоса к горизонту; m – характеристика крутизны откоса

матоид с поперечным сечением постоянной площади – V_2; трапецеидальный клин – V_1.

Для подсчета объема V_2 необходимо вычислить величину m_2, которая согласно определению tgα рассчитывается по формуле

$$m_2 = H_1 \big/ \operatorname{tg}\alpha,$$

где $\operatorname{tg}\alpha = 1/m$. Далее получаем значения величин b_1 и V_2:

$$b_1 = b + 2 \cdot m_2,\ V_2 = \frac{b + b_1}{2} \cdot H_1 \cdot L.$$

Для подсчета объема V_1 следует вычислить определенный интеграл вида [11]

$$\int_0^L S(x)dx, \qquad (1)$$

в котором $S(x)$ – переменная площадь ортогонального сечения трапецеидального клина. Для нее переменной является высота, которая находится из подобия треугольников, представленных на рис. 2:

$$h(x) = \frac{(H_2 - H_1) \cdot x}{L}.$$

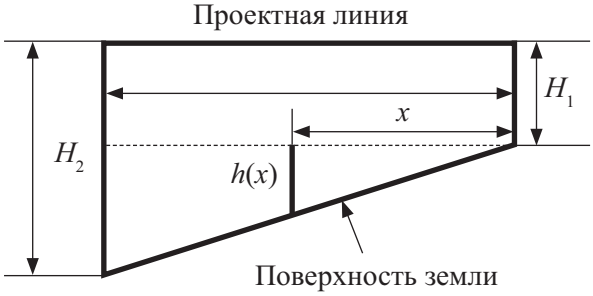


Рис. 2. Продольное сечение участка насыпи

Далее, используя очевидные зависимости, рассчитаем величины m_1, b_2, $S(x)$ и V_1 (см. рис. 1):

$$m_1 = (H_2 - H_1) \big/ \operatorname{tg}\alpha,\ b_2 = b + 2 \cdot (m_1 + m_2),$$

$$S(x) = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h(x),\ V_1 = \int_0^L S(x)dx.$$

Таким образом, объем участка насыпи определяется по формуле

$$V_{\text{н}} = V_1 + V_2. \qquad (2)$$

В случае необходимости сооружения сливной призмы формула (2) корректируется на величину объема сливной призмы

$$V_{\text{сп}} = \frac{b + b_3}{2} \cdot h_3 \cdot L,$$

где b, b_3 и h_3 – соответственно ширина основной площадки, ширина основания и высота сливной призмы (в м), и имеет вид

$$V_{\text{н}} = V_1 + V_2 + V_{\text{сп}}.$$

Доказательство справедливости формулы (1)

Доказательство справедливости предложенной формулы (1), по которой проводится расчет объема земляного массива, проведем для случая призматоида (см. рис. 1)[1].

Рассмотрим часть призматоида (V), содержащуюся между плоскостями $x = a$ и $x = b$ (рис. 3), и станем рассекать ее плоскостями, перпендикулярными к оси x. Площадь сечения, отвечающего абсциссе x, обозначим через $S(x)$, будет непрерывной функцией от x (для $a \le x \le b$).

Если спроектировать (без искажения) два подобных сечения на какую-либо плоскость, перпендикулярную к оси x, то они содержатся одно в другом. В этом предположении можно утверждать, что тело имеет объем, который выражается формулой

[1] Доказательство для остальных типов земляных массивов проводится аналогично.

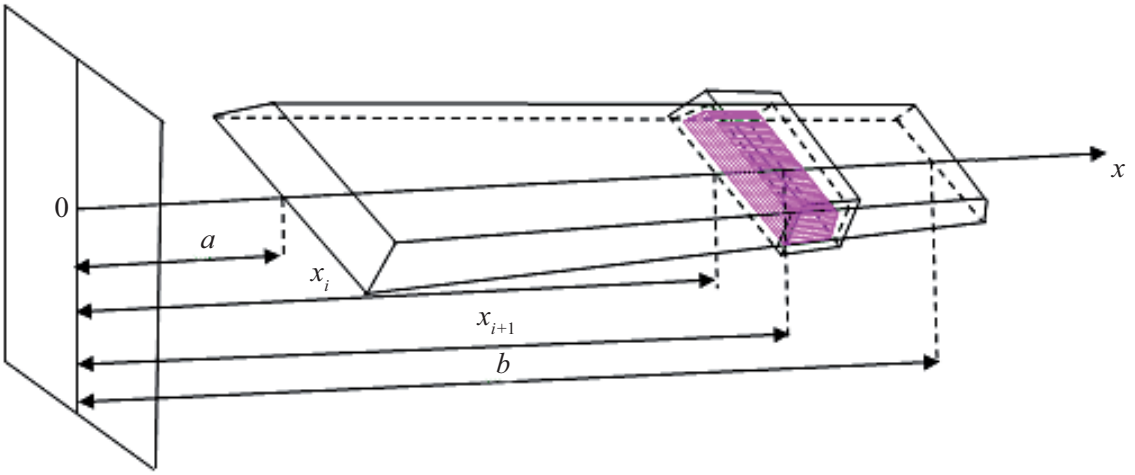


Рис. 3. Иллюстрация к доказательству формулы (1)

$$V = \int_a^b S(x)dx . \qquad (3)$$

Для доказательства разобьем отрезок [*a*, *b*] на оси *x* точками

$$a = x_0 < x_1 < ... < x_i < x_{i+1} < ... < x_n = b$$

на части и рассечем плоскостями $x = x_i$, проведенными через точки деления, все тело на слои. Рассмотрим *i*-й слой, содержащийся между плоскостями:

$$x = x_i \text{ и } x = x_{i+1} \ (i = 0, 1, \ldots, n - 1).$$

В промежутке $[x_i, x_{i+1}]$ функция $S(x)$ имеет наибольшее значение площади M_i и наименьшее m_i. Если сечения, отвечающие различным *x* в этом промежутке, поместить на одну плоскость, скажем, $x = x_i$, то все они при сделанном предположении будут находиться в наибольшем, имеющем площадь M_i, и содержать наименьшее с площадью m_i. Если на этих, наибольшем и наименьшем, сечениях построить прямые цилиндры высотой $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$, то бóльший из них будет включать в себя рассматриваемый слой тела, а меньший сам будет в этом слое. Объемы таких цилиндров будут соответственно $M_i \Delta x_i$ и $m_i \Delta x$.

Из входящих цилиндров составится тело *T*, а из выходящих – тело *U*, их объемы равны соответственно $\sum_i M_i \Delta x_i$ и $\sum_i m_i \Delta x_i$, и, когда стремится к нулю $\lambda = \max \Delta x_i$, имеют общий предел, определяемый формулой (3). В [11, с. 225] доказано: «Если для тела (*V*) можно построить такие две последовательности, соответственно входящих и выходящих тел $\{(T_n)\}$ и $\{(U_n)\}$, которые имеют объемы, причем эти объемы стремятся к общему пределу $\lim T_n = \lim U_n = V$, то и тело (*V*) имеет объем, равный упомянутому пределу». В силу сказанного и будет справедлива формула

$$V = \int_0^L S(x)dx = \int_a^b S(x)dx .$$

Расчет объема криволинейного участка насыпи

Рассчитаем объем участка насыпи с учетом его уширения в кривой (рис. 4).

В данном случае наиболее просто вычислить объем участка насыпи в полярной системе координат с помощью соответствующего определенного интеграла [12–14]. Здесь, применяя метод дифференциалов [12], можно записать, используя обозначения рис. 5, $dV = S(\varphi)dl$, где $S(\varphi)$ – переменная площадь

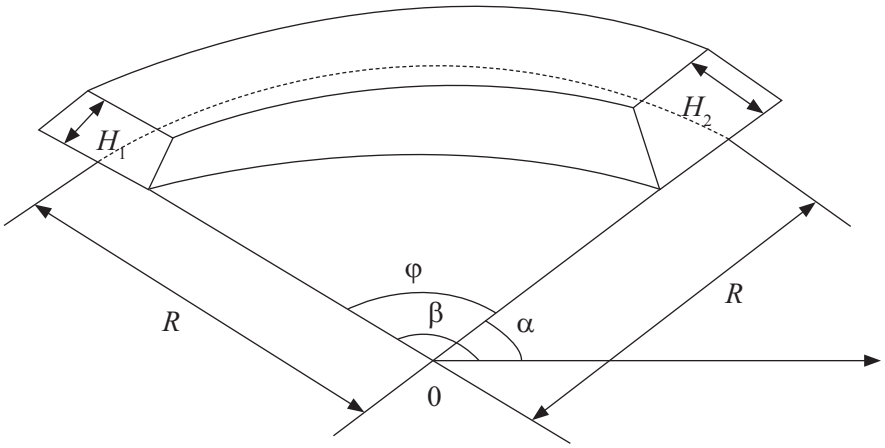


Рис. 4. Основные показатели участка насыпи (без сливной призмы)

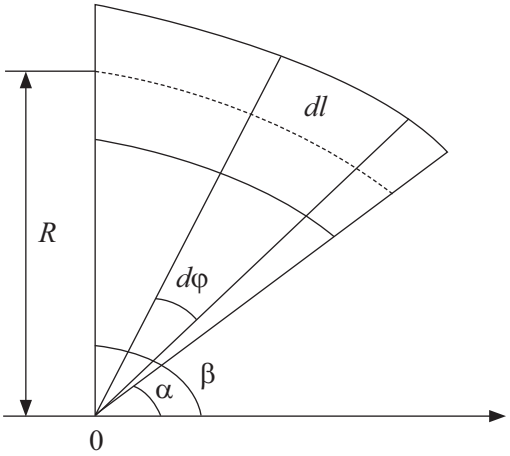


Рис. 5. Основание призматоида в полярной системе координат

радиального сечения призматоида, которую необходимо определить, а $dl = Rd\varphi$ – дифференциал дуги оси участка насыпи. Таким образом, окончательно имеем $dV = S(\varphi)Rd\varphi$ и, интегрируя последнее выражение, получим формулу для вычисления объема участка насыпи в полярной системе координат – V:

$$V = R\int_{\alpha}^{\beta} S(\varphi)d\varphi\,, \qquad (4)$$

где α и β – начальный и конечный углы, задающие координаты начала и конца участка насыпи[2]. Поскольку величина данной площади изменяется по линейному закону, то она определяется по следующей зависимости:

$$S(\varphi) = S_{\alpha} + \frac{(S_{\beta} - S_{\alpha})}{\beta - \alpha}\cdot(\varphi - \alpha)\,,$$

в которой $S_{\alpha}(S_{\beta})$ – площадь радиального сечения в начале (конце) участка насыпи.

Таким образом, объем участка насыпи находится по формуле

$$V = \begin{cases} R\int\limits_{\alpha}^{\beta} S(\varphi)d\varphi & \text{при отсутствии сливной призмы,} \\ R\int\limits_{\alpha}^{\beta} S(\varphi)d\varphi + V_{\text{сп}} & \text{при наличии сливной призмы.} \end{cases}$$

Доказательство справедливости предложенной формулы (4)

Согласно [15], объем тела в цилиндрических координатах определяется тройным интегралом вида $V = \iiint\limits_{(V)} RdRd\varphi dz$, где z – вертикальная ось декартовой системы координат.

Рассмотрим криволинейный призматоид (V, см. рис. 4) и положим, что исходящая из оси z полуплоскость, отвечающая φ = const,

[2] Подробные выкладки, доказывающие справедливость использования предлагаемой формулы (4), будут приведены далее.

пересекает его по некоторой плоской фигуре $S(\varphi)$ при изменении φ от α до β (рис. 6).

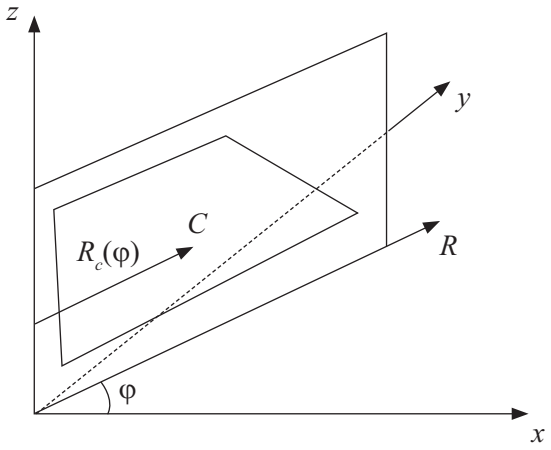


Рис. 6. Иллюстрация к доказательству формулы (4)

Тогда

$$V = \iiint\limits_{(V)} RdRd\varphi dz = \int\limits_{\alpha}^{\beta} d\varphi \iint\limits_{S_\varphi} RdRdz\,,$$

причем фигуру S_φ удобно отнести к прямоугольной системе координат Rz, вращающейся вместе с указанной полуплоскостью вокруг оси z.

Как известно (см. [15]), двойной интеграл $\iint\limits_{S_\varphi} RdRdz$ представляет статический момент фигуры S_φ относительно оси z, который равен произведению площади $S(\varphi)$ этой фигуры на расстояние $R_c(\varphi)$ от оси z до ее центра тяжести C: $\iint\limits_{S(\phi)} RdRdz = S(\phi)\cdot R_c(\phi)$. Подставляя это выражение в формулу для вычисления объема и учитывая, что для рис. 5 $R_c(\varphi) = R$, имеем

$$V = \int\limits_{\alpha}^{\beta} S(\varphi)Rd\varphi = R\int\limits_{\alpha}^{\beta} S(\varphi)d\varphi\,.$$

Разработанные на основе предложенных формул в среде пакета прикладных программ «MathCAD» программные средства наряду с расчетами соответствующих объемов реализуют также оценки точности приближенных методов расчетов этих объемов традиционными способами (таблица).

Относительные погрешности приближенных методов расчетов объемов земляных масс [16]

Вид расчета	Величина погрешности, %
Расчет объема участка насыпи	1–3
Расчет объема участка насыпи с уположением в нижней части откоса	4–7
Расчет объема выемки	6–10
Расчет объема участка насыпи с учетом его уширения в кривой	1–4

Необходимо отметить, что расчеты, проведенные для одного из объектов, показали увеличение объема земляных работ примерно на 12 тыс. м^3, что соответствует относительной погрешности в размере 7%.

Заключение

Таким образом, повышение точности расчетов объемов работ на основе использования формул (1)–(4), будет способствовать корректному проведению тендера на выполнение сосредоточенных земляных работ за счет более точного описания объектов, структуры и видов работ в конкурсной документации. В результате может быть достигнуто более рациональное расходование выделенных бюджетных ассигнований.

Библиографический список

1. Низов А. С. Организация восстановления железных дорог : учебник / А. С. Низов, Д. И. Попов, Г. А Ложечников. – СПб. : ВАМТО, 2014. – 304 с.

2. Сизов Е. Б. Организация технического прикрытия железных дорог : монография / Е. Б. Сизов. – СПб. : ВТУ ЖДВ, 2008. – 238 с.

3. Черных А. К. Применение геоинформационных технологий в расчетах трудоемкости путевых работ / А. К. Черных, Д. И. Кошеленко // Научно-техн. сб. – Вып. 12. – СПб. : ВТУ ЖДВ, 2006. – С. 190–201.

4. Черных А. К. Расчет объемов земляных массивов : программа для ЭВМ / А. К. Черных. – М. : ФИПС, 2008. – № 2008613875. – 7 с.

5. Организация, планирование и управление железнодорожным строительством : учебник / под общ. ред. В. П. Химченко. – СПб. : Воен.-транспортн. ун-т железнодорожных войск Российской Федерации; ООО «Вит-принт», 2004. – 480 с.

6. Спиридонов А. М. Технология железнодорожного строительства : учебник для специалистов / А. М. Спиридонов, А. М. Призмозонов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 399 с.

7. Строительство железных дорог. Ч. 2. Технология земляных и путевых работ / под общ. ред. Г. И. Когатько. – М. : Военное изд-во, 1994. – 447 с.

8. Оперативное управление транспортным строительством. Ч. 2. ПРИОР 2 «Сооружение земляного полотна» / сост. : И. С. Козлов, Д. С. Николайтист, А. В. Щукин. – СПб. : ПГУПС, 2012. – 13 с.

9. Краснопёров А. Г. Минимизация графических работ при автоматизированном построении профилей железнодорожного пути / А. Г. Краснопёров, А. К. Черных, П. А. Весёлкин // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2007. – Вып. 1. – С. 54–61.

10. Григорьев Б. М. Организация восстановления мостов на железных дорогах. Ч. 1. Организация технического прикрытия и восстановления искусственных сооружений мостовыми частями железнодорожных войск : учеб. пособие / Б. М. Григорьев. – СПб. : ВТУ ЖДВ, 2005. – 257 с.

11. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : учебник : в 3 т. / Г. М. Фихтенгольц. – М. : Физматлит, 2003. – Т. 2. – 810 с.

12. Кудрявцев Л. Д. Курс математического анализа : учебник : в 3 т. / Л. Д. Кудрявцев. – М. : Дрофа, 2003. – Т. 1. – 704 с.

13. Кудрявцев Л. Д. Краткий курс математического анализа : учебник : в 2 т. / Л. Д. Кудрявцев. – Висагинас : «Alfa», 1998. – Т. 1. – 400 с.

14. Натансон И. П. Краткий курс высшей математики : учебник для вузов / И. П. Натансон. – СПб. : Лань, 1999. – 736 с.

15. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : учебник : в 3 т. / Г. М. Фихтенгольц. – СПб. : Лань, 2009. – Т. 3. – 656 с.

16. Демидович Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – М. : Наука, 1970. – 664 с.

References

1. Nizov A. S., Popov D. I. & Lozhechnikov G. A. *Organizatsiya vosstanovleniya zheleznykh dorog* [*Railroads: reconstruction management*]. Saint Petersburg, VAMTO (Military Academy of Logistics Support) Publ., 2014, 304 p. (In Russian)

2. Sizov Y. B. *Organizatsiya tekhnicheskogo prikrytiya zheleznykh dorog* [*Railroads: technical coverage management*]. Saint Petersburg, VTU ZhDV (Railway Troops of the Russian Armed Forces Military Topographic Directorate) Publ., 2008, 238 p. (In Russian)

3. Chernykh A. K. & Koshelenko D. I. Primeneniye geoinformatsionnykh tekhnologiy v raschetakh trudoyemkosty putevykh rabot [The use of geographic information technologies in work labour input of engineering works]. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik* [*Research and engineering coll. papers*], 2006, issue 12, pp. 190–201. (In Russian)

4. Chernykh A. K. *Raschet obyemov zemlyanykh massiviv: programma dlya EVM* [*Earth body volume calculation: application software*]. Moscow, FIPS (Federal Institute of Industrial Property) Publ., 2008, no. 2008613875, 7 p. (In Russian)

5. Organizatsiya, planirovaniye i upravleniye zheleznodorozhnym stroitelstvom [*Railroad construction: organization, planning and management*]; under gen. ed. of V. P. Khimchenko. Saint Petersburg, Military Transport University of the Railway Forces of the Russian Federation Publ., OOO “Vit-print” Publ., 2004, 480 p. (In Russian)

6. Spiridonov A. M. & Prizmozonov A. M. *Tekhnologiya zheleznodorozhnogo stroitelstva* [*Railroad construction technology*]. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educa-

tional centre of railway transport] Publ., 2014, 399 p. (In Russian)

7. *Stroitelstvo zheleznykh dorog* [*Railroad construction*]. Ch. 2. *Tekhnologiya zemlyanykh i putevykh rabot* [*Pt 2. Earthwork and permanent way work technology*]; under gen. ed. of G.I. Kogatko. Moscow, Military Publ., 1994, 447 p. (In Russian)

8. Kozlov I.S., Nikolaitist D.S. & Shchukin A.V. *Operativnoye upravleniye transportnym stroitelstvom. Ch. 2. PRIOR 2 "Sooruzheniye zemlyanogo polotna"* [*Transport construction: operational control. Pt 2. PRIOR 2 "Subgrade construction"*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012, 13 p. (In Russian)

9. Krasnoperov A.G., Chernykh A.K. & Veselkin P.A. Minimizatsiya graficheskykh rabot pry avtomatizirovannom postroyenii profiley zheleznodorozhnogo puty [Graphic work minimization during automated construction of the railroad track profile]. *Izvestiya Peterburgskogo Universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2007, issue 1, pp. 54–61. (In Russian)

10. Grigoriyev B.M. *Organizatsiya vosstanovleniya mostov na zheleznykh dorogakh. Ch. 1. Organizatsiya tekhnichskogo prikrytiya i vosstanovleniya iskusstvennykh sooruzheniy mostovymy chastyamy zheleznodorozhnykh voisk* [*Organization of railway bridge reconstruction. Pt 1. Organization of technical protection and reconstruction of engineering structures by bridge units of the military railway service*]. Saint Petersburg, VTU ZhDV (Railway Troops of the Russian Armed Forces Military Topographic Directorate) Publ., 2005, 257 p. (In Russian)

11. Fikhtengoltz G.M. *Kurs differentsialnogo i integralnogo ischisleniya. V 3 t.* [*A course on calculus. In 3 vol.*]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, vol. 2, 810 p. (In Russian)

12. Kudryavtsev L.D. *Kurs matematicheskogo analiza. V 3 t.* [*A course on mathematical analysis. In 3 vol.*]. Moscow, Drofa Publ., 2003, vol. 1, 704 p. (In Russian)

13. Kudryavtsev L.D. *Kratkiy kurs matematicheskogo analiza. V 2 t.* [*A short course on mathematical analysis. In 2 vol.*]. Visaginas, Alfa Publ., 1998, vol. 1, 400 p. (In Russian)

14. Natanson I.P. *Kratkiy kurs vysshey matematiky* [*A short course on higher mathematics*]. Saint Petersburg, Lan Publ., 1999, 736 p. (In Russian)

15. Fikhtengoltz G.M. *Kurs differentsialnogo i integralnogo ischisleniya. V 3 t.* [*A course on differential and integral calculus. In 3 vol.*]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2009, vol. 3, 656 p. (In Russian)

16. Demidovich B.P. & Maron B.P. *Osnovy vychislitelnoy matematiky* [*The foundations of numerical mathematics*]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 664 p. (In Russian)

ИНДЕЙКИН Андрей Виторович – д-р техн. наук, профессор, tm@pgups.ru; КУРАНОВА Ольга Николаевна – канд. техн. наук, доцент, olga_kuranova@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ЧЕРНЫХ Андрей Климентьевич – д-р техн. наук, доцент, nataliachernykh@mail.ru (Санкт-Петербургский военный институт войск Национальной гвардии); ЧЕНТУРИЯ Георгий Иглаевич – аспирант, g-o-g-i-@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.332:3(07)

Ю. А. Кочунов, Е. С. Волгин, С. А. Чебаков

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Дата поступления: 16.05.2018
Решение о публикации: 18.06.2018

Аннотация

Цель: Применение полимерных композитных материалов при изготовлении опор и их работоспособность на контактной сети железных дорог. **Методы:** В основу работы положен анализ статистических данных состояния опорно-поддерживающих конструкций. **Результаты:** Определено общее количество опор контактной сети железных дорог, находящихся на балансе «Трансэнерго» – филиала ОАО «РЖД». Проведен обзор существующих и перспективных направлений по увеличению надежности рассматриваемых конструкций. Получена оценка свойств и характеристик стоек из полимерных композитных материалов, выполненных по различным технологиям. **Практическая значимость:** Результаты работы могут быть применены при разработке новых опор контактной сети железных дорог, а также в качестве теоретического материала для студентов высших учебных заведений.

Ключевые слова: Опоры контактной сети железных дорог, полимерные композитные материалы, коррозия, трещины, арматура, стеклопластик.

***Yuriy A. Kochunov,** Cand. Eng. Sci., associate professor, yukochunov@mail.ru; **Evgeniy S. Volgin,** postgraduate srudent, EvgenVolgin007@yandex.ru; **Sergey A. Chebakov,** student, cergey97clever@mail.ru (Ural State University of Railway Transport) PRODUCTION ANALYSIS OF CATENARY SUPPORT MADE FROM POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

Summary

Objective: To apply polymeric composite materials in the process of producing overhead structures and to study its serviceability. **Methods:** Statistical data analysis of the supporting structures condition underlies the study in question. **Results:** The total number of supporting structures which were on the balance shit of "Transenergo" – OAO "RZhD" subsidiary was determined. A review of the current and promising directions aimed at the reliability growth of the structures in question was fulfilled. The assessment of properties and characteristics of supporting poles made from polymeric composite materials, and produced by means of different technologies, was carried out. **Practical importance:** The obtained results can be used in the design of new supporting poles for overhead structures, and as theoretical material for university students.

Keywords: Overhead structures, polymeric composite materials, corrosion, flaws, reinforcement, glass-fiber reinforced plastic.

Контактная сеть представляет собой сложную систему электрификации железнодорожного транспорта. Она состоит из опорных конструкций, которые воспринимают на себя нагрузку от проводов, и установленного вспомогательного оборудования. Конструкции, предназначенные для закрепления фиксирующих и поддерживающих устройств, входят в состав опоры; основным документом, регламентирующим применение опор контактной сети

железных дорог, является ГОСТ 19330–2013 «Стойки для опор контактной сети железных дорог» [1]. Данный стандарт распространяется на стойки для опор контактной сети, сооружаемых на общей сети электрифицированных железных дорог и железнодорожных подъездных путях предприятий в различных климатических условиях.

Приведем основные определения:

• опора контактной сети – строительная несущая конструкция, на которой закрепляют устройства контактной сети, состоящая из верхней части (стойки) и подземной части (фундамента) или только из стойки [1];

• стойка для опор контактной сети – элемент опоры, воспринимающий нагрузки от контактной сети, функцией которого является передача этой нагрузки на фундамент или непосредственно на грунт [1].

Опоры классифицируются по назначению, направлению приложения нагрузки, конструктивному исполнению, материалу, из которого они изготовлены, и способу закрепления в грунте.

В ходе эксплуатации железобетонные и металлические опоры подвергаются воздействию внешних факторов, что приводит к возникновению дефектов, основные из которых: 1) коррозия (электрокоррозия); 2) трещины бетона [2, 3]. Как правило, эти дефекты взаимосвязаны. Более 50 % трещин появляется под действием коррозии. В [2] представлены предельно допустимые размеры повреждений, методы диагностирования, приборы дефектировки. Выход опоры из строя под влиянием различного рода дефектов ведет к ее падению, что, в свою очередь, вызывает отказ контактной сети и длительную задержку поездов.

На основании многолетнего анализа работы «Трансэнерго» – филиала ОАО «РЖД» определено общее количество нарушений нормальной работы контактной сети и из них выделены отказы опор (рис. 1). На рис. 2 представлена диаграмма процентного соотношения отказов опор от общего числа нарушений нормальной работы устройств контактной сети. Из этой диаграммы следует, что опоры выходят из строя в среднем около 1,5 % от общего числа устройств контактной сети.

С целью повышения надежности опор контактной сети российскими и зарубежными научно-исследовательскими коллективами (лабораториями) проводятся анализы работоспособности опор, выполненных из полимерных композитных материалов или с их частичным применением [4].

Научные разработки по изучению композитных материалов начались в середине XX в. Во всех передовых странах того времени – СССР, США, Канаде, Японии и др. – проводились исследования по применению стеклопластиковой арматуры в качестве армирующего эле-

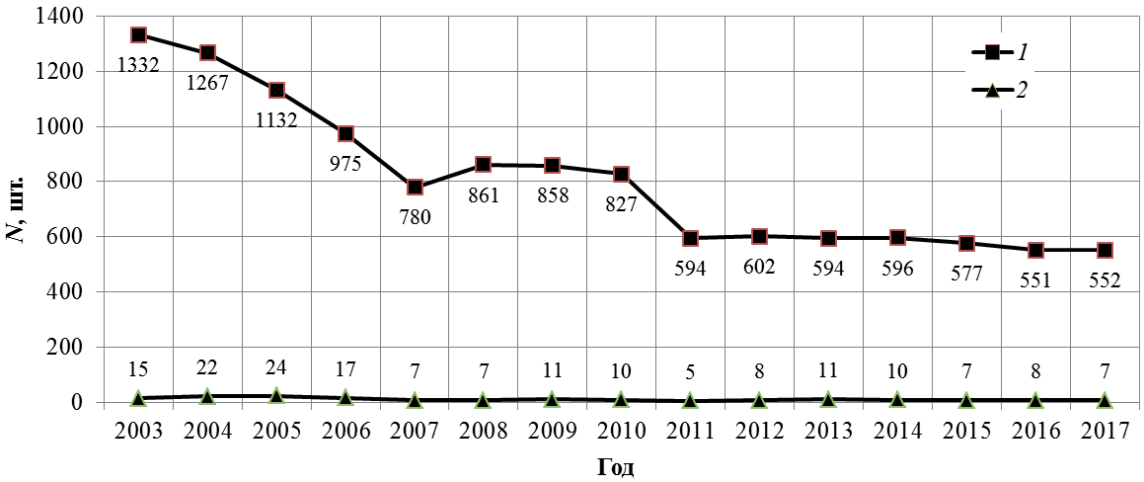


Рис. 1. Общее количество нарушений нормальной работы контактной сети:
1 – общее количество отказов за год; *2* – количество отказов опор

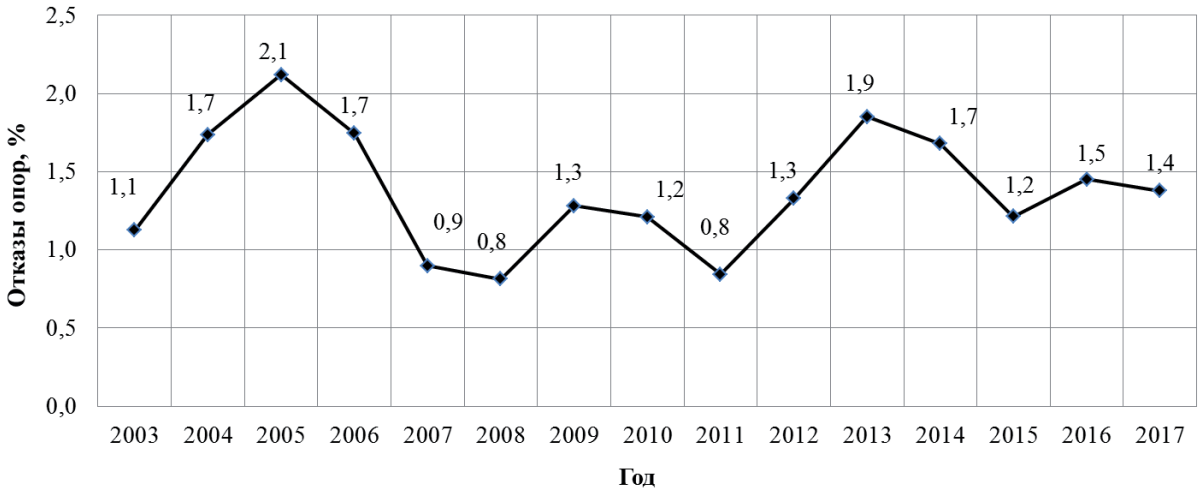


Рис. 2. Соотношение отказов опор от общего количества нарушений нормальной работы контактной сети

мента в бетонных конструкциях. С распадом СССР в нашей стране подобные работы пришлось приостановить, но технический прогресс заставляет «идти в ногу» со временем, поэтому композитные материалы являются приоритетным направлением развития в России, о чем свидетельствуют Указ Президента Российской Федерации «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» от 1 декабря 2016 г. № 642; «Стратегия инновационного развития РФ на период до 2020 года», утвержденная распоряжением Правительства РФ от 8 декабря 2011 г. № 2227-р; Распоряжение «Развитие отрасли производства композитных материалов», утвержденное Правительством Российской Федерации от 24 июля 2013 г. № 1307-р.

Современные технологии позволяют изготавливать три варианта опор (рис. 3) [4]. Рассмотрим их более подробно.

Использование стеклопластиковой арматуры как армирующего компонента бетонных опор контактной сети железных дорог подробно описано в статье [5], а также в материалах международной конференции «Композиты СНГ» [6–11].

На основании многочисленных научных исследований разработан и принят документ, регламентирующий применение композитной арматуры для опор контактной сети – ГОСТ 31938–2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций». По ТУ 5714-007-13101102–2009 «Арматура композитная базальтопластиковая» изготовлена арматура, которая прошла испытания в НИИЖБ им. А. А. Гвоздева. Готовая опора, армированная базальтопластиком, испытана в АО «ВНИИЖТ» [7].

На рис. 4 представлены фрагмент арматурного каркаса с анкерами и стойка опоры с композитным армированием, а также фрагменты опоры до и после испытаний методом упругой деформации с приложением нагрузки 40,3 кН, что соответствует 2,0 $М^{Н}$.

Помимо испытаний в состоянии упругой деформации, в соответствии с требованиями ГОСТ 19330–2013, стойки опор должны быть трещиностойкими. Стендовые испытания также проведены в АО «ВНИИЖТ», схема и результаты исследований подробно рассмотрены в [7].

Стоит отметить следующее:

1) вибрационное нагружение не оказало существенного влияния на свойства стоек опор, армированных композитной арматурой;

2) во время вибрационного нагружения видимых повреждений не выявлено;

3) прогиб стойки на уровне контактного провода от приложения нормативного изгибающего момента находился в допустимых пределах;

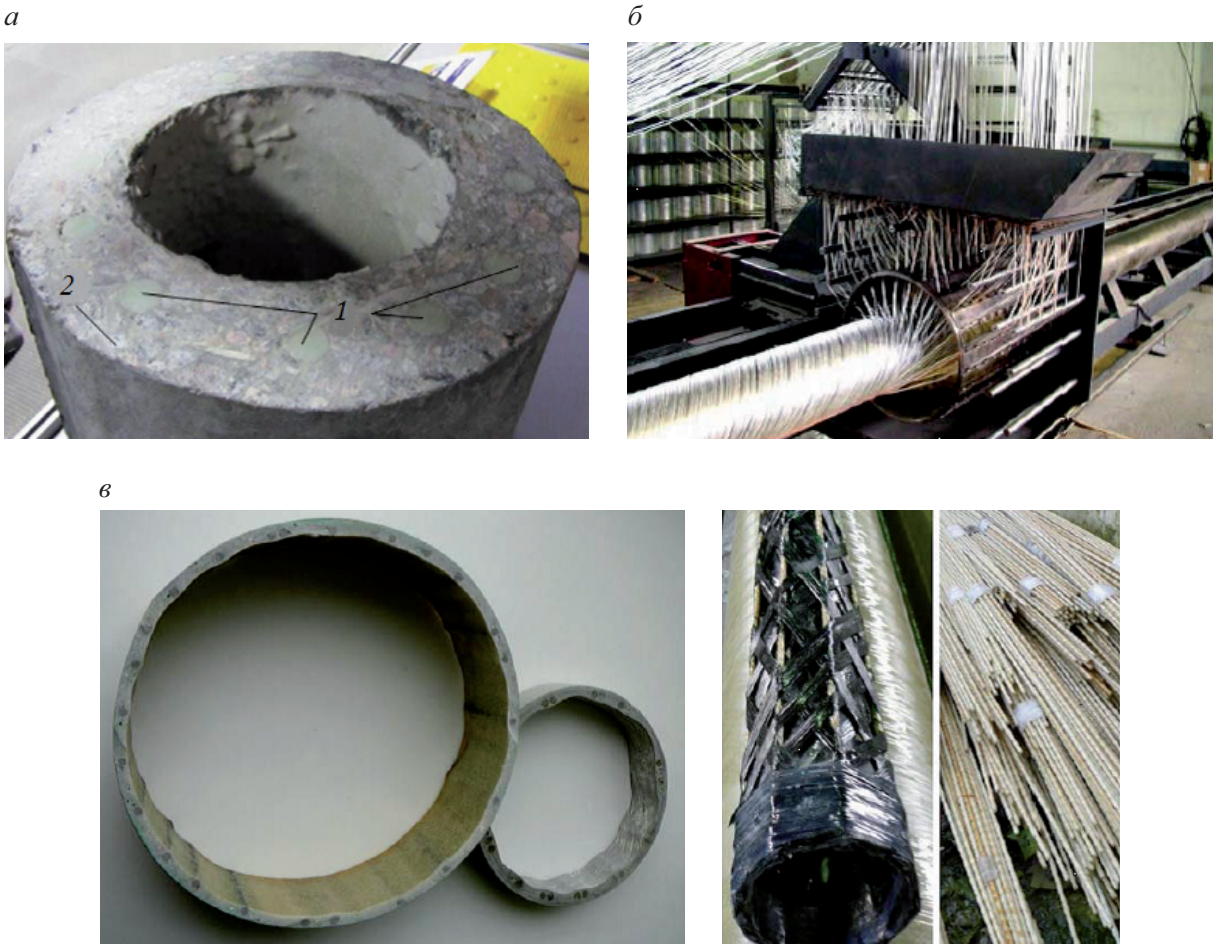


Рис. 3. Опоры с применением полимерных композитных материалов:
а – бетонная опора (*1* – стеклопластиковая арматура, *2* – бетон); *б* – стеклопластиковая опора путем намотки; *в* – комбинированная стеклопластиковая опора: справа – начало намотки, слева – готовая деталь

4) стойки опор без вибрационного нагружения и прошедшие вибронагружение соответствуют требованию ГОСТ 19330–2013 по трещиностойкости;

5) после вибрационного нагружения и приложения контрольных нагрузок стойки восстанавливают свою прямолинейность (прямолинейность стоек соответствует требованиям ГОСТ 19330–2013);

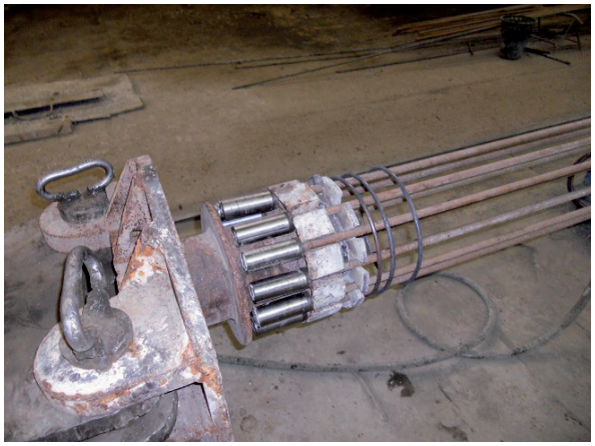
6) прогиб на уровне контактного провода при приложении нормативного изгибающего момента до и после вибрационного нагружения удовлетворяет требованиям ГОСТ 19330–2013;

7) все исследуемые стойки опор до и после вибрационного нагружения обеспечивают коэффициент безопасности по разрушению (1,6 $М^{Н}$).

Таким образом, разработанная технология преднапряжения и анкерования композитной арматуры позволяет армировать бетонные изделия и производить продукты высокого качества, которые обладают преимущественными характеристиками в сравнении с железобетонными изделиями. Полученные результаты подтвердили возможность применения бетонных стоек опор контактной сети РЖД, армированных преднапряженной композитной арматурой [7].

Богатый опыт изготовления стеклопластиковых опор путем намотки имеют производители опор освящения и высоковольтных

а *б*



в *г*

Рис. 4. Стойка опоры контактной сети с композитным армированием, испытания стойки опоры в состоянии упругой деформации:
а – монтаж композитной преднапряженной арматуры с анкерами; *б* – стойка опоры контактной сети с композитным армированием; *в* – стойка опоры на испытательном стенде перед разрушением опоры; *г* – стойка опоры на испытательном стенде после разрушения опоры

линий электропередачи. Такие опоры широко используются во многих странах: США, Канаде, Австралии, Норвегии, Багамские острова и др., в России они эксплуатируются в ОАО «Липецкэнерго» и ОАО «Кубаньэнерго» [8, 9].

Существует несколько способов изготовления композитных опор:

1. Технология спиральной намотки (СН) (рис. 5) [10].

Толщина слоя стеклопластиковой ленты определяется по уравнению Клеро, где $r \cdot \sin\varphi = \text{const}$:

$$h_{\text{в}} = h_x \frac{\cos\varphi_x}{\cos\varphi_{\text{в}}}.$$

2. Пермская непрерывная технология (ПНТ) (рис. 6) [10].

3. Технология мокрой намотки стеклянного ровинга (рис. 7) [8].

Композитные опоры, выполненные по этим технологиям, обладают рядом преимуществ, как, например, относительную простоту изготовления. Однако существенным недостатком такого производства является гибкость конструкций, что подтверждается многочисленными исследованиями производителей опор [8, 9].

Из вышеизложенного можно сказать, что данный вид изготовления поддерживающих конструкций не подходит для опор контактной сети, хотя полученный опыт производства намотки стеклопластика в ближайшем будущем позволит освоить технологии, отвечающие нормативным требованиям «Трансэнерго» –

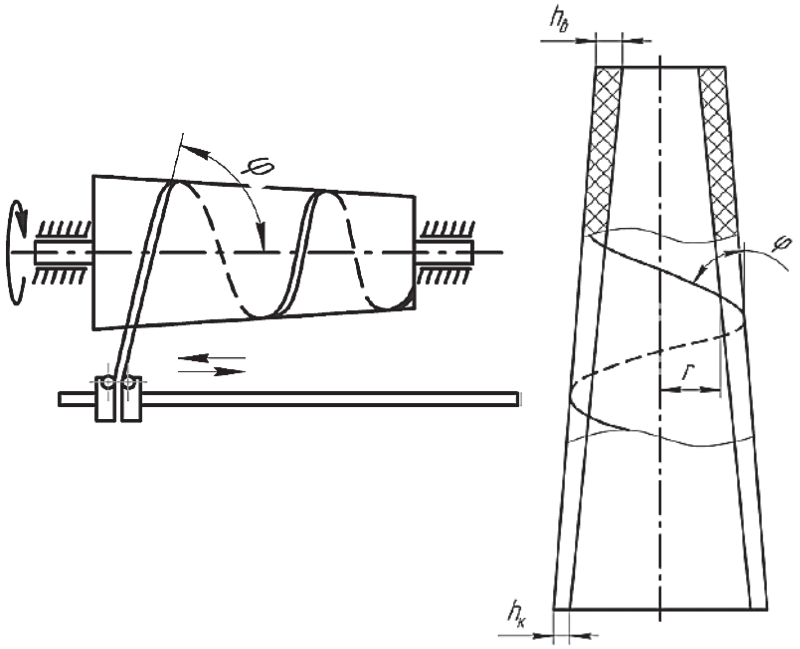


Рис. 5. Технология спиральной намотки

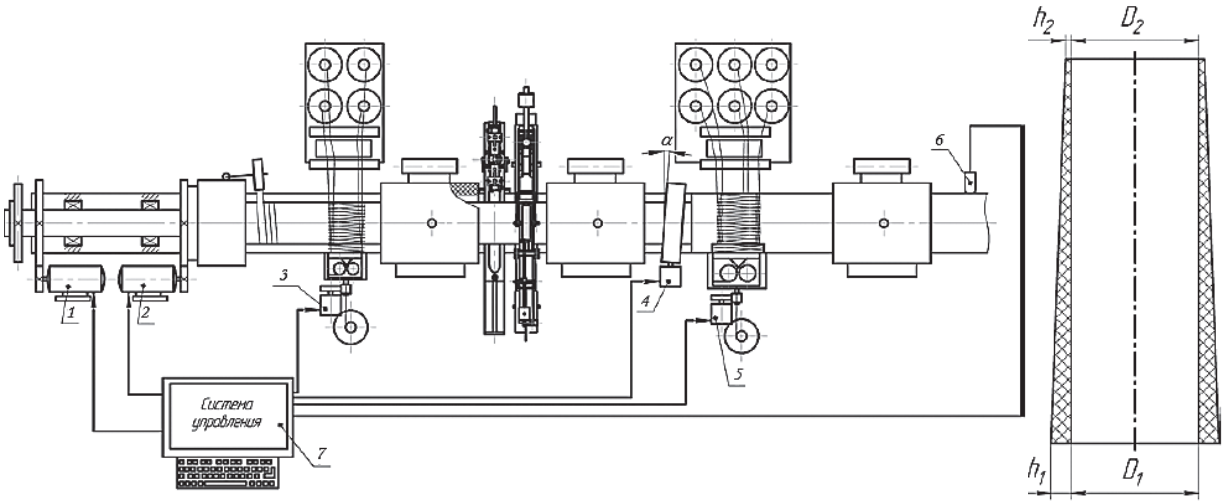


Рис. 6. Схема автоматического управления толщиной и структурой:
1 – главный привод (вращение оправки); *2* – привод кругового копира; *3* – привод укладчика продольной арматуры; *4* – привод «активной» опоры; *5* – привод укладчика продольной арматуры основного наружного слоя; *6* – датчик толщины стенки; *7* – система управления толщиной и структурой

филиала ОАО «РЖД». Одним из таких реализованных проектов является стойка коммутационная [10], установленная в Нижегородском отделении ОАО «РЖД».

С целью повышения прочностных характеристик некоторыми производителями освоена технология производства комбинированных композитных опор. Основная суть такой технологии заключается в применении армирования и непрерывной намотки стеклопластикового ровинга, как показано на рис. 3, *в*.

Выбор армировочного материала подробно изложен в [11]. При этом следует отметить, что

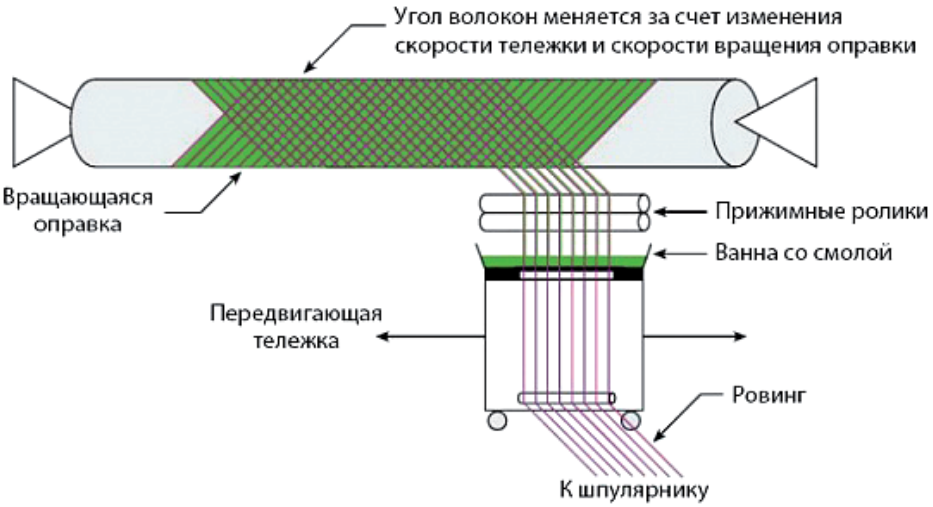


Рис. 7. Технологический процесс мокрой намотки стеклянного ровинга

одним из важных показателей является прочность армирующих материалов на разрыв в продольном направлении. Анализ данного параметра представлен на рис. 8. На нем видно, что стальная арматура существенно уступает композитам, однако и среди них существуют отличия. С точки зрения электрической прочности можно исключить углепластик, так как он служит проводником. Соотношение базальтопластика и стеклопластика находится в пределах 200 Н/мм^2. В настоящее время ведутся изучение свойств и экономическое обоснование применения этих материалов, потому выбор армирующего материала остается за производителем.

Процедура намотки выполняется по технологиям, описанным выше, и также зависит от выбора производителя.

Стоит отметить, что технология комбинированных опор, как и технология намотки, пока не реализована при изготовлении стоек контактной сети железных дорог, хотя при этом является одной из самых перспективных.

В ходе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1) классифицированы типы опор, используемые для поддержания устройств контактной подвески;

2) рассмотрены нормативные документы, относящиеся к стойкам опор контактной сети железных дорог;

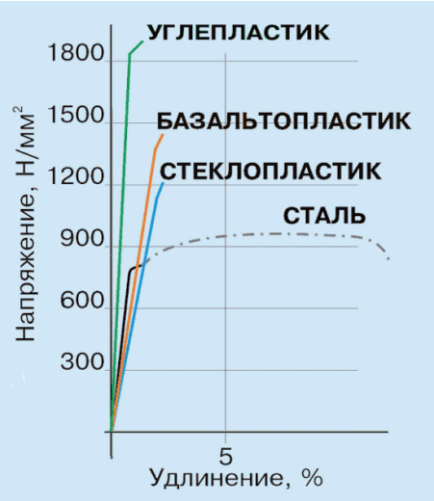


Рис. 8. Характеристики армирующих материалов

3) проанализировано общее количество опор, находящихся на балансе «Трансэнерго» – филиала ОАО «РЖД», определены их основные дефекты;

4) выполнен анализ работоспособности опор контактной сети железных дорог, созданных из полимерных композитных материалов. Определено, что метод намотки стеклопластикового ровинга и комбинированный метод широко используются в изготовлении стоек для опор промышленной энергетики, но производство опор для контактной сети железных дорог данными способами не освоено или находится в процессе изучения (испытаний). Что касает-

ся опор, армированных композитной арматурой, то такие стойки прошли путь от НИОКР до опытной эксплуатации. По информации, предоставленной заведующим отделом «Контактная сеть и токосъем» ОАО «ВНИИЖТ» П. Г. Тюрниным [12], первая партия опор контактной сети, выполненных с применением композиционных материалов (производство Нанотехнологического центра композитов), уже установлена на железнодорожном перегоне Павловский Посад–Электрогорск и на станции Люблино. Вторая партия прошла во ВНИИЖТ сравнительные ресурсные испытания методом циклического нагружения, по результатам которых была рекомендована к опытной эксплуатации.

Данную тему необходимо внедрить в учебный процесс для студентов технических направлений в области энергообеспечения, так как опоры из полимерных композитных материалов перспективны для установки в устройствах общего электроснабжения и контактной сети железных дорог.

Библиографический список

1. ГОСТ 19330–2013. Стойки для опор контактной сети железных дорог. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2014. – 52 с.

2. Контактная сеть и воздушные линии: иллюстр. пособие по техническому обслуживанию и ремонту контактной сети и воздушных линий. – М. : Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «Российские железные дороги» ; ТРАНСИЗДАТ, 2006. – 296 с.

3. Анализ работы Трансэнерго по итогам в 2016 году. – М. : Трансэнерго, 2017. – 93 с.

4. Кочунов Ю. А. Современные поддерживающие конструкции / Ю. А. Кочунов, А. О. Грехов // Инновационный транспорт–2016 : специализация железных дорог : материалы Междунар. науч.-технич. конференции, посвященной 60-летию основания УрГУПС. – Екатеринбург : УрГУПС, 2017. – С. 67–73.

5. Николаев В. Н. Применение композитной полимерной арматуры для опор контактной сети с анкерными креплениями на фундаментах / В. Н. Николаев, В. Ф. Степанова // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 7. – С. 79–84.

6. Николаев В. Н. Применение арматуры композитной полимерной для опор контактной сети с анкерным креплением на фундаментах / В. Н. Николаев // Материалы Междунар. конференции «Композиты СНГ». – Роза Хутор Сочи, 2017. – URL : http://composites-cis.com/proceedings2017/24.pdf (дата обращения : 18.04.2018).

7. Царьков А. А. Ускоренные ресурсные испытания опор контактной сети железных дорог / А. А. Царьков, П. Г. Тюрнин, Д. В. Тартынский, В. В. Ивакин // Вестн. ВНИИЖТ. – 2016. – № 3. – С. 189–192.

8. Шаклеин О. В. Опоры из композиционных материалов : Производство и применение / О. В. Шаклеин // Материалы Междунар. конференции «Композиты СНГ». – Роза Хутор Сочи, 2012. – URL : http://composites-cis.com/proceedings2012/ru/6.pdf (дата обращения : 18.04.2018).

9. Шелест Е. А. Опоры на композитных стойках. Опыт применения / Е. А. Шелест // Материалы Междунар. конференции «Композиты СНГ». – Роза Хутор Сочи, 2012. – URL : http://composites-cis.com/proceedings2012/ru/9.pdf (дата обращения : 25.04.2018).

10. Рапопорт А. Ц. Эффективные опорно-мачтовые конструкции из композитов / А. Ц. Рапопорт // Материалы Междунар. конференции «Композиты СНГ». – Роза Хутор Сочи, 2012. – URL : http://composites-cis.com/proceedings2012/ru/4.pdf (дата обращения : 25.04.2018).

11. Орешкин Д. А. Композитная арматура для армирования бетонов. Свойства, преимущества и ограничения. Состояние нормативной базы за рубежом и по странам СНГ / Д. А. Орешкин // Материалы Междунар. конференции «Композиты СНГ». – Роза Хутор Сочи, 2011. – URL : http://composites-cis.com/materials/ru/18.pdf (дата обращения : 18.04.2018).

12. Тюрнин П. Г. Сравнительные ресурсные испытания опор контактной сети, выполненных с применением композиционных материалов / П. Г. Тюрнин. – URL : http://www.vniizht.ru/?id=20&news=376 (дата обращения : 18.04.2018).

References

1. *GOST 19330–2013. Stoiky dlya opor kontaktnoy sety zheleznykh dorog. Tekhnicheskiye usloviya* [*GOST 19330–2013. Supporting poles for overhead structures. Specifications*]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 52 p. (In Russian)

2. *Kontaktnaya set i vozdushniye linii: illyustr. posobiye po tekhnicheskomu obsluzhyvaniyu i remontu kontaktnoy sety i vozdushnykh liniy* [*Overhead system and overhead lines: illustrated aid on repair and maintenance of overhead system and overhead lines*]. Moscow, Department of electrification and electric power supply of OAO "Russian Railways", TRANSIZDAT Publ., 2006, 296 p. (In Russian)

3. *Analyz raboty Transenergo po itogam v 2016 godu* [*Transenergo performance analysis following the results of 2016*]. Moscow, Transenergo Publ., 2017, 93 p. (In Russian)

4. Kochunov Y.A. & Grekhov A.O. Sovremenniye podderzhyvayu konstruktsii [Modern supporting structures]. *Innovatsionniy transport–2016: spetsializatsiya zheleznykh dorog: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii*, *posvyashchennoy 60-letiyu osnovaniya UrGUPS* [*Modern transport–2016: railroad specialization: proceedings of the International science and technology conference*, *dedicated to the 60th anniversary of UrGUPS foundation*]. Yekaterinburg, UrGUPS Publ., 2017, pp. 67–73. (In Russian)

5. Nikolayev V.N. & Stepanova V.F. Primeneniye kompositnoy polimernoy armatury dlya opor kontaktnoy sety s ankernymy krepleniyamy na fundamentakh [Application of composite polymeric reinforcement for contact-line support with anchorage on foundations]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo* [*Industrial and civil engineering*], 2016, no. 7, pp. 79–84. (In Russian)

6. Nikolayev V.N. Primeneniye armstury kompositnoy polymernoy dlya opor kontaktnoy sety s ankernym krepleniyem na fundamentakh [Application of composite polymeric reinforcement for contact-line support with anchorage on foundations]. *Materialy Mezhdunar. konferentsii "Kompozity SNG"* [*Proceedings of the International conference "Composites of the CIS"*]. Roza Khutor Sochi, 2017. URL: http://composites-cis.com/proceedings2017/24.pdf (accessed: 18.04.2018). (In Russian)

7. Tsarkov A.A., Tyurnyn P.G., Tartynskiy D.V. & Ivakyn V.V. Uskorenniye resursniye ispytaniya opor kontaktnoy sety zheleznykh dorog [Accelerated life tests of railroad contact-line support]. *Vestnik VNIIZhT* [*Bulletin of VNIIZhT*], 2016, no. 3, pp. 189–192. (In Russian)

8. Shakleyn O.V. Opory iz kompozitsionnykh materialov. Proizvodstvo i primeneniye [Contact-line support made from composite materials. Production and application]. *Materialy Mezhdunar. konferentsii "Kompozity SNG"* [*Proceedings of the International conference "Composites of the CIS"*]. Roza Khutor Sochi, 2012. URL: http://composites-cis.com/proceedings2012/ru/6.pdf (accessed: 18.04.2018).

9. Shelest E.A. Opory na kompozitnykh stoikakh. Opyt primeneniya [Contact-line support on composite supporting poles]. *Materialy Mezhdunar. konferentsii "Kompozity SNG"* [*Proceedings of the International conference "Composites of the CIS"*]. Roza Khutor Sochi, 2012. URL: http://composites-cis.com/proceedings2012/ru/9.pdf (accessed: 25.04.2018). (In Russian)

10. Rapoport A. Ts. Effektivniye oporno-machtoviye konstruktsii iz kompozitov [Effective support mast design produced from composites]. *Materialy Mezhdunar. konferentsii "Kompozity SNG"* [*Proceedings of the International conference "Composites of the CIS"*]. Roza Khutor Sochi, 2012. URL: http://composites-cis.com/proceedings2012/ru/4.pdf (accessed: 25.04.2018). (In Russian)

11. Oreshkin D.A. Kompozitnaya armature dlya armirovaniya betonov. Svoistva, preimushchestva i ogranicheniya. Sostoyaniye normativnoy bazy za rubezhom i po stranam SNG [Composite reinforcement designed for concrete. Properties, advantages and restrictions. The state of the normative base abroad and in the CIS countries]. *Materialy Mezhdunar. konferentsii "Kompozity SNG"* [*Proceedings of the International conference "Composites of the CIS"*]. Roza Khutor Sochi, 2011. URL: http://composites-cis.com/materials/ru/18.pdf (accessed: 18.04.2018). (In Russian)

12. Tyurnin P.G. *Sravnitelniye resursniye ispytaniya opor kontaktnoy sety*, *vypolnennykh s prymeneniyem kompozitsionnykh materialov* [*Comparison life tests of contact-line support*, *made with the use of composite materials*]. URL: http://www.vniizht.ru/?id=20&news=376 (accessed: 18.04.2018). (In Russian)

*КОЧУНОВ Юрий Александрович – канд. техн. наук, доцент, yukochunov@mail.ru; ВОЛГИН Евгений Сергеевич – аспирант, EvgenVolgin007@yandex.ru; ЧЕБАКОВ Сергей Александрович – студент, cergey97clever@mail.ru (Уральский государственный университет путей сообщения).

УДК 625.11

Е. П. Ленченкова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАССЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Дата поступления: 01.06.2018
Решение о публикации: 16.06.2018

Аннотация

Цель: Разработка математической модели трассы железнодорожного пути на основе исходных данных прогрессивного типа (лазерное сканирование) в проектировании железных дорог. **Методы:** Используются регрессионный анализ (метод наименьших квадратов), координатные методы расчета положения точки в пространстве. **Результаты:** Получена математическая модель, описывающая при помощи математических зависимостей положение трассы железнодорожного пути в трехмерном пространстве. Установлена целесообразность применения аппроксимационных моделей, которые позволяют обеспечить сглаживание данных лазерной съемки. Разработаны алгоритмы регуляризации и глобализации исходных данных. **Практическая значимость:** Предложенная модель универсальна для описания положения трассы железнодорожного пути на всех этапах жизненного цикла линии. Ее применение в проектировании целесообразно для компенсирования погрешностей съемки, содержания пути по координатам, расчета параметров плана и профиля.

Ключевые слова: Мобильное лазерное сканирование, аппроксимационная модель, сплайн, опорные точки, моделирование трассы железнодорожного пути.

Elena P. Lenchenkova, lead specialist (LLC “INVESTSTROYPROEKT”) RAILROAD TRACK MODELING BASED ON THE RESULTS OF MOBILE LASER SCANNING

Summary

Objective: To develop a mathematical model of the railroad track based on the initial progressive-type data (laser scanning) in railroad design. **Methods:** Regression analysis (least-square method), as well as coordinate methods of calculating point position in space were applied. **Results:** The mathematical model, which could describe the position of the railroad track in three-dimensional space by means of mathematical relations, was obtained. Applicability of approximating models was established. The models make it possible to provide smoothing of laser survey data. Regularization and globalization algorithms of initial data were developed. **Practical importance:** The introduced model is universal when describing the position of the track at all stages of life cycle of the railway line. It is reasonable to apply the presented model in design engineering in order to balance survey errors, maintain the track in coordinates, as well as to calculate design and profile parameters.

Keywords: Mobile laser scanning, approximating model, spline, supporting points, modeling of the railway track.

На современном этапе существуют несколько способов получения исходных данных для проектирования реконструкции железных дорог, но к основным относятся традиционная тахеометрическая съемка и лазерное сканирование [1]. Причем последний способ занимает все более уверенные позиции и, возможно, в ближайшем будущем станет самым часто применяемым. Однако потенциал лазерного сканирования в области проектирования железных

дорог еще недостаточно раскрыт, причинами чему являются малый опыт его использования и отсутствие российских программных продуктов для обработки результатов.

Лазерное сканирование может быть наземным, воздушным и мобильным. Для проектирования путевой части реконструкции железных дорог, как и других линейно-протяженных объектов, длина которых значительно превышает ширину, оптимальным является мобильное лазерное сканирование (МЛС). Суть данного способа [2] состоит в перемещении лазерного сканера вдоль оси объекта съемки. Как правило, установка представляет собой размещенный на крыше локомотива лазерный сканер или же комплекс, состоящий из движущейся по рельсам конструкции со сканирующим прибором. В первом случае результатами съемки являются массивы точек (сотни миллионов и миллиарды), которые содержат данные о всех объектах инфраструктуры и нуждаются в назначении семантики либо в выделении необходимых точек, в частности рельсовых нитей. Выборка точек производится вручную [3]. Во втором случае результаты съемки представляются в виде точек рельсовых нитей/оси пути [4, 5], что более удобно для дальнейшего процесса проектирования.

Главными отличительными особенностями исходных данных, полученных путем МЛС, являются их обширность и информативность, точки лазерного отражения могут располагаться на расстоянии менее 5 см друг от друга. Таким образом, проектировщик, казалось бы, владеет абсолютно полной информацией о положении, например, рельсовых нитей. Но такая полнота данных не всегда помогает специалисту, даже наоборот, может усложнить процесс проектирования их объемами. К тому же выбрать из множества точек, находящихся рядом, истинную довольно проблематично.

Если говорить о съемке рельсовой нити, то среди таких точек могут попадаться ошибочные, наличие которых может привести к возникновению неточностей, искажению реального положения рельсовых нитей. Это могут быть точки не только верха головки рельса, но и боковых граней рельса (рис. 1); солнечные блики на рельсе, помеха и ограничение видимости также могут служить причиной появления ошибочных точек.

Другой проблемой лазерной съемки, связанной с технологией процесса МЛС, является наличие среди точек лазерного отражения ложных. Такие точки могут появляться из-за потери прибором отражателя, при его поиске образуются «вихри» – облака ложных точек, также искажающие информацию о реальном положении точек рельсовых нитей. В такой ситуации истинные точки пути могут остаться неучтенными. Анализ опыта обработки данных МЛС показал, что протяженность этих пропусков может достигать 5,5 м [6]. Несмотря на то, что такие пропуски значительно не повлияют на общее координирование рельсовой нити, их наличие должно приниматься во внимание.

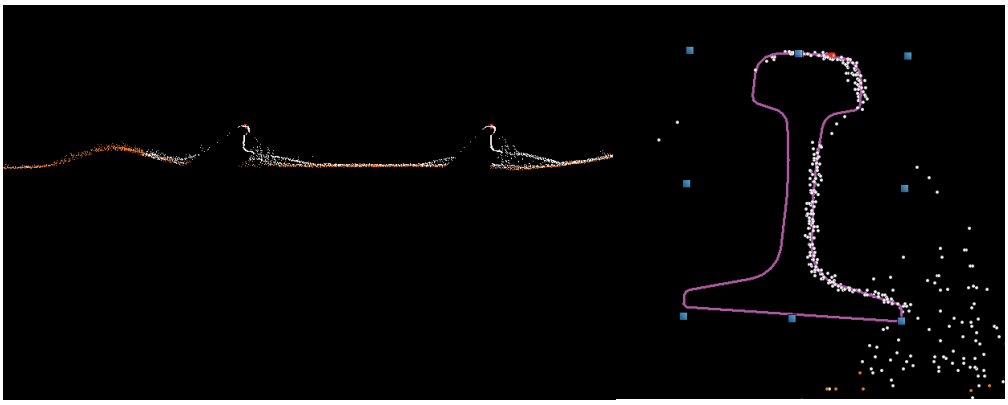


Рис. 1. Точки лазерного отражения на поверхности рельса

Решением всех вышеупомянутых проблем может стать описание положения оси пути/рельсовых нитей с помощью аппроксимационных моделей. Аппроксимация – метод обработки данных, заключающийся в представлении их совокупности в виде некоторой функции $f(x)$ [7, с. 21]. Аппроксимационная модель состоит из соединенных сплайнами (отрезками прямых, кривых, парабол, окружностей и т. п.) узлов. Положение узлов – точек соединения сплайнов – определяется с учетом максимального приближения модели к исходным точкам, при этом положение точек не принимается истинным и может быть скорректировано. Положение оси пути/рельсовой нити аппроксимируется посредством регрессионного анализа (методом наименьших квадратов [8]) в некотором коридоре допускаемых отклонений точек пути от их зафиксированного съемкой положения на области определения этих точек (рис. 2). В качестве сплайнов можно применять отрезки прямых, окружностей, клотоид – наиболее приближенные к конфигурации рельсовой нити фигуры.

Оптимальной по наглядности, информативности и удобству использования моделью исходных данных является регулярная и глобализованная. Под регулярностью по аналогии с регулярной цифровой моделью рельефа [9] в данном случае понимается равенство шагов – расстояний, на которых точки модели

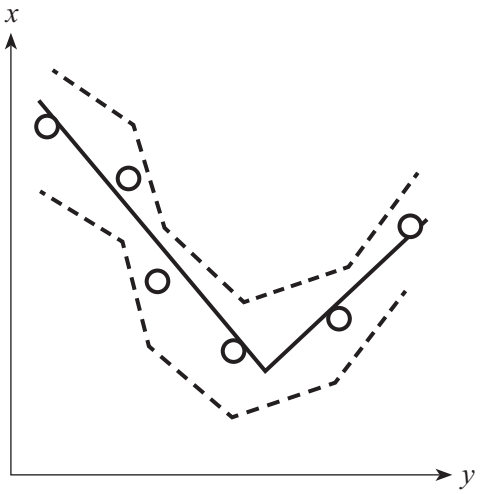


Рис. 2. Схема аппроксимационной модели (сплайны – отрезки прямых)

расположены друг от друга; под глобализованностью – укрупнение шага точек модели по сравнению с средним шагом точек исходных данных.

Для получения регулярной глобализованной модели вычисляются суммы расстояний между точками исходных данных до тех пор, пока сумма не превысит или станет равна величине желаемого шага регулярной модели:

$$S = \sum_{j=1}^{n} s_j + s_{j+1},$$

где s_j – расстояние между j-й и $j + 1$-й точками, м; s_{j+1} – расстояние между $j + 1$-й и $j + 2$-й точками, м; n – количество точек; $S \leq 10$ при выбранном шаге 10 м, $S \leq 20$ при выбранном шаге 20 м.

Совокупность n точек представляет собой участок регуляризации, который методом наименьших квадратов аппроксимируется полиномом третьей степени (рис. 3). Положение опорных точек признается истинным. Начиная со второй группы точек, на стыках участков регуляризации точкам присваиваются средние значения координат для соседних полиномов. Аппроксимационная модель состоит из опорных точек и полиномов третьей степени – сплайнов, представляющих собой функции, которые обеспечивают сглаживание съемочных точек на области их определения. Положение любой точки такой модели задается соответствующим участку регуляризации полиномом. Положение съемочных точек не признается истинным.

Существующие средства обработки исходных данных рассматриваемого типа используют интерполяционные модели: точки съемки, соединенные сплайнами. Генерирование выборки точек с регулярным шагом осуществляется с помощью интерполяции координат двух соседних точек с известными координатами.

Пример отличия положения какой-либо из точек интерполяционной и аппроксимационной моделей проиллюстрирован на рис. 4.

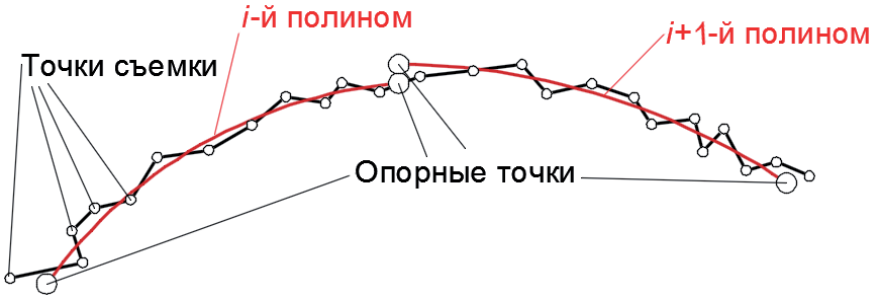


Рис. 3. Аппроксимация исходных данных точек съемки полиномами третьей степени

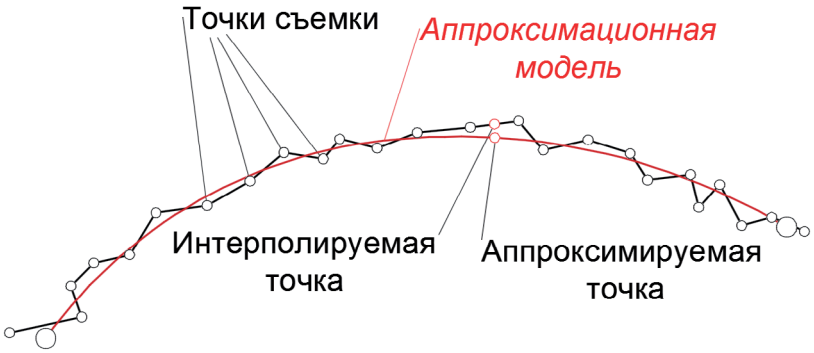


Рис. 4. Сравнение положения точек интерполяционной и аппроксимационной моделей

Определение положения искомой точки интерполяционной модели осуществляется посредством интерполяции координат двух соседних съемочных точек. В случае, если одной из соседних точек окажется ложная или ошибочная, положение полученной модели в пространстве исказится, и точность результатов таких операций может вызвать сомнения. Вычисление координат искомой точки аппроксимационной модели представляет собой нахождение корней определенного методом наименьших квадратов полиномом уравнения. Таким образом, координаты искомой точки описывают наиболее вероятное положение трассы.

Разработанная аппроксимационная модель:

1) характеризует положение оси пути/рельсовой нити с помощью математических законов (уравнения сплайнов), что позволяет определить координаты любой точки модели;

2) является более точным описанием положения рельсовой нити в пространстве за счет удаления ложных и ошибочных точек (регрессионный анализ сглаживает ошибочные данные), так как рельсовые нити – упругие стальные полосы – представляют собой в действительности отрезки прямых и окружностей;

3) обеспечивает быстродействие использующих ее алгоритмов благодаря снижению объемов информации об исходных данных (модель содержит только координаты опорных точек и полиномы соединяющих эти точки сплайнов);

4) является наглядной и информативной. Координаты опорных точек могут отображаться на плане и в проектной документации, при этом не произойдет потери точности положения трассы в целом и отдельных ее точек в частности.

Практическое применение разработанной модели на объектах Северо-Кавказской железной дороги и БАМа, где лазерное сканирование использовалось для получения исходных данных, позволило установить, что эта модель:

1) позволяет компенсировать погрешности съемки в 1–3 см;

2) удобна для дальнейшего расчета существующих параметров плана и продольного профиля [10];

3) обеспечивает содержание пути по проектным координатам с отклонением фактического положения пути от проектного в диапазоне ±2 см.

Библиографический список

1. Середович В. А. Наземное лазерное сканирование : монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.

2. Mendenhall S. Mobile laser scanning / S. Mendenhall // Civil+structural engineer. – URL : http://www.cenews.com/article/8332/mobile-laser-scanning (дата обращения : 15.04.2017).

3. Ленченкова Е. П. Применение мобильного лазерного сканирования в проектировании железных дорог / Е. П. Ленченкова // Европейская наука XXI века : материалы Междунар. науч.-практич. конференции. Сб. 31. Технические науки. – Пшемысль : Наука и образование, 2014. – С. 50–52.

4. Фирма ООО «Г. Ф. К.» : официальный сайт // Каталог // Брошюра. – URL : http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/railway/amberg_rail_ru_lowres.pdf (дата обращения : 20.07.2017).

5. AmbergGroup Official site. – URL : http://www.ambergtechnologies.ch/en/products/rail-surveying/amberg-survey (дата обращения : 21.03.2018).

6. Бучкин В. А. Упорядочение данных координатной съемки железнодорожных путей / В. А. Бучкин, К. И. Благоразумов // Вестн. РГУПС. – Ростов-н./Д. : РГУПС, 2008. – № 1. – С. 136–140.

7. Бучкин В. А. Математические модели и методы в инженерных расчетах. Конспект лекций : учеб. пособие / В. А. Бучкин, Е. А. Рыжик. – М. : МИИТ, 2004. – 76 с.

8. Bullock R. Least-squares circle fit // Developmental testbed center – P. 1–3. – URL : https://dtcenter.org/met/users/docs/write_ups/circle_fit.pdf (дата обращения : 02.04.2018).

9. Левчук Г. П. Прикладная геодезия : основные методы и принципы инженерно-геодезических работ : учебник для вузов / Г. П. Левчук. – М. : Недра, 1981. – 438 с.

10. Бучкин В. А. Перспективы развития технологий укрупненного проектирования объектов строительства / В. А. Бучкин, И. М. Лисицын // Материалы IX Междунар. науч.-практич. конференции “Vedecky Prumysl Evropskeho Kontinentu–2013”. – Praha : Publ. House “Education and Science” s.r.o, 2013. – P. 47–51.

References

1. Seredovich V. A., Komissarov A. V., Komissarov D. V. & Shirokova T. A. *Nazemnoye lazernoye skanirovaniye:* monografiya [*Surface laser scanning*: monography]. Novosibirsk, Siberian State Academy of Geodesy Publ., 2009, 261 p. (In Russian)

2. Mendenhall S. Mobile laser scanning. *Civil+structural engineer.* URL: http://www.cenews.com/article/8332/mobile-laser-scanning (accessed: 15.04.2017).

3. Lenchenkova E. P. Primeneniye mobilnogo lazernogo skanirovaniya v proektirovanii zheleznykh dorog [Application of mobile laser scanning in railroad design]. *Evropeiskaya nauka XXI veka: Materialy Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii. Sb. 31. Tekhnicheskiye nauky* [*European science of the 21st century: Proceedings of the International research and practical conference. Coll. 31. Engineering sciences*]. Pshemysl, Science and education Publ., 2014, pp. 50–52. (In Russian)

4. *Firma OOO “G. F. K.”* [*OOO «G. F.K.» firm*]. Ofitsialniy sait//Katalog//Broshura [Official site//Catalogue//Booklet]. URL: http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/railway/amberg_rail_ru_lowres.pdf (accessed: 20.07.2017). (In Russian)

5. AmbergGroup. Official site. URL: http://www.ambergtechnologies.ch/en/products/rail-surveying/amberg-survey/(accessed: 21.03.2018).

6. Buchkin V. A. & Blagorazumov K. I. Uporyadocheniye dannykh koordinatnoy syemky zheleznodorozhnykh putey [Data alignment of coordinate track survey]. *Vestnik RGUPS* [*Bulletin of RGUPS*]. Rostov-on-Don, RGUPS Publ., 2008, no.1, pp. 136–140. (In Russian)

7. Buchkin V. A. & Ryzhik Y. A. *Matematicheskiye modely i metody v inzhenernykh raschetakh. Konspekt*

lektsiy: ucheb. posobiye [*Mathematical models and methods in engineering design. Compendium of lectures*: study guide]. Moscow, MIIT Publ., 2004, 76 p. (In Russian)

8. Bullock R. Least-squares circle fit. *Developmental testbed center*, pp. 1–3. URL: https://dtcenter.org/met/users/docs/write_ups/circle_fit.pdf (accessed: 02.04.2018).

9. Levchuk G. P. *Prikladnaya geodeziya: osnovniye metody i printsipy inzhenerno-geodezicheskykh rabot:* uchebnik dlya vuzov [*Applied geodesy: the main methods and principles of geodetic engineering*: college textbook]. Moscow, Nedra Publ., 1981, 438 p. (In Russian)

10. Buchkin V. A. & Lisitsyn I. M. Perspektivy razvitiya tekhnologiy ukrupnennogo proektirovaniya obyektov stroitelstva [Prospects of technological development in large scale design of building projects]. *Materialy IX Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii* "Vedecky Prumysl Evropskeho Kontinentu" [*Proceedings of the 9th International Research and Training Conference "*Vedecky Prumysl Evropskeho Kontinentu"]. Praha, Publ. House "Education and Science" s. r.o, 2013, pp. 47–51. (In Russian)

ЛЕНЧЕНКОВА Елена Павловна – ведущий специалист, lenchenkova_lena@mail.ru (ООО «Инвестстройпроект»).

УДК 621.311

А. Н. Марикин, К. К. Степанова

ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОДСИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Дата поступления: 08.09.2018
Решение о публикации: 15.09.2018

Цель: Оценить основные факторы, прорывные технологии, на основе которых должна быть создана интегрированная сеть электрифицированных линий скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в России. **Методы:** Оптимизация системы тягового электроснабжения по определяющим критериям минимизации ресурсов и энергоэффективности. **Результаты:** Произведен анализ показателей качества электрообеспечения тяги поездов, уровня напряжения у токоприемников для различных систем электрической тяги постоянного и однофазного переменного тока. Главными факторами, существенно влияющими на показатели эффективности, являются уровень напряжения и род тока электротяговой сети. Показано, что наилучшими показателями конкурентоспособности обладает перспективная система электрической тяги, подсистема электроснабжения которой выполняется на постоянном токе высокого напряжения с использованием электроподвижного состава 24 кВ постоянного тока на основе преобразовательного комплекса нового поколения, обладающего универсальностью применения. **Практическая значимость:** Предложенная методика обоснования варианта электрификации с помощью диаграммы взаимозависимости расстояния между тяговыми подстанциями и сечения проводов контактной сети позволяет при проектировании электроэнергетической инфраструктуры железнодорожных линий интенсивного движения обосновать конкурентоспособную систему электрической тяги постоянного тока высокого напряжения.

Ключевые слова: Система тягового электроснабжения, постоянный ток, конкурентоспособность, производительность, род тока, уровень напряжения, высокое напряжение, универсальность применения.

Alexander N. Marikin, D. Sci. Eng., associated professor, head of a chair, marikin_s@mail.ru; ***Kseniya K. Stepanova,** postgraduate student, kjsenia@gmail.com (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) OPTIMIZATION SPECIFICITIES OF ELECTRIC PROPULSION POWER SUPPLY SUBSYSTEM ON RAILWAY TRANSPORT

Summary

Objective: To assess the basic factors, innovative technologies, on the basis of which an integrated network of electrified lines of high-speed rail is to be created in Russia. **Methods:** Optimization of the traction power supply system according to characteristic criteria of resources and energy efficiency minimization. **Results:** Quality indices of power supply of hauling operations, voltage level of collectors for different electric propulsion systems with direct and single-phase alternating current were analyzed. The key factors, significantly influencing the performance indices, are the voltage level and type of current of an electric powered network. It was shown that the system of electric propulsion is a promissory system and possesses the best competitiveness indices, as its electric power supply subsystem is functioning on high-voltage direct current with the use of a 24 kW direct current electric stock on the basis of a new multipurpose generation converting complex. **Practical importance:** The suggested justification method of electrification variant by means of a dependence diagram depicting spacing between substations

and catenary wire section makes it possible to justify a competitive high-voltage direct current electric propulsion system during the design of electric power infrastructure for busy railway lines.

Keywords: Traction power supply system, direct current, competitive ability, capacity, type of current, voltage level, high voltage, utilization flexibility.

Развитие технических средств электрической тяги по мере увеличения провозной и пропускной способностей железнодорожных линий в условиях повышения массы поездов и скорости движения на всех этапах развития осуществлялось на основе повышения уровня напряжения в электротяговых сетях.

История электрической тяги на базе передачи электроэнергии постоянного тока напряжением 100–150 В от стационарных источников по сети началась с 1879 г. с небольшой железнодорожной линии Берлинской международной выставки (фирма Siemens). Затем в 1884 г. в Париже на трамвайной линии была использована передача электрической энергии на постоянном токе напряжением 500 В, а в Торонто проведен эксперимент с напряжением 1400 В.

Система однофазного переменного тока, а затем трехфазного тока напряжением 3300 В частотой $16^2/_3$ Гц применена в 1892 г. На однофазном токе напряжение вскоре увеличено до 15 кВ. В то же время на постоянном токе из-за отсутствия коммутационной аппаратуры постоянного тока высокого напряжения максимальное напряжение 3400 В было достигнуто только в 1914 г.

Обе системы, и переменного тока с напряжением 15 кВ, и постоянного тока с напряжением 3 кВ, обеспечивали реализацию графиков движения на магистральных линиях и приемлемые затраты на эксплуатацию, а также на технологии и материалы, доступные в данный период истории, примерно до 1950-х годов.

Далее в мире и СССР для системы однофазного переменного тока открывались новые возможности повышения уровня напряжения, а для постоянного тока сохранились ограничения на уровне 3 кВ. На переменном токе дальнейший рост напряжения до 25 кВ осуществлен на большинстве железнодорожных линий в мире, а на некоторых линиях, как, например, в Южной Африке для перевозки руды на участках с уклоном до 15 промиль, увеличен до 50 кВ. При этом промышленное исполнение контактной сети существенно не изменилось, за исключением большего расстояния между тяговыми подстанциями (ТП).

Для увеличения расстояния между подстанциями $L_{тп}$ в системе переменного тока напряжением 25 кВ в контактной сети (КС) предложена и получила распространение в ряде стран, включая Россию, автотрансформаторная система 2×25 кВ, в которой электроподвижной состав (ЭПС) находится под напряжением 25 кВ, а необходимая мощность электропотребления передается при напряжении 50 кВ от ТП до электровоза между соседними автотрансформаторами, расположенными на межподстанционной зоне (МПЗ) на расстоянии 10–15 км друг от друга.

Таким образом, при проектировании системы электроснабжения скоростных линий к лимитирующим факторам для достижения условий оптимизации относятся допустимая плотность тока, уровень изоляции и удельная механическая прочность проводов, а также условия безыскрового токосъема линий КС. Обоснованная предельная плотность тока [1] является исходной при расчете сечения проводов S, а удельная прочность – при определении натяжения проводов, необходимого для обеспечения требуемой скорости распространения волны при колебании проводов выше максимальной скорости движения токоприемников ЭПС.

В ходе проектирования [1] необходимо учитывать дополнительные лимитирующие факторы, последствия которых существенно влияют на возможные повреждения проводов КС. Наиболее серьезно и отрицательно воздействуют режимы коротких замыканий, при которых за время действия защит аварийные токи вызывают нагревание проводов выше

допустимой температуры. Защиты от токов коротких замыканий должны обеспечивать селективность отключения аварийных секций с учетом допустимого времени действия. Избирательность отключения должна быть обусловлена средствами отстройки защит с распознаванием максимальных рабочих токов и токов коротких замыканий по различным признакам, например по скорости нарастания аварийного и рабочего токов питающих линий присоединений к ТП и ПС.

Из опыта эксплуатации решение проблемы нагревания проводов достигается выбором максимальной температуры 85 °С, при которой не наступает деградация металла проводов. При этом температура перегрева 40 °С допустима в окружающей среде при 45 °С с учетом солнечной радиации. В данных условиях допустима максимальная плотность тока 4 А/мм^2. Постоянная времени нагрева проводов составляет порядка 10 мин, что позволяет допускать кратковременные перегрузки по току [2].

Наибольшая термическая напряженность проводов КС находится в зоне присоединения питающих линий к шинам ТП. В случае достижения предельного значения падения напряжения и нагрева проводов в наиболее нагруженной части КС в зоне подключения ТП может применяться бóльшее сечение проводов за счет дополнительного усиливающего провода, подключаемого параллельно на определенной части МПЗ.

Для сокращения потерь напряжения в КС на участках интенсивного движения, наряду с мерами по увеличению сечения проводов, используется возможность уменьшения расстояния между ТП с целью снижения максимальной плотности тока в проводах контактной подвески. При проектировании электрифицированной линии необходимо учитывать обе составляющие: предельную плотность тока (δ) и максимально допустимое значение потери напряжения (k).

На рис. 1 приведена классификация зон в координатах длина–сечение (L и S) для условий предельных значений плотности тока δ = = const и потери напряжения k = const. Выделены четыре зоны, в которых удовлетворяют-

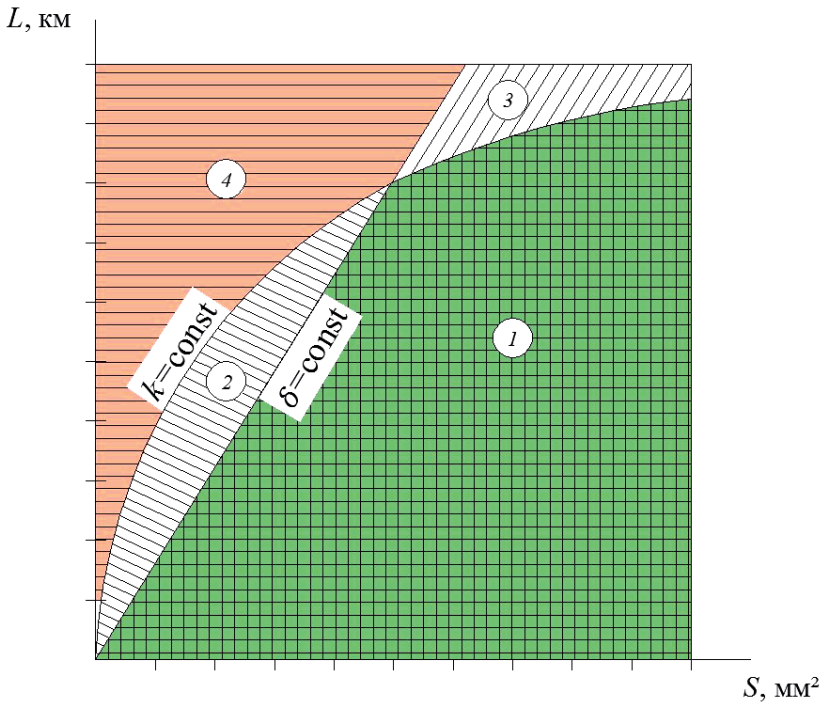


Рис. 1. Зависимость расстояния между ТП и сечением проводов КС при δ = const и k = const: *1–3* – соответствует требованиям: *1* – по S и ΔU_{max}, *2* – только по ΔU_{max}, *3* – только по S; *4* – не соответствует как по S, так и по ΔU_{max}

ся соответствующие требования по сечению проводов S и максимальной потере напряжения ΔU_{max}.

Ущерб от коротких замыканий требует значительных затрат на восстановление работоспособности и производительности электрифицированной линии. Поэтому должны быть приняты все необходимые дополнительные меры, повышающие вероятность успешного отключения цепи короткого замыкания во всех случаях и при любых значениях токов короткого замыкания.

При разработке защит, кроме КС, необходимо иметь ввиду ТП и трансформаторные подстанции системы внешнего электроснабжения. Следует учитывать также тот размах (диапазон) напряжения у токоприемников ЭПС, который должен соответствовать международным стандартам [3, 4]. Он определяется падением напряжения не только в КС, но и в энергетических звеньях ТП и системы внешнего электроснабжения.

Повышение напряжения в КС переменного тока до 25 кВ позволяет снизить по сравнению с системой постоянного тока 3 кВ сечение медного контактного провода от 200 до 100 мм^2, применив бронзовый несущий трос сечением 65 мм^2, и обеспечить при этом увеличение расстояния между ТП до 50–60 км вместо 20–25 км при равной требуемой мощности передачи электроэнергии на тягу поездов [1].

В системе переменного тока для поддержания уровня напряжения у токоприемников проводится регулирование выходного напряжения ТП, которое может осуществляться с помощью переключения числа витков первичной обмотки силового трансформатора. Это электромеханическое устройство переключения витков с автоматическим размыканием цепей под нагрузкой сопряжено со значительными затратами на обслуживание. Потому ведутся разработки статических устройств регулирования, в том числе с электронными системами. При двустороннем питании КС на МПЗ применение устройств регулирования должно обеспечивать равный уровень напряжения на шинах смежных ТП для устранения дисбаланса и уравнительных токов.

Система регулирования числа витков обмоток трансформатора возможна и на ТП постоянного тока. Вместе с тем на ТП с выпрямительными установками могут использоваться бесконтактные системы регулирования. В анодных цепях выпрямителей устанавливаются подмагничиваемые дроссели и специальные вольтодобавочные управляемые выпрямители, включаемые последовательно с основным выпрямителем по цепи постоянного тока [5].

Разработанные в России подобные системы питания постоянного тока с регулируемым напряжением на шинах ТП для обеспечения требуемого напряжения у токоприемников служат некоторым прототипом для перспективной системы питания постоянным током при напряжении в КС выше 3000 В. Этот важный технологический факт подтверждает возможность промышленного освоения источников постоянного тока для электрической тяги с уровнем напряжения, который уже достигнут на переменном токе. На основе такого решения ожидаются реализация технологического прорыва в электрической тяге на железнодорожном транспорте с помощью эффектов оптимизации системы тягового электроснабжения и достижение конкурентоспособности железнодорожного транспорта в перевозках грузов и пассажиров.

Диаграмма *L*–*S* по выбору варианта системы тягового электроснабжения

Известно, что любая система электроснабжения переменного тока обеспечивает требуемый уровень напряжения в КС с учетом падения напряжения, зависящего от полного сопротивления (импеданс) электрической линии, в то время как в системе постоянного тока потеря напряжения зависит лишь от активного (омического) сопротивления (рис. 2). Соотношение полного и активного сопротивлений составляет примерно 4:1. Также известно, что

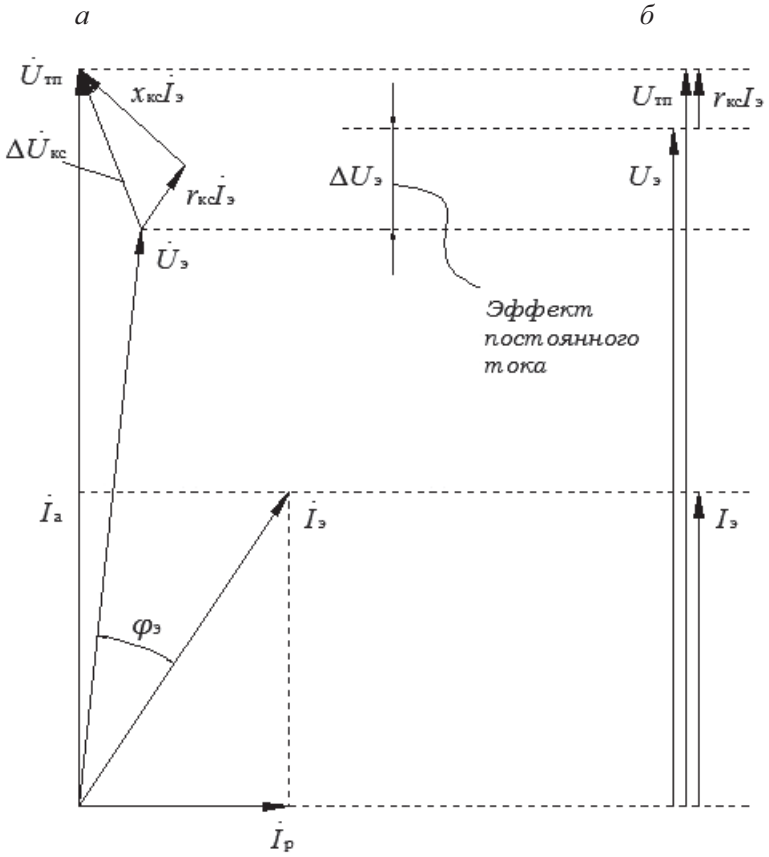


Рис. 2. Падение и потеря напряжения в системах переменного тока (*а*) и постоянного тока (*б*) при равной плотности тока в проводах и равном уровне напряжения на шинах ТП

система переменного тока с напряжением 25 кВ по своим стационарным устройствам более экономична, чем система постоянного тока напряжением 3 кВ, вследствие восьмикратного увеличения уровня напряжения и соответственно почти на порядок меньших значений токов в устройствах тягового электроснабжения.

Естественно, что с ростом расстояния между ТП сечение проводов контактной подвески увеличивается (рис. 3), с одной стороны, пропорционально расстоянию, если обеспечивается постоянство плотности тока по мере изменения нагрузки, с другой – в степенной (близкой к квадратичной) зависимости, если обеспечивается условие постоянства допустимой потери напряжения.

Точки $P_{=}$ и $P_{\sim}$ пересечения линий двух зависимостей (δ = const и k = const) для систем постоянного и переменного тока не являются точками, которые соответствуют оптимальной паре значений – сечения проводов КС и расстояния между ТП. Эти значения L и S указывают параметры, при которых достигается максимальное использование меди в конкретном варианте системы тягового электроснабжения, одновременно достигаются максимальная плотность тока и максимально допустимая потеря напряжения.

Две линии на диаграмме L–S для каждой системы тягового электроснабжения делят плоскость L–S на четыре зоны (см. рис. 1). Эти линии должны быть нанесены на диаграмму для заданного количества поездов, их мощности, интервала попутного следования, допустимой плотности тока и допустимой потери напряжения. Очевидно, что выбрать пару значений целесообразно в секторе *1* диаграммы L–S, обеспечивающей энергетическую и экономическую эффективность системы по

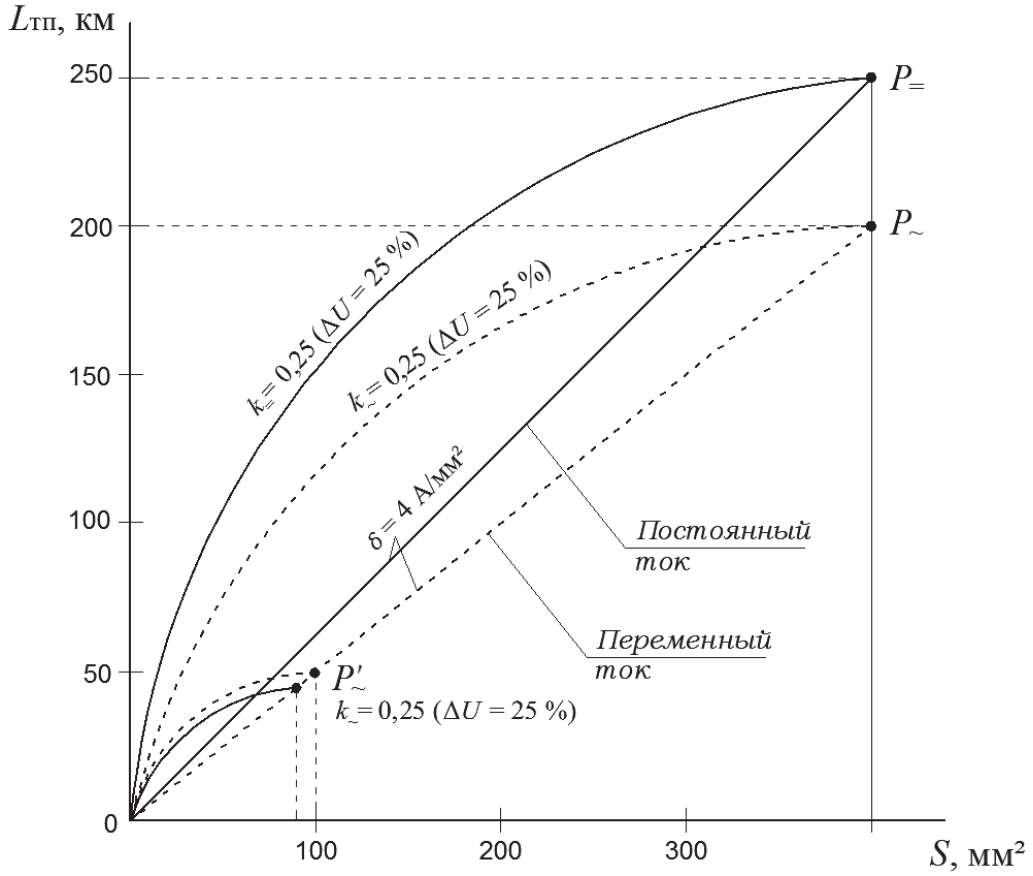


Рис. 3. Диаграмма *L*–*S*-взаимозависимости между длиной МПЗ и сечением проводов контактной подвески при условиях постоянства плотности тока (δ = 4 А/мм²) и потери напряжения (*k* = 0,25; 25 %) для одностороннего питания систем постоянного и переменного тока при одинаковой мощности тяговой нагрузки и равных уровнях напряжения

параметрам плотности тока в проводах контактной подвески и максимально допустимой потери напряжения.

Таким образом, выбор оптимального решения зависит от соотношения между единичными издержками на сооружение ТП и удельными затратами на устройства КС.

Следует отметить, что увеличение расстояния между ТП существенно влияет на показатели эффективности в условиях равномерной загрузки МПЗ в течение 24 ч суточного графика. В реальной практике при скоростном и высокоскоростном движении важно, чтобы интервал попутного следования тактового графика был меньше времени нахождения поездов большой мощности на линии между соседними ТП. В противном случае установленная мощность электрооборудования не будет использована в энергоэкономичном режиме из-за повторно кратковременного графика нагрузки.

Выбор варианта работы с предельным значением допустимой потери напряжения ΔU_{max} обусловливает уменьшение количества ТП на линии интенсивного движения и сокращение затрат на технологическое присоединение к системе внешнего электроснабжения, снижение общей мощности установленного электрооборудования. Это положение при сравнительной оценке вариантов размещения ТП на линии интенсивного движения поездов особенно чувствительно для системы электрической тяги на однофазном или постоянном токе при равных уровнях напряжения в КС.

Диаграмма *L*–*S*, приведенная на рис. 3, иллюстрирует возможность увеличения в срав-

нении с однофазным током расстояния между ТП на постоянном токе ориентировочно на 20% при равных условиях сечения проводов и уровнях напряжения в КС.

Сравнительная эффективность повышения уровня напряжения в системах тягового электроснабжения однофазного и постоянного тока

Для обобщения и формулирования выводов, касающихся особенностей оптимизации подсистемы электрической тяги по критериям экономической и энергетической эффективности, рассмотрим пример для условного участка электрифицированной линии длиной L = 160 км с равномерно распределенной нагрузкой от движущихся поездов одинаковой мощности.

На рис. 4 в соответствии с вышерассмотренными условиями и диаграммой *L–S*, для равных уровней напряжения в КС для постоянного и однофазного тока, одинаковом числе и равной мощности поездов, представлены сравнительные данные для различных длин

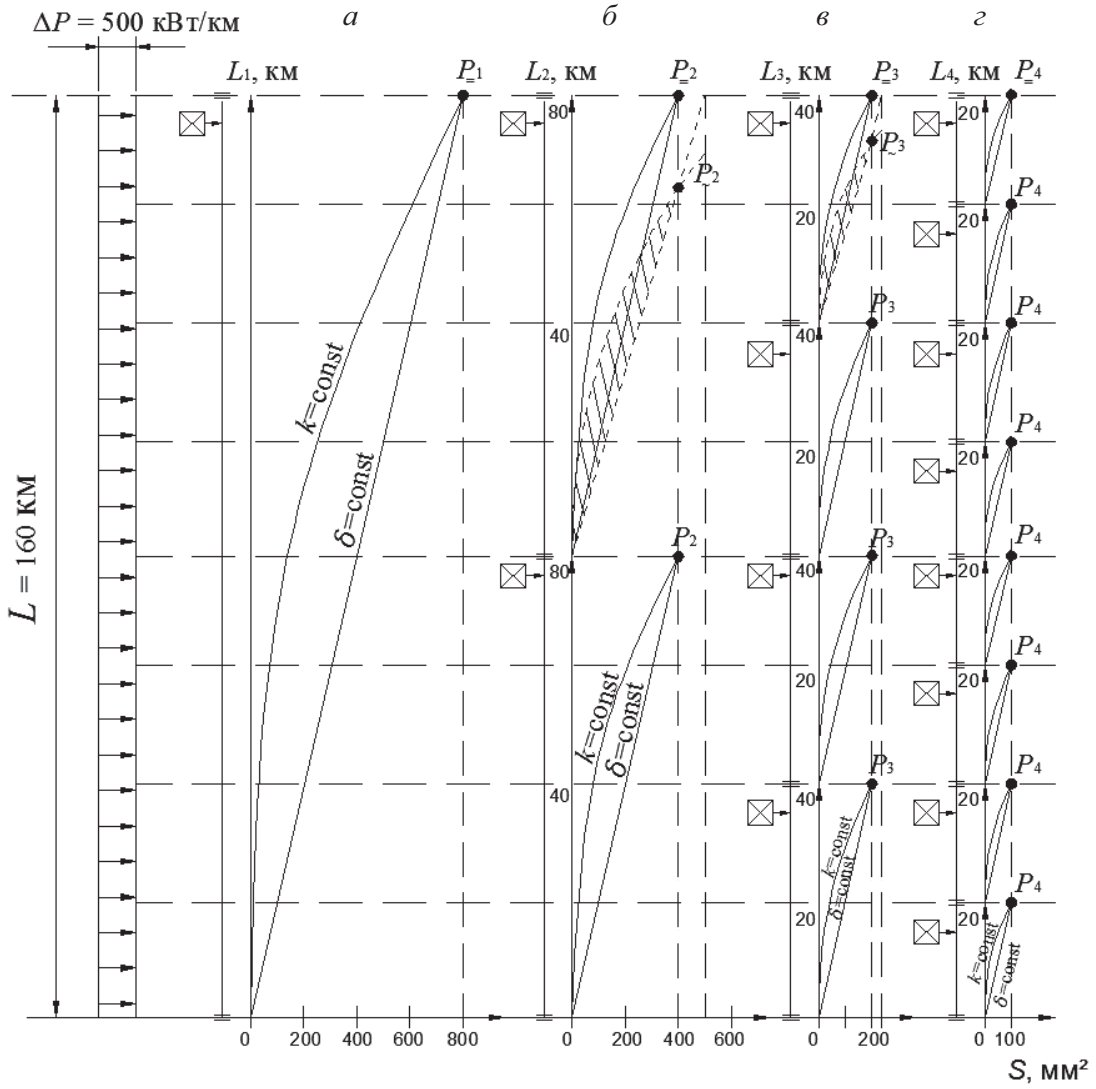


Рис. 4. Интерпретация вариантов размещения ТП на однопутном участке L = 160 км с нагрузкой от восьми скоростных поездов, мощность каждого 10 МВт со скоростью 160 км/ч при одностороннем питании КС:
а – $L_{тп1}$ = 160 км; *б* – $L_{тп2}$ = 80 км; *в* – $L_{тп3}$ = 40 км; *г* – $L_{тп4}$ = 20 км

МПЗ при одностороннем питании секций контактной сети от одной ТП.

При постоянном токе для варианта $L_{тп}$ = = 80 км (рис. 4, *б*) выполняются условия плотности тока 4 А/мм^2 и потери напряжения $\Delta U_{max} = 0{,}25U_{тп}$ при контактной подвеске сечением 400 мм^2. Для однофазного переменного тока при $L_{тп}$ = 80 км при одинаковых условиях необходима контактная подвеска сечением 500 мм^2 либо при тех же условиях расстояние между ТП должно быть уменьшено до $L_{тп}$ = = 65 км. Если $L_{тп}$ = 40 км (рис. 4, *в*), то соответственно $S_{=}$ = 200 мм^2 и $S_{\sim}$ = 235 мм^2. При $S_{\sim}$ = 200 мм^2 расстояние $L_{тп}$ уменьшается до 32 км, вместо четырех ТП необходимо построить пять.

Из сравнительных данных следует вывод о целесообразности применения системы тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 24 кВ, равным напряжению в системе переменного тока. Может быть использован гибкий подход в зависимости от требования по затратам на изоляцию. При этом в диапазоне от 18 до 35 кВ в КС постоянного тока система тягового электроснабжения по экономическим и энергетическим критериям не только эквивалентна системе однофазного переменного тока, но и превосходит ее ориентировочно на 25–30 % по всем показателям.

Система постоянного тока повышенного напряжения 6 кВ испытана на железных дорогах СССР и России [6–9]. Реализованное двукратное увеличение напряжения не позволяет получить решающего эффекта роста пропускной и провозной способностей, улучшения энергетических и экономических показателей электрической тяги. Напряжение в системе постоянного тока следует повышать до шести-, восьмикратного значения напряжения, используемого в современной системе 3 кВ.

Применение системы постоянного тока высокого напряжения (18–35 кВ) с помощью современных преобразовательных комплексов на запираемых (GTO) тиристорах и биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT) может быть реализовано по двум вариантам:

– *вариант 1*: на основе распределенной системы с напряжением в КС 3 кВ и пунктами понижения напряжения (ППН) 24/3 кВ с продольной питающей линией напряжением 24 кВ (или 2×24 кВ) (рис. 5);

– *вариант 2*: на основе централизованной системы с питанием КС от ТП с напряжением 24 кВ и ЭПС постоянного тока высокого напряжения с бортовым электроэнергетическим комплексом нового поколения (=24/~3 кВ/ ~1,5 кВ, 1–150 Гц) на базе автономных инверторов напряжения (АИН), четырехквадрантных реверсивных преобразователей (4 *q*–*S*) и асинхронных тяговых двигателей (АД) (рис. 6). Структура бортового комплекса позволяет реализовать ЭПС универсального (многосистемного) исполнения для работы от системы тягового электроснабжения 3 и 24 кВ постоянного тока и от системы 25 кВ, 50 Гц переменного тока.

В результате проведенного исследования можно прийти к следующим выводам. Проблема перспективного развития электрифицированного железнодорожного транспорта, продиктованная требованиями интенсификации экономики, решается в мире на различном уровне в зависимости от научных и технических достижений развивающихся и промышленно развитых стран. На линиях с интенсивным скоростным и высокоскоростным, а также тяжеловесным движением поездов основным направлением совершенствования тягового электроснабжения является повышение уровня напряжения в электротяговой сети как на однофазном переменном, так и на постоянном токе.

При проектировании новых электрифицированных линий с оптимизацией по критериям минимума капитальных вложений и минимума энергетической составляющей себестоимости перевозок на тягу поездов для обоснования основных параметров системы электрической тяги целесообразно использовать метод диаграммы *L*–*S*, построенной по заданным специальным техническим условиям с учетом обоснованной плотности тока проводов контактной подвески и допустимой потери напряжения в электротяговой сети.

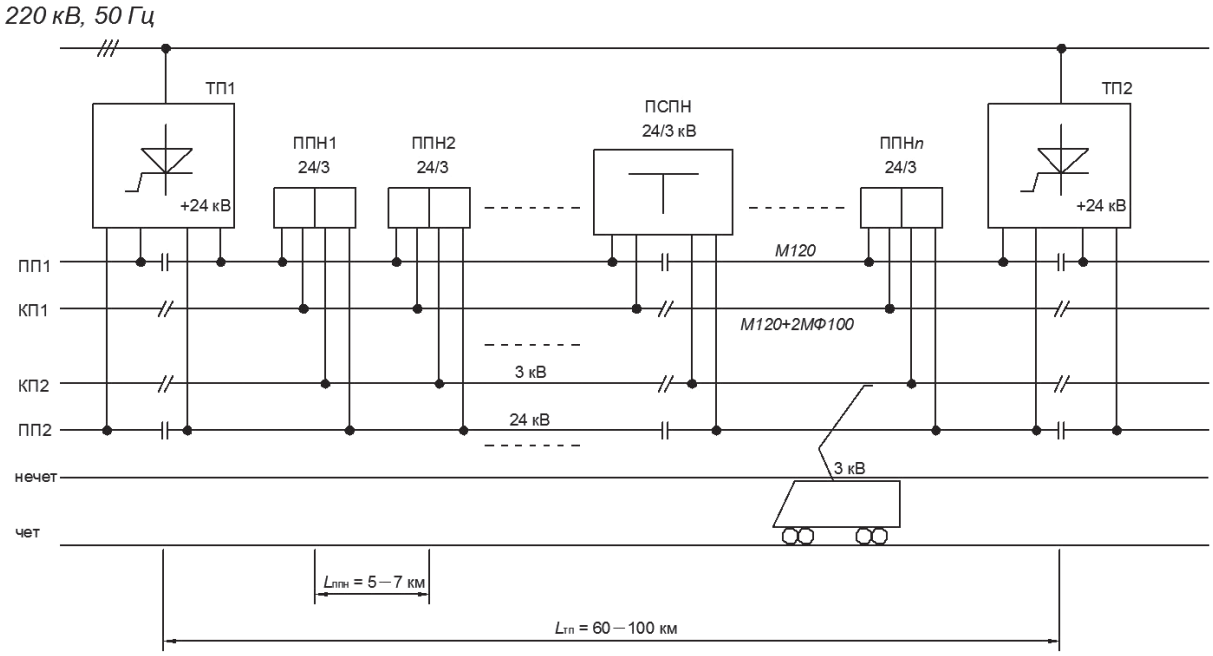


Рис. 5. Система электрической тяги постоянного тока высокого напряжения распределенного питания с ППН

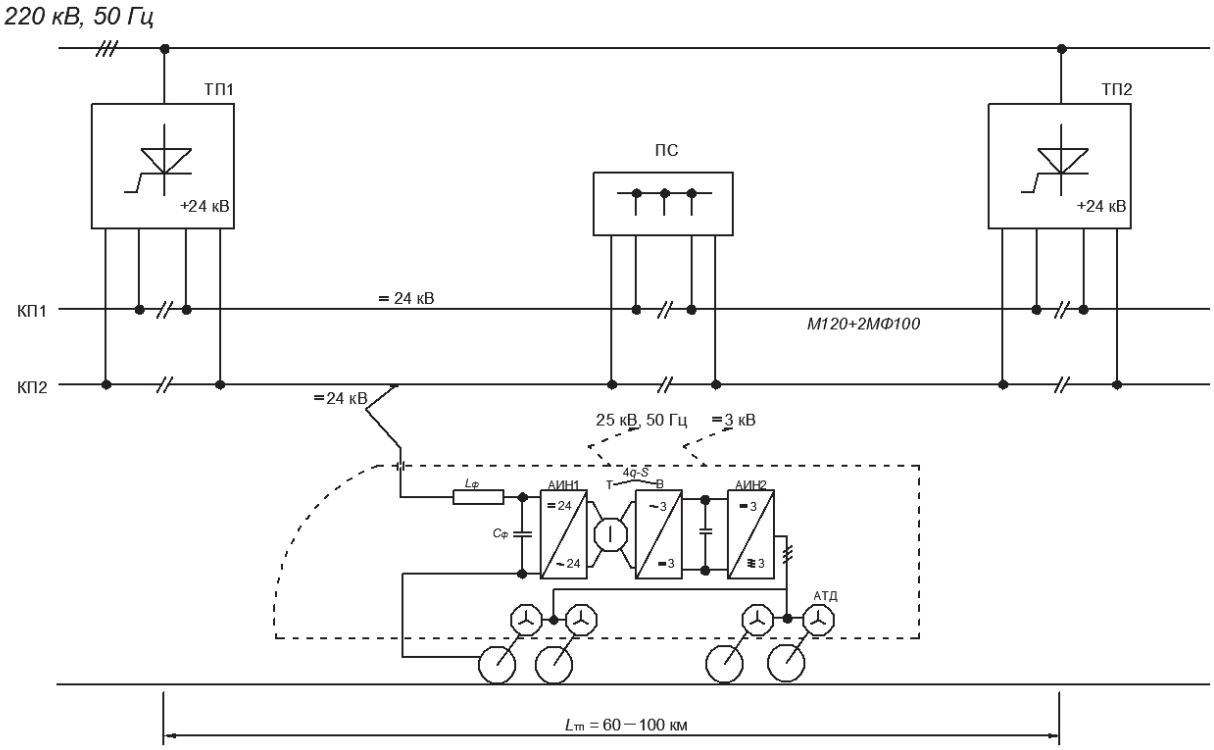


Рис. 6. Система электрической тяги постоянного тока высокого напряжения централизованного питания с многосистемным электроподвижным составом

Применение диаграммы позволяет корректировать соотношение расстояния между ТП и сечения проводов в КС по фактическому сочетанию параметров системы внешнего электроснабжения и характеристик электрифицируемой линии.

Достижение лучших энергетических и экономических показателей при равных условиях по уровню напряжения в электротяговой сети, мощности, скорости движения и интервалам попутного следования поездов осуществляется при системе тягового электроснабжения постоянного тока высокого напряжения. В диапазоне от 18 до 35 кВ система постоянного тока не только эквивалентна системе однофазного переменного тока, но и превосходит ее не менее чем на 20% по главным показателям.

В современных условиях возможна реализация системы электрической тяги постоянного тока высокого напряжения на основе универсальной преобразовательной техники и цифровых технологий [10–17], успешно осваиваемых отечественной промышленностью. Практическое применение новой системы в конкретных условиях может успешно осуществляться по варианту распределенного питания с пунктами понижения напряжения на МПЗ 24/3 кВ и по варианту централизованного питания КС с электроподвижным составом постоянного тока напряжением 24 кВ, преобразовательный энергетический комплекс которого может обеспечить многосистемный режим питания от сети, например 24 и 3 кВ постоянного тока и 25 кВ однофазного переменного тока.

Библиографический список

1. Mayer L. Ottimizzione del sottosistema alimentazione di un impianto di trazione elettrica ferroviaria / L. Mayer // Inge ferroviaria. – 1985. – Vol. 40, N 9. – P. 583–591.

2. Специальные технические условия «Железнодорожное электроснабжение участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству». – СПб. : ПГУПС, 2014. – 135 с.

3. Международный стандарт UIC 796 Voltage at the Pantograph (Напряжение на токоприемнике). – Union Internationale des Chemins de Fer, 2000. – 16 с.

4. Директива 96/48/ЕС по эксплуатационной совместимости Трансевропейской высокоскоростной железнодорожной системы (Council Directive 96/48/EC of 23 July 1996 on the interoperability of the trans-European high-speed rail system) // Офиц. журн. Европейского Союза от 17.09.1996. – Раздел L235. – С. 6–24.

5. Марикин А. Н. Новые технологии в сооружении и реконструкции тяговых подстанций : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / А. Н. Марикин, А. В. Мизинцев. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2008. – 220 с.

6. Розенфельд В. Е. Применение постоянного тока высокого напряжения для электрической тяги / В. Е. Розенфельд, В. В. Шевченко, В. А. Майбога // Железнодорожный транспорт. – 1962. – № 7. – С. 35–39.

7. Третьяк Т. П. Совершенствование электрической тяги на постоянном токе / Т. П. Третьяк // Железнодорожный транспорт. – 1963. – № 1. – С. 34–37.

8. Третьяк Т. П. Система электроснабжения постоянным током повышенного напряжения / Т. П. Третьяк, Л. Г. Кощеев, В. П. Довгань // Электрическая и тепловозная тяга. – 1968. – № 10. – С. 36–38.

9. Бурков А. Т. Новое направление электрификации железных дорог / А. Т. Бурков // Труды науч. конференции ELEKTRO-95. Zilina. – Slovenska rep. – 7–8 February 1995. – С. 66–68.

10. Аржанников Б. А. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока / Б. А. Аржанников, М. П. Бадер, А. Т. Бурков // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 51–57.

11. Бурков А. Т. Электроника и преобразовательная техника : учебник : в 2 т. / А. Т. Бурков. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2015. – 307 с. (Т. 2 : Электронная преобразовательная техника.)

12. Бурков А. Т. Индустриальные технологии, мобильность и энергоэффективность электрической тяги рельсового транспорта / А. Т. Бурков, Л. С. Блажко, И. А. Иванов // Электротехника. – 2016. – № 5. – С. 7–13.

13. Бурков А. Т. Концептуальная модель системы энергообеспечения интегрированной сети скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта России / А. Т. Бурков, В. В. Сероносов,

А. В. Мизинцев // Электротехника. – 2017. – № 10. – С. 8–13.

14. Корякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока / Р. Н. Корякин. – М. : Транспорт, 1964. – 186 с.

15. Котельников А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы / А. В. Котельников. – М. : Интекст, 2002. – 104 с.

16. Курбасов А. С. Физические основы электрической тяги поездов: посвящается А. Е. Алексееву, В. Б. Меделю, К. Г. Марквардту / А. С. Курбасов. – М. : [б. и.], 2015. – 203 с.

17. Garpita M. Preliminary design of a 18 kV locomotive / M. Garpita, P. Cesarie, P. Farina, O. Ventura // EPE'95. – Sevilla, Spain. – 1–11 September 1995. – P. 1–11.

References

1. Mayer L. Ottimizzione del sottosistema alimentazione di un impianto di trazione elettrica ferroviaria [Optimization the sybsystem power of an electric railway traction system]. *Inge ferroviaria* [*Railway Engineering*], 1985, vol. 40, no. 9, pp. 583–591. (In Russian)

2. Spetsialniye tekhnicheskiye usloviya "Zheleznodorozhnoye elektrosnabzheniye uchastka Moskva–Kazan vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistraly Moskva–Kazan–Yekaterinburg". Tekhnicheskiye normy i trebovaniya k proektirovaniyu i stroitelstvu [*Special regulations "Railway electric power supply of Moscow–Kazan section of the high-speed railway line Moscow–Kazan–Yekaterinburg". Technical norms and regulations to engineering and construction*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, 135 p. (In Russian)

3. *Mezhdunarodniy standart UIC 796 Voltage at the Pantograph (Napryazheniye na tokopriyemnike)* [*International standard UIC 796 Voltage at the Pantograph*]. Union Internationale des Chemins de Fer, 2000, 16 p.

4. Direktiva 96/48/YS po ekspluatatsionnoy sovmestimosty Transyevropeiskoy vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy systemy [Council Directive 96/48/EC of 23 July 1996 on the interoperability of the trans-European high-speed rail system]. *Ofitsialniy zhurnal Yevropeiskogo Soyuza* [*Official Journal of the European Union*], 1996, section L235, pp. 6–24. (In Russian)

5. Marikin A. N. & Mizintsev A. V. *Noviye tekhnologii v sooruzhenii i rekonstruktsii tyagovykh podstantsiy* [*New technologies in construction and reconstruction of railway substations*]. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2008, 220 p. (In Russian)

6. Rozenfeld V. Y., Shevchenko V. V. & Maiboga V. A. Primeneniye postoyannogo toka vysokogo napryazheniya dlya elektricheskoy tyagy [The use of high-voltage direct current for electric propulsion]. *Zheleznodorozhniy transport* [*Railway transport*], 1962, no. 7, pp. 35–39. (In Russian)

7. Tretyak T. P. Sovershenstvovaniye elektricheskoy tyagy na postoyannom toke [The improvement of direct current electric propulsion]. *Zheleznodorozhniy transport* [*Railway transport*], 1963, no. 1, pp. 34–37. (In Russian)

8. Tretyak T. P., Koshcheyev L. G. & Dovgan V. P. Sistema elektrosnabzheniya postoyannym tokom povyshennogo napryazheniya [The system of electric power supply with high voltage direct current]. *Elektricheskaya teplovoznaya tyaga* [*Electric propulsion and diesel operation*], 1968, no.10, pp. 36–38. (In Russian)

9. Burkov A. T. Novoye napravleniye elektrifikatsii zheleznykh dorog [A new direction in electrification of railways]. *Trudy nauchnoy konferentsii ELEKTRO-95* [*Proceedings of ELEKTRO-95 research conference*]. Zilina, Slovenska rep., 7–8 February 1995, pp. 66–68. (In Russian)

10. Arzhannikov B. A., Bader M. P. & Burkov A. T. Sovershenstvovaniye osnovnykh trebovaniy k sisteme i ustroistvam tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka [The improvement of basic requirements to the system and facilities of direct current traction power supply]. *Elektrotekhnika* [*Electrical engineering*], 2016, no. 9, pp. 51–57. (In Russian)

11. Burkov A. T. *Elektronika i preobrazovatelnaya tekhnika.* V 2 t. [*Electronics engineering and converter equipment*. In 2 vol.]. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational center of railway transport] Publ., 2015, 307 p. (In Russian)

12. Burkov A. T., Blazhko L. S. & Ivanov I. A. Industrialniye tekhnologii, mobilnost i energoeffektivnost elektricheskoy tyagy relsovogo transporta [Industrial technologies, mobility and energy efficiency of electric propulsion of the rail transport]. *Elektrotekhnika* [*Electrical engineering*], 2016, no. 5, pp. 7–13. (In Russian)

13. Burkov A. T., Seronosov V. V. & Mizintsev A. V. Kontseptualnaya model sistemy energoobespecheniya integrirovannoy sety skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta Rossii [The supply system conceptual model for the integrated network of the Russian high-speed rail transport]. *Elektrotekhnika* [*Electrical engineering*], 2017, no. 10, pp. 8–13. (In Russian)

14. Koryakin R. N. *Tyagoviye sety peremennogo toka* [*Alternating current electric traction networks*]. Moscow, Transport Publ., 1964, 186 p. (In Russian)

15. Kotelnikov A. V. *Elektrifikatsiya zheleznykh dorog. Miroviye tendentsii i perspektyvy* [*Electrification of railways. Global trends and prospects*]. Moscow, Intext Publ., 2002, 104 p. (In Russian)

16. Kurbasov A. S. *Fizicheskiye osnovy elektricheskoy tyagy poyezdov* [*Physical basics of electric propulsion*]*: dedicated to A. E. Alekseyev*, *V. B. Medel*, *K. G. Markvardt*. Moscow, [b. i.], 2015, 203 p. (In Russian)

17. Garpita M., Cesarie P., Farina P. & Ventura O. Preliminary design of a 18 kV locomotive. *EPE'95.* Sevilla, Spain, 1–11 September 1995, pp. 1–11.

МАРИКИН Александр Николаевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, marikin_s@mail.ru; *СТЕПАНОВА Ксения Константиновна – аспирант, kjsenia@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.02

Е. С. Матюшенко, Ю. В. Кулакова, А. С. Шепель

ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМЫ ДОСТАВКИ БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОГО СЕКТОРА ИЗ КИТАЯ В РОССИЮ

Дата поступления: 10.05.2018
Решение о публикации: 08.06.2018

Аннотация

Цель: Изучение практических аспектов формирования схемы доставки бурового оборудования для нефтегазового сектора из Китая в Россию для определения возможности оптимизации маршрутов и снижения стоимости транспортировки, учитывая конструктивные особенности перевозимых грузов. **Методы:** Используются методы систематизации и обобщения теоретических концепций и статистических данных. **Результаты:** Проведен анализ возможных маршрутов международного сообщения в рамках перевозки бурового оборудования. Определены особенности основных наземных маршрутов перевозки грузов из Китая. Для сравнения различных маршрутов и сроков доставки предложена формула расчета необходимого времени для перевозки и обработки грузов. Представлен расчет времени нахождения в пути в процессе перевозки бурового оборудования по маршруту Пекин–Забайкальск–Сибирский и Уральский Федеральные округа. Обоснована необходимость формирования эффективной схемы доставки негабаритных грузов для нефтегазового сектора на основе предложенного алгоритма. **Практическая значимость:** Разработанный подход дает возможность проводить расчеты времени нахождения в пути различных грузов и применить полученные результаты при формировании эффективной схемы доставки грузов. Приведенные в статье рекомендации будут способствовать улучшению качества предоставляемых логистических услуг, повышению эффективности перевозочного процесса.

Ключевые слова: Схема транспортировки, маршруты, транспортные расходы, издержки, тарифы, скорость, международное сообщение.

***Elena S. Matyushenko,** postgraduate student, lena.matyushenko11@mail.ru; **Yulia V. Kulakova,** postgraduate student, Julia-juska@mail.ru; **Alexander S. Shepel,** postgraduate student, Alexadr.WM@yandex.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) THE FORMATION OF DRILLING EQUIPMENT DELIVERY SCHEME FOR OIL AND GAS SECTOR FROM CHINA TO RUSSIA

Summary

Objective: To study the practical aspects of the formation of the drilling equipment delivery scheme for the oil and gas sector from China to Russia. This is done in order to determine the possibility of optimizing routes and reducing the cost of transportation, taking into account the design features of the transported goods. **Methods:** The methods of systematization and generalization of theoretical concepts and statistical data were used. **Results:** The analysis of possible routes of international communication in the context of transportation of drilling equipment was carried out. The specifics of the main land routes of cargo transportation from China were determined. A formula for calculating the time required for transportation and handling of goods was introduced in order to compare the different routes and the delivery time. The calculation of time spent on the road during the transportation of drilling equipment along the route Beijing–Zabaikalsk–the Siberian and Ural Federal Districts was presented. The necessity to form an effective scheme for the delivery of oversized cargo for oil and gas sector based on the

proposed algorithm was substantiated. **Practical importance:** The developed approach makes it possible to calculate the time spent on the way of various cargoes and apply the obtained results in the formation of an effective cargo delivery scheme. The recommendations presented in the article will help improve the quality of the logistics services provided, and increase the efficiency of the transportation process.

Keywords: Transportation scheme, routes, transportation costs, expenditures, tariffs, speed, international traffic.

В настоящее время нефтегазовая отрасль России практически на 80 % зависит от импорта специального оборудования. Ранее, до 2014 г., оно поставлялось из стран Европейского союза; после введения санкций в отношении нашей страны, связанных с присоединением Крыма, такое оборудование все чаще стали поставлять из Китая. Все вышеизложенное демонстрирует актуальность решения задачи формирования рациональных схем доставки бурового оборудования для нефтегазового сектора из Китая в Россию.

Схема доставки грузовых единиц представляет собой комплекс мероприятий по организации доставки грузов, при этом алгоритм выбора эффективной схемы доставки состоит из нескольких этапов:

• определение оптимального маршрута перемещения грузопотока;

• определение пунктов перевалки (смены транспортных средств);

• выбор транспортных средств с учетом характеристики перевозимых грузов и поддержанием уровня качества процесса доставки;

• документооборот;

• наличие транспортно-логистических центров;

• наличие погрузо-разгрузочных механизмов.

Помимо вышеуказанного для составления вариантов доставки грузов используют различные параметры, которые включают скорость, надежность, время транзита, безопасность, обслуживание клиентов, обработку заявок, стоимость доставки, возможные потери и ущерб. Порядок важности этих критериев отличается от конкретных ситуаций, но при транспортировке грузов для нефтегазового сектора одним из наиболее значимых является выбор маршрута следования, который позволяет минимизировать стоимость и сократить сроки.

В настоящее время существуют три основных наземных маршрута для перевозки грузов из Китая [1–3].

Первым вариантом маршрута транспортировки бурового оборудования из Китая в Россию является железнодорожный путь через пропускной пункт Маньчжурия/Забайкальск. Это можно объяснить техническим оснащением пограничного перехода, возможностью организовать перевалку любого груза с путей, ширина колеи которых составляет 1435 мм (в Китае), на железнодорожные пути в России с шириной колеи 1520 мм. Таможенный пропускной пост Забайкальск служит крупнейшим транзитным железнодорожным пунктом пропуска на российско-китайской границе. Забайкальской железной дорогой через пропускной пункт Маньчжурия/Забайкальск в 2017 г. было перевезено 1,4 млн т импортных грузов [4].

Вторым маршрутом служит транзит через Казахстан через пограничный переход Алашанькоу/Достык. Железнодорожный маршрут из Китая в Россию через Казахстан обладает рядом преимуществ:

• бóльшая часть пути проходит по Китаю, что влияет на скорость доставки, поскольку в Китае железнодорожный транспорт развит лучше, его плотность выше, чем в России, это связано в основном со значительной модернизацией в последнее десятилетие железных дорог в Китае [5];

• существуют преимущества при таможенном оформлении, связанные с тем, что Казахстан входит в состав Таможенного союза.

Третий вариант маршрута – транзит через Монголию. Данное направление использует-

ся не часто, поскольку для этого существует множество ограничений. Однопутная железная дорога, построенная Советским Союзом в Монголии, влияет на ее пропускную способность, а неразвитая инфраструктура не позволяет назвать этот маршрут коммерчески значимым. Железнодорожным пунктом пропуска на границе Китая и Монголии является Дзамын-Ууд/Эрлянь, на российско-монгольской границе – Кяхта (Наушки)/Сухэ-Батор и Соловьевск/Эрэнцав. Данные участки железной дороги нуждаются в электрификации, которая могла бы обеспечить полное задействование этого наиболее короткого пути через Дзамын-Ууд/Эрлянь к центру промышленного производства Китая. Помимо электрификации следует провести модернизацию железнодорожных пунктов пропуска через российскую государственную границу, что позволит увеличить их пропускную способность [6].

Существуют и иные маршруты, например, по железной дороге через Суйфэньхэ/Гродеково, комбинированный автомобильный и железнодорожный переход через Владивосток, Уссурийск, Благовещенск и другие приграничные районы, но они незначительны в общем объеме перевозок и редко используются для транспортировки бурового оборудования.

В процессе сравнения различных маршрутов срок доставки находится по формуле

$$T_0 = \sum_{i=1}^{m} t_{i,i+1} + \sum_{j=1}^{n} \tau_j + \sum_{k=1}^{l} S_k ,$$

где $t_{i,i+1}$ – время движения между i-м и (i+1)-м пунктами, $i = \overline{1, m}$; τ_j – время оформления проверки таможенных документов на j-м пункте, $j = \overline{1, n}$; S_k – время погрузки, разгрузки и складирования на k-м пункте, $k = \overline{1, \ell}$; m – количество участков движения транспорта; n – количество пунктов таможенного оформления; l – количество пунктов погрузки-разгрузки (см. [1, 4, 7]).

Подробный анализ маршрутов в Россию показал, что их можно разделить на группы, которые представлены в таблице.

Используя приведенные выше данные, рассчитаем время нахождения в пути в процессе перевозки бурового оборудования по маршруту Пекин–Забайкальск–Сибирский и Уральский Федеральные округа:

$$T_{\text{о min}} = 5 + 2 + 8 = 15 \text{ дней},$$

Характеристика маршрутов доставки грузов из Китая в Россию
(составлено по материалам [1, 4, 7])

Маршрут	Сроки	Время обработки грузов на пограничном переходе, дни	Время транспортировки по РЖД, дни
Гуанчжоу–Достык–Приволжский и Уральский Федеральные округа	Из Гуанчжоу в Достык доставка занимает 7 дней, по железной дороге Казахстана – 4–5 дней	3–5	6–7
Пекин–Забайкальск–Сибирский и Уральский Федеральные округа	Из Пекина в Забайкальск доставка занимает 5–6 дней	2–3	8–10
Шанхай–Эрлянь–Наушки–Центральный и Северо-Западный Федеральные округа	Из Шанхая в Эрлянь доставка занимает 5 дней, по Монголии – 5–7 дней	3–5	12–14
Шанхай–Приволжский и Южный Федеральные округа	Из Шанхая в порт Восточный, Находка и/или Владивосток доставка занимает 7–8 дней	3–4	11–13

$$T_{\text{о max}} = 6 + 3 + 10 = 19 \text{ дней.}$$

Исходя из этих данных, видно, что доставка груза по маршруту Пекин–Забайкальск–Сибирский и Уральский Федеральные округа может быть осуществлена в интервале от 15 до 19 дней.

Несмотря на такое разнообразие маршрутов, объем товаров, перемещающихся между Европой и Азией, растет быстрее, чем инфраструктура. Россия предложила Северный морской путь в качестве альтернативы существующим маршрутам, а Китай инициировал проект «Шелковый путь». При растущей торговле между азиатскими и европейскими странами большое внимание уделяется сокращению расходов на фрахт. Россия и Китай рассматривают новые пути для продвижения по всем континентам [8].

Объем грузовых перевозок по суше не может быть увеличен до полной пропускной способности Транссибирской железной дороги. Еще в 2010 г. министр транспорта Игорь Левитин отметил, что Транссибирская компания уже работает на полную мощность. В настоящее время Россия планирует модернизировать линии, но пока не приступила к их реализации. Перспективы модернизации очень трудно оценить, так как Транссибирская магистраль является самой длинной в мире железной дорогой (9300 км) с огромным количеством связанной инфраструктуры, но планируется, что в случае модернизации железной дороги можно к 2020 г. увеличить поток грузов на 26 % – до 210 млн т. Прогнозируемая стоимость составляет 562 млрд руб., которые окупятся через 10–15 лет [9–14]. Одной из альтернатив в будущем было бы более эффективное использование Северного морского пути. Этот маршрут почти в два раза короче, чем другие морские маршруты от Европы до Дальнего Востока.

Таким образом, развитие эффективной схемы доставки грузов является актуальной задачей, решение которой будет способствовать улучшению качества предоставляемых логистических услуг, повышению эффективности перевозочного процесса. Выбор рациональной схемы доставки грузов заключается в формировании такого варианта доставки грузовых единиц, в котором учитываются особенности маршрутов, виды транспорта, организация взаимодействия между всеми участниками процесса перевозки, логистических затрат в целом. При этом данная схема транспортировки должна быть не только универсальной, но и основываться на подробном анализе таких важных экономических аспектов доставки грузов как штрафы за несоблюдение договоров (опоздание, простой), длительность выполнения различных дополнительных операций и др., а также на оценке влияния этих факторов на эффективность всего процесса перевозки.

Выбор наиболее рационального способа транспортировки груза из нескольких альтернативных вариантов – очень важный и трудоемкий процесс. Важно выделить наиболее приоритетный показатель из всех возможных критериев оценки эффективности и оптимальности варианта перевозки, что позволит на начальном этапе исследования отвергнуть заведомо нецелесообразные варианты транспортировки, за счет чего в конечном итоге процесс выбора рациональной схемы транспортировки грузов существенно сократится.

Библиографический список

1. Пономарева Н. Н. Транссиб как ведущий евроазиатский Международный транспортный коридор на территории России / Н. Н. Пономарева // Вестн. НГПУ. – 2014. – № 4 (20). – С. 57–65.

2. Степанов Е. А. Таможенно-логистический фактор развития внешней торговли региона / Е. А. Степанов, А. Е. Смекалин // Вестн. ЧелГУ. – 2016. – № 14 (396). – С. 68–78.

3. Швецов А. В. Влияние таможенных режимов на процесс формирования транспортных логистических цепей в международных сообщениях / А. В. Швецов // Таможенная политика России на Дальнем Востоке. – 2014. – № 4 (69). – С. 61–64.

4. Погрузка на Забайкальской железной дороге в 2017 году. – URL : http://www.gudok.ru/news/?ID=1398656 (дата обращения : 03.05.2018).

5. Персианов В. А. Железнодорожный транспорт как коммуникационная основа системы «Россия – Китайская Народная Республика» / В. А. Персианов, Э. Б. Мухаметдинов, С. В. Бжуско // Восточная аналитика. – 2010. – № 1. – С. 77–85.

6. Перечень многосторонних автомобильных и железнодорожных пунктов пропуска через государственную границу Российской Федерации. – URL : https://zakonbase.ru/content/part/349871?print=1 (дата обращения : 03.05.2018).

7. Залетов Ю. С. Вопросы таможенного оформления грузов при организации работы логистических провайдеров в сфере железнодорожного транспорта / Ю. С. Залетов, В. Н. Остапчук // Вестн. ГУУ. – 2016. – № 11. – С. 61–64.

8. Юкина Т. И. Значение территорий опережающего развития и свободного порта Владивосток для выхода России на рынки Азиатско-Тихоокеанского региона / Т. И. Юкина // Изв. СПбГЭУ. – 2017. – № 4 (106). – С. 175–179.

9. Вперед по восточному пути. – URL : https://lenta.ru/articles/2015/02/02/bam1 (дата обращения : 03.05.2018).

10. Транссибирская магистраль: перспективы развития, значение. Пути повышения эффективности. – URL : http://fb.ru/article/235562/transsibirskaya-magistral-perspektivyi-razvitiya-znachenie-puti-povyisheniya-effektivnosti-rabotyi (дата обращения : 03.05.2018).

11. Суходолов А. П. Китайская восточная железная дорога : опыт России и Китая по совместной реализации крупномасштабных проектов / А. П. Суходолов // Изв. БГУ. – 2014. – № 3. – С. 72–77.

12. Самойлов Н. А. Китайско-Восточная железная дорога – историческое наследие двух народов: перспективы изучения / Н. А. Самойлов, Е. О. Старовойтова, М. В. Ходяков, Д. Г. Янченко // НИР. – 2016. – № 3 (17). – С. 205–210.

13. «ТрансКонтейнер» стал новым логистическим оператором железнодорожных перевозок Коувола–Китай. – URL : http://www.svkk.ru/novosti/трансконтейнер-стал-новым-логисти (дата обращения: 03.05.2018).

14. Коровяковский Е. К. Взаимодействие транспортных систем и применение комплексного подхода к решению основных проблем смешанных перевозок / Е. К. Коровяковский, А. М. Симушков // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2012. – № 4 (34). – С. 5–10.

References

1. Ponomareva N. N. Transsib kak vedushchiy evroaziatskiy Mezhdunarodniy transportniy koridor na territorii Rossii [Transsib as the leading Euro-Asian International Transport Corridor in Russia]. *Vestnik NGPU* [*Bulletin of the National Pedagogical University*], 2014, no. 4 (20), pp. 57–65. (In Russian)

2. Stepanov E. A. & Smekalin A. E. Tamozhenno-logisticheskiy factor razvitiya vneshney torgovly regiona [Customs and logistics factor of development of foreign trade in the region]. *Vestnik ChelGU* [*Bulletin of Chelyabinsk State Universit*], 2016, no. 14 (396), pp. 68–78. (In Russian)

3. Shvetsov A. V. Vliyaniye tamozhennykh rezhymov na protsess formirovaniya transportnykh logisticheskykh tseley v mezhdunarodnykh soobshcheniyakh [The influence of customs regimes on the process of forming transport logistics chains in international communications]. *Tamozhennaya politika Rossii na Dalnem Vostoke* [*Russia's customs policy in the Far East*], 2014, no. 4 (69), pp. 61–64. (In Russian)

4. *Pogruzka na Zabaikalskoy zheleznoy doroge v 2017 godu* [*Loading on the Trans-Baikal railway in 2017*]. URL: http://www.gudok.ru/news/?ID=1398656 (accessed: 03.05.2018). (In Russian)

5. Persianov V. A., Mukhametdinov E. B., Bzhusko S. V. Zheleznodorozhniy transport kak kommunikatsionnaya osnova sistemy "Rossiya – Kitaiskaya Narodnaya Respublika" [Railway transport as communication basis of the system "Russia – the People's Republic of China"]. *Vostochnaya analitika* [*Eastern Analytics*], 2010, no. 1, pp. 77–85. (In Russian)

6. *Perechen mnogostoronnykh avtomobilnykh i zheleznodorozhnykh punktov propuska cherez gosudarstvennuyu granitsu Rossiyskoy Federatsii* [*The list of multilateral road and railway checkpoints across the state border of the Russian Federation*]. URL:

https://zakonbase.ru/content/part/349871?print=1 (accessed: 03.05.2018). (In Russian)

7. Zaletov Yu. S. & Ostapchuk V. N. Voprosy tamozhennogo oformleniya gruzov pry organizatsii raboty logisticheskykh provaiderov v sfere zheleznodorozhnogo transporta [The issues of customs clearance of goods in the process of project management of logistics providers in the sphere of rail transport]. *Vestnik GUU* [*Bulletin of the State University of Management*], 2016, no. 11, pp. 61–64. (In Russian)

8. Yuyukina T. I. Znacheniye territoriy operezhayushchego razvitiya i svobodnogo porta Vladivostok dlya vykhoda Rossii na rynky Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona [The significance of territories of social and economic advancement and the Free Port of Vladivostok for Russia's entry into the markets of the Asian-Pacific region]. *Izvestiya SPbGEU* [*Proceedings of SPbGEU*], 2017, no. 4 (106), pp. 175–179. (In Russian)

9. *Vpered po vostochnomu puty* [*Onwards along the eastern path*]. URL: https://lenta.ru/articles/2015/02/02/bam1/(accessed: 03.05.2018) (In Russian)

10. *Transsibirskaya magistral: perspektyvy razvitiya*, *znacheniye. Puty povysheniya effektivnosty* [*Trans-Siberian Railway: development prospects*, *significance. Ways to improve efficiency*]. URL: http://fb.ru/article/235562/transsibirskaya-magistral-perspektivyi-razvitiya-znachenie-puti-povyisheniya-effektivnosti-rabotyi (accessed: 03.05.2018). (In Russian)

11. Sukhodolov A. P. Kitaiskaya vostochnaya zheleznaya doroga: opyt Rossii i Kitaya po sovmestnoy realizatsii krupnomasshtabnykh proektov [Chinese Eastern Railway: the experience of Russia and China in the joint implementation of large-scale projects]. *Izvestiya BGU* [*Proceedings of the BSU*, 2014, no. 3, pp. 72– 77. (In Russian)

12. Samoylov N. A., Starovoitova E. O., Khodyakov M. V. & Yanchenko D. G. Kitaisko-Vostochnaya zheleznaya doroga – istoricheskoye naslediye dvukh narodov: perspektivy izucheniya [Chinese-Eastern Railway – the historical heritage of two peoples: prospects of studying. *NIR* [*Academic Research Work*], 2016, no. 3 (17), pp. 205–210. (In Russian)

13. *"TransKonteiner" stal novym logisticheskym operatorom zheleznodorozhnykh perevozok* [*TransContainer to become the new logistic operator of the Kouvola–China railway transportation*]. URL: http://www.svkk.ru/novosti/transcontainer-staff-logistics (accessed: 03.05.2018). (In Russian)

14. Korovyakovsky E. K. & Simushkov A. M. Vzaimodeistviye transportnykh system i prymeneniye kompleksnogo podkhoda k resheniyu osnovnykh problem smeshannykh perevozok [Interaction of the transport systems and application of an integrated approach to the solution of the main problems of the mixed transportations]. *Izvestiya Peterburgskogo Universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012, no. 4 (34), pp. 5–10. (In Russian)

*МАТЮШЕНКО Елена Сергеевна – аспирант, lena.matyushenko11@mail.ru; КУЛАКОВА Юлия Вадимовна – аспирант, Julia-juska@mail.ru; ШЕПЕЛЬ Александр Сергеевич – аспирант, Alexadr.WM@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004.052.32+681.518.5

Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, Р. Б. Абдуллаев

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КОМБИНАЦИОННЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ КОДОВ

Дата поступления: 28.12.2017
Решение о публикации: 29.12.2017

Аннотация

Цель: Исследование особенностей применения полиномиальных кодов при организации систем функционального контроля комбинационных логических схем автоматики и вычислительной техники. **Методы:** Применяются методы теории информации и кодирования, теории дискретных устройств и технической диагностики дискретных систем. **Результаты:** Проанализированы возможности использования при организации контроля комбинационных логических схем полиномиальных кодов. Отмечаются некоторые необходимые свойства, присущие образующим полиномам, которые позволяют синтезировать самопроверяемые структурные схемы систем функционального контроля. В частности, таким необходимым условием является наличие в образующем полиноме свободного члена (в противном случае не генерируются все необходимые для полной проверки кодера тестовые комбинации). Приведен пример реализации системы функционального контроля комбинационной схемы, а также описаны некоторые результаты экспериментов по обнаружению ошибок в контрольных комбинационных схемах LGSynth'89. **Практическая значимость:** Применение для контроля комбинационных схем полиномиальных кодов дает возможность синтезировать самопроверяемые дискретные устройства автоматики и вычислительной техники.

Ключевые слова: Комбинационная схема, система функционального контроля, полиномиальный код, информационный вектор, обнаружение ошибок, необнаруживаемая ошибка.

Valeriy V. Sapozhnikov, D. Eng. Sci., professor, port.at.pgups1@gmail.com; **Vladimir V. Sapozhnikov,** D. Eng. Sci., professor, at.pgups@gmail.com (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University); ***Dmitriy V. Efanov,** D. Eng. Sci., associate professor, TrES-4b@yandex.ru (Russian University of Transport (MIIT)); **Ruslan B. Abdullaev,** postgraduate student, ruslan_0507@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University). THE SPECIFICITIES OF ORGANIZATION OF CONCURRENT ERROR DETECTION SYSTEMS FOR COMBINATIONAL CIRCUITS BASED ON POLYNOMIAL CODES

Summary

Objective: To study the specificities of polynomial codes application during the organization of concurrent error detection systems for combinational logic circuits of automation and computer engineering. **Methods:** The methods of information theory and coding, the theory of discrete devices and diagnostic engineering of discrete systems were applied. **Results:** The possibilities of using polynomial codes in the process of combinational logic circuits control organization were analyzed. Some essential properties, inherent in generator polynomials, which make it possible to synthesize self-checking circuits of concurrent error detection systems, were pointed out. Particularly, one of such essential properties is the presence of a constant term in a generator polynomial (otherwise, all the required test patterns are

not generated for a complete check of a coding device). An example of concurrent error detection system implementation for a combinational circuit was given. Some experimental data on error detection in LGSynth'89 combinational benchmarks were described. **Practical importance:** The use of polynomial codes for combinational circuit control makes it possible to synthesize self-checking discrete devices of automation and computer engineering.

Keywords: Combinational circuit, concurrent error detection system, polynomial code, data vector, error detection, undetected error.

Взамен морально устаревшей релейно-контактной элементной базы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики идет поэтапное внедрение устройств на современных элементных базах [1]. Большое внимание в современной области автоматики уделено схемным решениям на основе дискретных устройств, использующих программируемую логику, таких как программируемые логические схемы и микроконтроллеры [2]. Эти устройства обладают эффективным быстродействием, простотой реализации, низкой себестоимостью и т. д., ввиду чего получили значительное распространение в сфере автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта.

Внедрение того или иного устройства в область автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта всегда затрагивает вопрос надежности в аспекте безопасного и бесперебойного функционирования системы [3]. Формирование неверной или некорректной информации в каком-либо из компонентов системы управления должно обнаруживаться и блокироваться. Для этих целей используются методы технической диагностики, а именно тестовое и функциональное диагностирование блоков и компонентов [4]. Тестовое диагностирование подразумевает кратковременное отключение объекта от реализации своих функций с целью подачи на его входы специальных проверяющих воздействий (оно может проводиться в моменты времени, когда устройство не применяется по назначению) [5]. Для оценки технического состояния устройства в реальном масштабе времени используют системы функционального контроля [6], в которых рабочие воздействия одновременно являются и проверяющими.

Системы функционального контроля могут быть реализованы по разным методам и в соответствии с различными структурными схемами [6–9]. Как отмечается в классической работе Е. С. Согомоняна и Е. В. Слабакова [10], эффективные решения на практике может давать использование равномерных избыточных кодов с небольшим количеством контрольных разрядов. Системы функционального контроля, построенные на основе таких кодов, в большинстве реализаций получаются более простыми, чем согласно структуре дублирования, что проявляется в конечном итоге в более низкой стоимости их разработки, конструирования и эксплуатации.

Имеется большое количество равномерных разделимых кодов, применяющихся на различных уровнях систем управления, в разных технических решениях для контроля передаваемой информации [11, 12]. Широко распространены циклические избыточные коды (Cyclic Redundancy Codes – CRC), или так называемые *полиномиальные коды*. Они участвуют в таких протоколах передачи информации как ModBus, Ethernet, FlexRay, HDLC (авиация), в устройствах обработки и хранения информации с форматами MPEG-2, OpenPGP, PNG, SCSI, в форматах карт памяти типа MMC, SD, в интерфейсах USB, Bluetooth и т. д. [13, 14]. В области железнодорожной автоматики и телемеханики полиномиальные коды применяют, например, при передаче данных от измерительных контроллеров к концентраторам диагностической информации в системах непрерывного мониторинга технического состояния [15].

Рассмотрим еще одно приложение полиномиальных кодов – при организации систем

функционального контроля комбинационных составляющих в логических устройствах автоматики и вычислительной техники.

Принципы построения полиномиальных кодов

Как отмечалось выше, полиномиальные коды являются разделимыми равномерными кодами, или (*m*,*k*)-кодами, где *m* – длина информационного вектора, а *k* – контрольного вектора (*m* + *k* = *n* – длина информационного вектора). В таких кодах получаем контрольные разряды по значениям информационных разрядов. При построении полиномиальных кодов используется алгебраическая форма записи каждого информационного или контрольного вектора в виде полинома. Каждому разряду кодового вектора присваивается переменная *x* со степенью *j*, которая соответствует расположению разряда: младшему разряду присваивается значение *j* = 0, следующему – *j* = 1 и т. д. Алгебраическая запись кодового вектора получается путем умножения величины x^j на значение соответствующего разряда. Например, кодовое слово 1011 можно представить в виде полинома следующим образом:

$$1\cdot x^3 + 0\cdot x^2 + 1\cdot x^1 + 1\cdot x^0.$$

Удалив нулевые слагаемые, получаем полином вида

$$x^3 + x + 1.$$

Над полиномами можно выполнять различные алгебраические действия в кольце вычетов по модулю 2 [16].

Для образования кодового слова *V*(*x*) полиномиального кода определяют остаточный полином *R*(*x*), получаемый при делении полинома *M*(*x*), умноженного на величину x^{n-m}, на образующий полином [17]:

$$x^{n-m}M(x) = G(x)Q(x) + R(x),$$

где *Q* (*x*) – частное, а *R* (*x*) – остаток от деления $x^{n-m}M(x)$ на *G* (*x*).

В этом случае найденный при делении остаток *R*(*x*) будет представлять контрольный вектор, занимающий *k* младших разрядов кодового слова длиной *n*. Старшие же *m* разрядов будут соответствовать информационному вектору.

Закодируем информационный вектор 1011 полиномиальным кодом с образующим полиномом $x^2 + 1$. Степень образующего полинома равна двум (как уже отмечалось, она всегда должна быть меньше или равной степени информационного полинома). При выполнении операции умножения полином $x^{n-m}M(x)$ будет иметь следующий вид:

$$x^2(x^3 + x + 1) = x^5 + x^3 + x^2.$$

Разделим его на образующий полином $x^2 + 1$ (рис. 1).

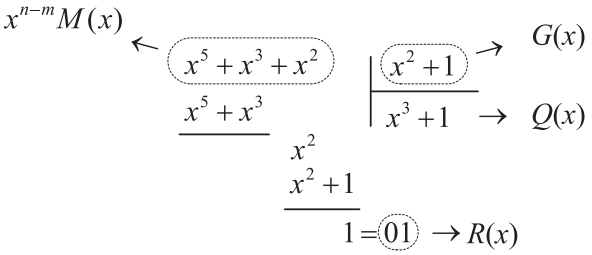


Рис. 1. Пример получения остатка от деления полиномов

Полином, соответствующий кодовому слову, получается как сумма полиномов $x^{n-k}M(x)$ и *R*(*x*): $x^5 + x^3 + x^2 + 1$. Таким образом, зашифрованное сообщение примет такой вид: 101101 (вместо исходной комбинации 1011).

Определение ошибок в кодовом слове достигается путем деления кодового вектора *V*(*x*) на образующий полином *G*(*x*). Если при делении остаток равен нулю, то считают, что информация не искажена.

Следует отметить, что образующий полином *G*(*x*) выбирается исходя из условия обнаружения максимального количества ошибок. Например, нет смысла в качестве образующего полинома выбирать полином x^1, так как

при делении любого полинома с произвольной степенью остаток всегда будет равным нулю (имеется еще ряд полиномов даже с высшей степенью, при делении на которые формируется нулевой остаток, например x^2 или x^3). Такой полином не позволяет обнаруживать ошибки в кодовом векторе.

Для построения схемы, осуществляющей кодирование перемножением или делением с остатком, используют сдвиговые регистры [17]. В случае с делением применяют сдвиговые регистры с последовательным или параллельным делением.

Сдвиговые регистры включают в себя элементы памяти (*D*-триггеры), которые не могут быть использованы при организации систем функционального контроля комбинационных схем. Однако для решения задач синтеза систем функционального контроля можно построить кодирующие схемы также в виде комбинационных схем. Для этого нужно получить для всех информационных векторов заданной длины m все контрольные векторы длиной k, а затем минимизировать их функции. Например, в табл. 1 приведены контрольные векторы для всех информационных векторов длиной $m = 2$ для образующего полинома $x^2 + 1$.

Выписывая минимизированные выражения, находим функции контрольных разрядов полиномиального кода

ТАБЛИЦА 1. Разряды контрольных векторов

Информационный вектор $M(x)$	$x^2 \cdot M(x)$	Контрольные разряды остатка $R(x)$ при делении на полином $x^2 + 1$ и кодовый полином $V(x)$	
x_3, x_2, x_1, x_0		$R(x), y_1, y_0$	$V(x)$
0000	0	00	000000
0001	x^2	01	000101
0010	x^3	10	001010
0011	$x^3 + x^2$	11	001111
0100	x^4	01	010001
0101	$x^4 + x^2$	00	010100
0110	$x^4 + x^3$	11	011011
0111	$x^4 + x^3 + x^2$	10	011110
1000	x^5	10	100010
1001	$x^5 + x^2$	11	100111
1010	$x^5 + x^3$	00	101000
1011	$x^5 + x^3 + x^2$	01	101101
1100	$x^5 + x^4$	11	110011
1101	$x^5 + x^4 + x^2$	10	110110
1110	$x^5 + x^4 + x^3$	01	111001
1111	$x^5 + x^4 + x^3 + x^2$	00	111100

$$y_0 = x_0\overline{x_2} \vee \overline{x_0}x_2 = x_0 \oplus x_2,$$
$$y_0 = x_1\overline{x_3} \vee \overline{x_1}x_3 = x_1 \oplus x_3.$$

Данные функции являются, как и следовало ожидать, линейными и представляют собой совокупности проверок четности ряда информационных разрядов. Таким образом, поскольку кодер полиномиального кода может быть реализован в виде комбинационной схемы, их можно использовать при синтезе систем функционального контроля комбинационных логических схем.

Пример построения системы функционального контроля на основе полиномиального кода

Пусть дана комбинационная схема, изображенная на рис. 2. Построим для нее систему функционального контроля на основе полиномиального кода с образующим полиномом $x^2 + 1$. Для этого вычислим значения функций, реализуемых заданной комбинационной схемой, и занесем их в табл. 2. Далее, используя приведенную ранее методику, по значениям информационного вектора $f_1 f_2 f_3 f_4$ определим контрольные функции g_1 и g_0.

На основании табл. 2 логика работы контрольной схемы описывается следующими функциями:

$$g_1 = \overline{x_1}x_2\overline{x_3} \vee x_1x_2x_3 =$$
$$= x_2\left(\overline{x_1x_3} \vee x_1x_3\right) = x_2\overline{x_1 \oplus x_3},$$
$$g_0 = \overline{x_1x_2x_3} \vee \overline{x_1x_2}x_3 \vee x_1\overline{x_2x_3} \vee$$
$$\vee x_1\overline{x_2}x_3 \vee x_1x_2\overline{x_3} = \overline{x_2} \vee x_1\overline{x_3}.$$

Блок контрольной логики, реализующий приведенные выражения для контрольных функций, представлен на рис. 3. Как следует из сравнения схем на рис. 2 и 3, блок контрольной логики оказывается значительно проще исходной комбинационной схемы.

Структурная схема системы функционального контроля для заданной комбинационной

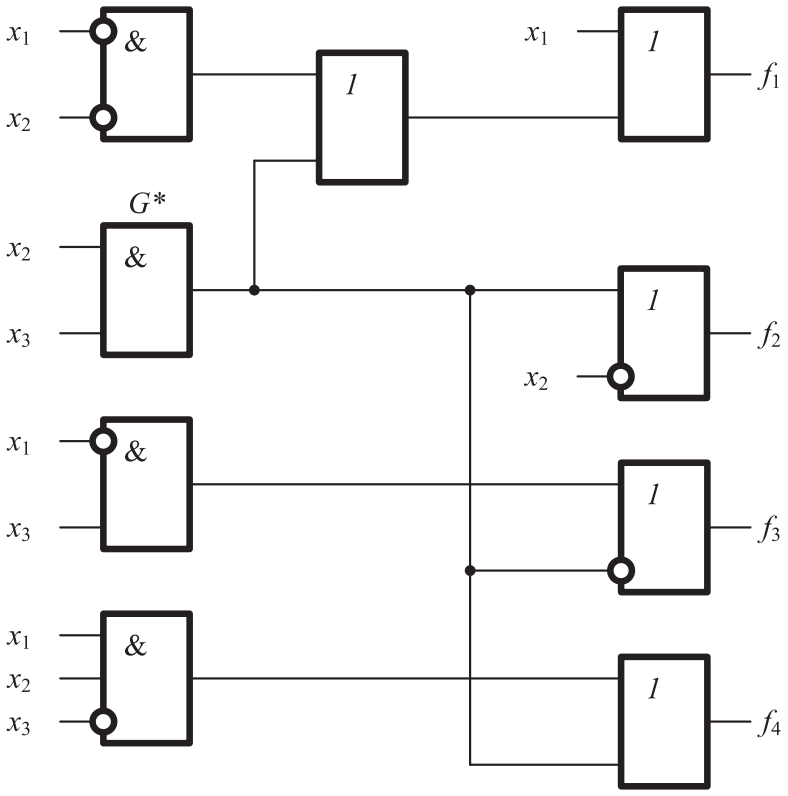


Рис. 2. Заданная комбинационная схема

ТАБЛИЦА 2. Разряды контрольных векторов

Входные комбинации			Значения выходов схемы				Значения контрольных разрядов	
x_1	x_2	x_3	f_1	f_2	f_3	f_4	g_1	g_0
0	0	0	1	1	1	0	0	1
0	0	1	1	1	1	0	0	1
0	1	0	0	0	1	0	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0	0
1	0	0	1	1	1	0	0	1
1	0	1	1	1	1	0	0	1
1	1	0	1	0	1	1	0	1
1	1	1	1	1	0	1	1	0

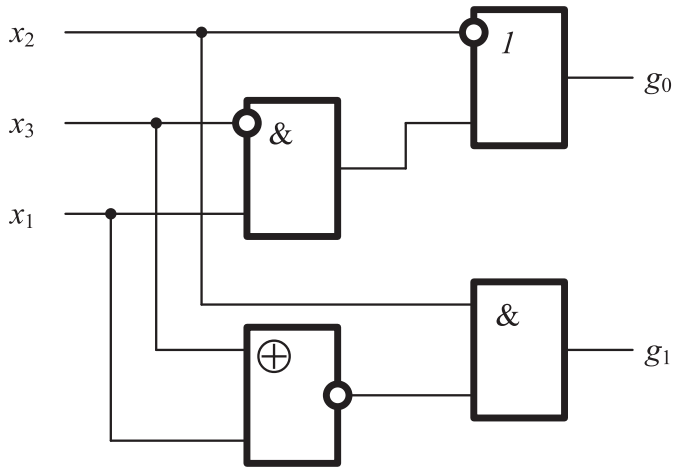


Рис. 3. Структурная схема блока контрольной логики

схемы приведена на рис. 4. В ней блок $F(x)$ представляет собой заданное устройство; блок $G(x)$ – блок контрольной логики, вырабатывающий контрольные разряды g_0', g_1' в зависимости от значений входных переменных; блок $G(f)$ – генератор контрольных разрядов g_0, g_1 по величинам рабочих функций блока $F(x)$; блок *TRC* – компаратор, осуществляющий сравнение одноименных контрольных разрядов. Блок *TRC* представляет собой модуль сжатия парафазных сигналов, на входы которого подаются парафазные сигналы вида $g_i\overline{g_i'}$. При наличии на входах парафазных сигналов на выходах формируется также парафазный сигнал z^0z^1. Нарушение же парафазности сигнала на выходе свидетельствует о присутствии ошибки в вычислениях, а значит, косвенно о неисправности в одном из компонентов системы функционального контроля [18].

Отметим, что полученная структурная схема системы функционального контроля оказывается значительно проще структуры дублирования, для реализации которой потребовалось бы две схемы $F(x)$, четыре инвертора и три блока *TRC* [19]. При этом, однако, на выходах объекта диагностирования не будет обнаружена одна из ошибок, вызванных неисправностями внутренних логических элементов. Это можно проследить по структуре исходной комбина-

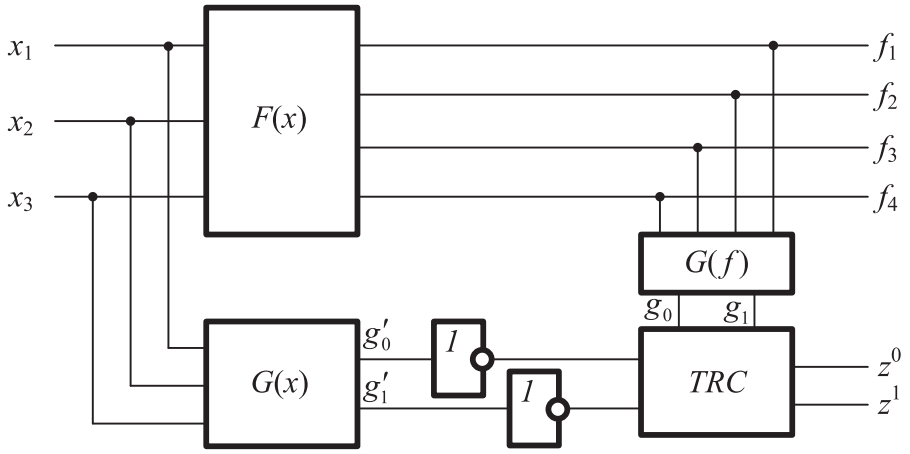


Рис. 4. Система функционального контроля по полиномиальному коду

ционной схемы (см. рис. 2). В ней неисправности только одного элемента *G** могут вызывать ошибки с кратностями $d \geq 2$. Идентифицируются любые ошибки в информационном векторе, за исключением ошибки, вызываемой неисправностью вида «константа 1» на выходе элемента *G** на входном наборе 010. В данном случае информационный вектор 0010 в результате четырехкратной асимметричной ошибки переходит в информационный вектор 1101. Оба информационных вектора имеют одинаковые контрольные векторы, что не позволяет обнаружить ошибку. Тем не менее обозначенная неисправность обнаруживается на других входных наборах. Следует отметить, что при контроле схемы на основе классического кода Бергера [20] или кода с суммированием по модулю $M = 4$ [21] не обнаруженными окажутся сразу же четыре двукратные симметричные ошибки в информационном векторе, вызванные неисправностью типа «константа 1» на выходе элемента *G** на входных наборах 000, 100, 101, 110.

Выбор образующего полинома

При выборе полиномиального кода для организации контроля комбинационной схемы прежде всего следует учитывать его обнаруживающую способность при конкретном значении k. Потому важным является выбор именно образующего полинома. Рассмотрим эту задачу для образующих полиномов, дающих коды с двумя контрольными разрядами. Имеются четыре таких образующих полинома: $x^2,\ x^2+1,\ x^2+x,\ x^2+x+1$.

Для определения характеристик обнаружения ошибок полиномиальными кодами с указанными полиномами составим таблицу, содержащую все их контрольные векторы. Таблица 3 наглядно демонстрирует, что использование полиномов без свободного члена сказывается на невозможности формирования части контрольных векторов. Это, в свою очередь, говорит о низкой эффективности использования кодом разрядов контрольных векторов, а также о невозможности обеспечения самопроверяемости генераторов кодов (для полного тестирования любого элемента *XOR* требуется подать на его входы все комбинации 00, 01, 10 и 11 [22]). Код с образующим полиномом x^2, вообще, не является помехоустойчивым, а все контрольные векторы имеют одинаковые значения разрядов. Таким образом, для систем функционального контроля актуальным становится применение только полиномиальных кодов, имеющих свободный член в образующем полиноме.

Анализируя распределения информационных векторов между всеми контрольными векторами для кодов с $m = 4$, отмечаем, что для полиномиальных кодов с образующими полиномами x^2+1 и x^2+x+1 характерно

ТАБЛИЦА 3. Разряды контрольных векторов различных полиномиальных кодов с двумя контрольными разрядами

Информационный вектор $M(x)$	$x^2M(x)$	Контрольные разряды остатка $R(x)$ при делении на полиномы			
		x^2	x^2+1	x^2+x	x^2+x+1
x_3, x_2, x_1, x_0		y_1, y_0	y_1, y_0	y_1, y_0	y_1, y_0
0000	0	00	00	00	00
0001	x^2	00	01	10	11
0010	x^3	00	10	10	01
0011	x^3+x^2	00	11	00	10
0100	x^4	00	01	10	10
0101	x^4+x^2	00	00	00	01
0110	x^4+x^3	00	11	00	11
0111	$x^4+x^3+x^2$	00	10	10	00
1000	x^5	00	10	10	11
1001	x^5+x^2	00	11	00	00
1010	x^5+x^3	00	00	00	10
1011	$x^5+x^3+x^2$	00	01	10	01
1100	x^5+x^4	00	11	00	01
1101	$x^5+x^4+x^2$	00	10	10	10
1110	$x^5+x^4+x^3$	00	01	10	00
1111	$x^5+x^4+x^3+x^2$	00	00	00	11

равномерное распределение всех информационных векторов между всеми контрольными векторами. Это признак кода с теоретическим минимумом общего количества необнаруживаемых ошибок при фиксированных длинах информационных и контрольных векторов [23]. Указанная тенденция сохраняется и при бóльших значениях m.

Из табл. 4 следует, что полиномиальный код с образующим полиномом x^2+x+1 содержит меньшее количество двукратных необнаруживаемых ошибок, чем полиномиальный код с образующим полиномом x^2+1. Указанное обстоятельство является важным, так как количество ошибок малых кратностей, в особенности одно- и двукратных ошибок, на выходах комбинационных схем значительно больше, чем ошибок с кратностями $d>2$ [24].

В табл. 4 для сравнения представлены характеристики необнаруживаемых ошибок в информационных векторах полиномиальными кодами с двумя контрольными разрядами.

На рис. 5 демонстрируются графики изменения долей необнаруживаемых двукратных ошибок от общего количества двукратных ошибок для двух семейств полиномиальных кодов – с образующими полиномами x^2+1 и x^2+x+1. Коды с образующим полиномом x^2+x+1 обнаруживают большее количество двукратных ошибок, чем коды с образующим

ТАБЛИЦА 4. Характеристики необнаруживаемых ошибок различными полиномиальными кодами с $m = 4$

Полиномы	Количество необнаруживаемых ошибок кратностью d				Общее количество необнаруживаемых ошибок
	1	2	3	4	
x^2	64	48	16	2	130
x^2+1	0	32	0	16	48
x^2+x	0	96	0	16	112
x^2+x+1	0	16	32	0	48

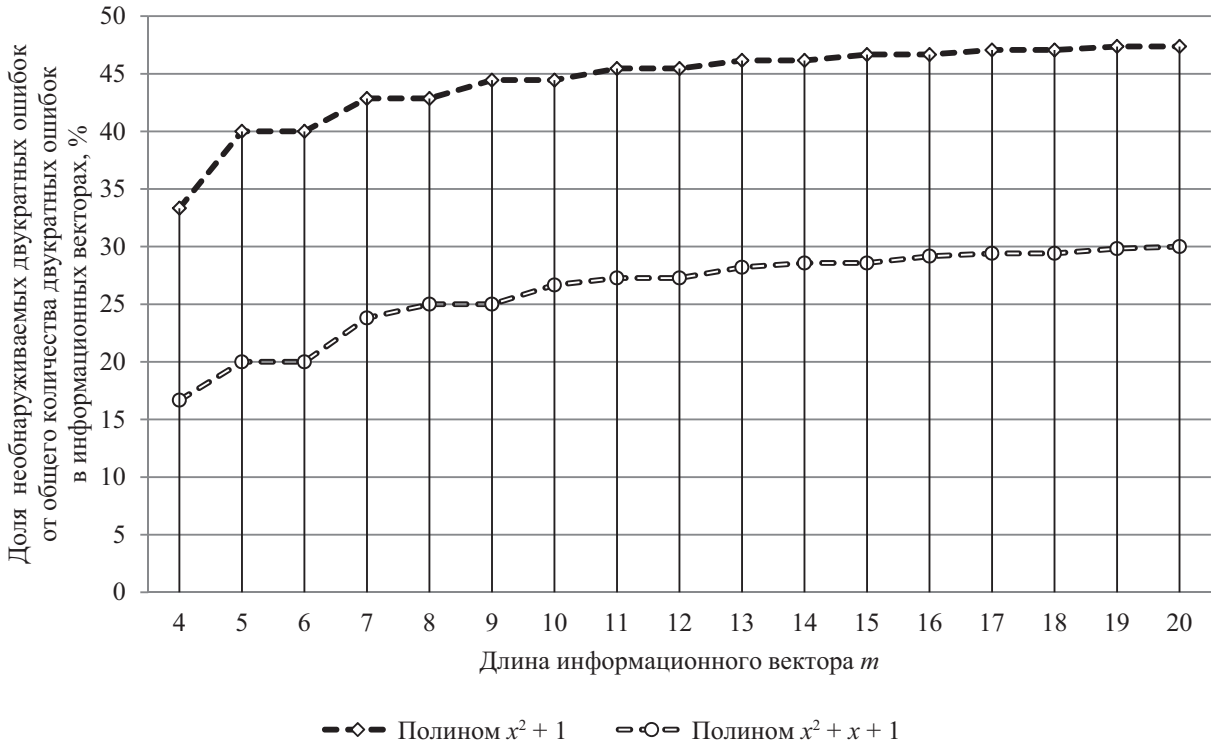


Рис. 5. Доли необнаруживаемых двукратных ошибок полиномиальными кодами с двумя контрольными разрядами и свободными членами в образующих полиномах

полиномом x^2+1, при любой длине информационного вектора. Следует отметить, что для обоих семейств полиномиальных кодов рассматриваемая величина меньше, чем, например, для классических и модульных кодов с суммированием единичных информационных разрядов (для них она составляет 50 % [25, 26]).

Экспериментальные результаты

В ходе исследований особенностей применения полиномиальных кодов при организации систем функционального контроля были проведены эксперименты по обнаружению ошибок на выходах контрольных комбинационных

ТАБЛИЦА 5. Результаты экспериментов с системой контрольных комбинационных схем

Контрольная схема	Количество входов	Количество выходов	Количество ошибок, N	x^2+1		x^2+x		x^2+x+1		N_m/N			$N_{m.2}/N$		
				N_m	$N_{m.2}$	N_m	$N_{m.2}$	N_m	$N_{m.2}$	x^2+1	x^2+x	x^2+x+1	x^2+1	x^2+x	x^2+x+1
b1	3	4	46	0	0	2	2	0	0	0	4,348	0	0	4,348	0
cmb	16	4	288 218	6	6	39 462	39 462	0	0	0,002	13,692	0	0,002	13,692	0
z4ml	7	4	4168	16	16	128	128	32	0	0,384	3,071	0,768	0,384	3,071	0
cm162a	14	5	317 331	18 567	12 138	44 763	37 886	18 643	6053	5,851	14,106	5,875	3,825	11,939	1,907
cm163a	16	5	1 221 312	62 592	40 832	153 920	132 096	63 104	20 288	5,125	12,603	5,167	3,343	10,816	1,661
alu2	10	6	62 838	1569	1401	12 663	12 347	6398	6135	2,497	20,152	10,182	2,23	19,649	9,763
x2	10	7	19 708	760	664	2524	2428	546	450	3,856	12,807	2,77	3,369	12,32	2,283
alu4	14	8	1 980 377	110 989	50 157	372 633	303 511	177 839	79 594	5,604	18,816	8,98	2,533	15,326	4,019
cm138a	6	8	680	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f51m	8	8	13 264	490	474	887	857	258	198	3,694	6,687	1,945	3,574	6,461	1,493
pcle	19	9	17 472 087	425 623	156 556	1 018 580	493 977	461 655	76 391	2,436	5,83	2,642	0,896	2,827	0,437
cm42a	4	10	278	0	0	8	8	0	0	0	2,878	0	0	2,878	0
cu	14	11	137 984	22 976	22 976	61 888	60 800	992	256	16,651	44,852	0,719	16,651	44,063	0,186
pm1	16	13	757 760	15 408	12 048	43 776	37 632	15 680	14 960	2,033	5,777	2,069	1,59	4,966	1,974
ldd	9	19	30 182	2928	1622	4813	2821	2196	620	9,701	15,947	7,276	5,374	9,347	2,054

схем из известного набора LGSynth'89 [27]. Эти схемы описаны, в том числе в формате *.netblif, что дает возможность оценить эффективность обнаружения ошибок на их выходах с помощью полиномиальных кодов. Формат *.netblif описывает структуру комбинационной схемы с использованием двух-, трех- и четырехвходовых логических элементов ИЛИ-НЕ. В эксперименте в схему последовательно вносились все одиночные константные неисправности (stuck-at faults) внутренних логических элементов, а затем на всех входных комбинациях проверялась возможность обнаружения ошибок с помощью полиномиальных кодов с двумя контрольными разрядами с образующими полиномами x^2+1, x^2+x, x^2+x+1.

Результаты экспериментов представлены в табл. 5, в которой приведены рассчитанные данные об общем количестве необнаруживаемых соответствующим полиномиальным кодом ошибок на выходах контрольных комбинационных схем (столбцы N_m) и о количестве необнаруживаемых двукратных ошибок (столбцы $N_{m,2}$). Для удобства анализа этих результатов введены коэффициенты N_m/N и $N_{m,2}/N$. Полученные данные еще раз подчеркивают преимущество применения в системах функционального контроля полиномов x^2+1 и x^2+x+1. Практически для всех комбинационных схем использование указанных кодов позволяет обнаружить свыше 95% ошибок, а для некоторых комбинационных схем – достичь 100%.

Заключение

Полиномиальные коды с рядом образующих полиномов со свободным членом обладают важными свойствами обнаружения ошибок в информационных векторах, поэтому их можно применять в задачах технической диагностики, как тестового, так и функционального диагностирования. В данной статье отмечены некоторые особенности приложения полиномиальных кодов при синтезе систем функционального контроля. Применение полиномиальных кодов может оказаться эффективным по следующим причинам:

– генераторы контрольных разрядов полиномиальных кодов имеют простые структуры, реализуемые за счет использования ряда сверток по модулю два;

– сами коды с образующими полиномами, включающими свободные члены, обладают теоретическим минимумом общего количества необнаруживаемых ошибок для своих значений *m* и *k*, а также позволяют строить самопроверяемые структуры генераторов;

– схемные решения, построенные на основе полиномиальных кодов, могут оказаться гораздо более простыми, чем структуры, реализуемые на основе известных кодов с суммированием, а также дублирования схем.

Учитывая все вышеизложенное, использование класса полиномиальных кодов целесообразно при решении задач построения самопроверяемых дискретных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Библиографический список

1. Казимов Г. А. Микропроцессорная централизация стрелок и сигналов EBILock 950 / Г. А. Казимов, В. Н. Алешин, А. Е. Деревянко, С. В. Золотарева, Г. Ф. Лекута, С. Б. Платунов, А. В. Сураев, С. А. Хохлов, К. Д. Хромушкин ; под ред. Г. Д. Казиева. – М. : ТРАНСИЗДАТ, 2008. – 368 с.

2. Малиновский М. Л. Перспективы использования FPGA-технологий в системах железнодорожной автоматики / М. Л. Малиновский, Д. А. Аленин, В. И. Барсов, Н. В. Коноваленко // Вісник Харків. нац. техніч. ун-та сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Вип. 130. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків : ХНТУСГ, 2012. – С. 79–81.

3. Сапожников В. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.

4. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностиро-

вания, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.

5. Матросова А. Ю. Алгоритмические методы синтеза тестов / А. Ю. Матросова. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та, 1990. – 206 с.

6. Дрозд А. В. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антощук, Ю. В. Дрозд, М. А. Дрозд, Ю. Ю. Сулима ; под ред. А. В. Дрозда, В. С. Харченко. – Харьков : Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н. Е. Жуковского (ХАИ), 2012. – 614 с.

7. Mitra S. Which concurrent error detection scheme to choose? / S. Mitra, E. J. McCluskey // Proceedings of International Test Conference. – Atlantic City ; New York, USA, 03–05 October, 2000. – P. 985–994. DOI : 10.1109/TEST.2000.894311

8. Nicolaidis M. On-line testing for VLSI – a compendium of approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // Journal of Electronic Testing : Theory and Applications. – 1998. – N 12. – P. 7–20. DOI : 10.1023/A:1008244815697

9. Saposhnikov Vl. V. Experimental results for self-dual multi-output combinational circuits / Vl. V. Saposhnikov, V. Moshanin, V. V. Saposhnikov, M. Goessel // Journal of Electronic Testing : Theory and Applications. – 1999. – Vol. 14, issue 3. – P. 295–300.

10. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.

11. Fujiwara E. Code design for dependable systems : theory and practical applications / E. Fujiwara. – New-Jersey : John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.

12. Lala P. K. Principles of modern digital design / P. K. Lala. – New-Jersey : John Wiley & Sons, 2007. – 436 p.

13. Castagnoli G. Optimization of cyclic redundancy-check codes with 24 and 32 parity bits / G. Castagnoli, S. Brauer, M. Herrmann // IEEE Transactions on Communications. – 1993. – Vol. 41, issue 6. – P. 883–892. DOI : 10.1109/26.231911

14. Koopman P. Cyclic Redundancy Code (CRC) polynomial selection for embedded networks / P. Koopman, T. Chakravarty // The Intern. Conference on Dependable Systems and Networks, DSN-2004, 28 June–1 July 2004. – Florence, Italy, 2004. – P. 145–154. DOI : 10.1109/DSN.2004.1311885

15. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Д. В. Ефанов. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 171 с.

16. Сагалович Ю. Л. Введение в алгебраические коды / Ю. Л. Сагалович. – М. : Ин-т проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, 2010. – 302 с.

17. Sellers F. F. Error detecting logic for digital computers / F. F. Sellers, M.-Y. Hsiao, L. W. Bearnson. – New York : McGraw-Hill, 1968. – XXI + 295 p.

18. Goessel M. Error detection circuits / M. Goessel, S. Graf. – London : McGraw-Hill, 1994. – 261 p.

19. Сапожников В. В. Новые структуры систем функционального контроля логических схем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 2. – С. 127–143.

20. Berger J. M. A note on error detection codes for asymmetric channels / J. M. Berger // Information and Control. – 1961. – Vol. 4, issue 1. – P. 68–73. DOI : 10.1016/S0019-9958(61)80037-5

21. Bose B. Systematic unidirectional error-detection codes / B. Bode, D. J. Lin // IEEE Transaction on Computers. – Nov. 1985. – Vol. C-34. – P. 1026–1032.

22. Аксёнова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2 / Г. П. Аксёнова // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 9. – С. 126–135.

23. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Т. 34, № 6. – С. 17–29.

24. Sapozhnikov V. Method of combinational circuits testing by dividing its outputs into groups and using codes, that effectively detect double errors / V. Sapozhnikov, D. Efanov, Vl. Sapozhnikov, V. Dmitriev // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017). – Novi Sad, Serbia. – 2017. – September 29–October 2. – P. 129–136. DOI : 10.1109/EWDTS.2017.8110123

25. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.

26. Ефанов Д. В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 10. – С. 152–169.

27. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL : http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks (дата обращения: 20.12.2017).

References

1. Kazimov G. A., Aleshin V. N., Derevyanko A. E., Zolotareva S. V., Lekuta G. F., Platunov S. B., Suraev A. V., Khokhlov S. A. & Khromushkin K. D. *Microprotsessornaya tsentralizatsiya strelok i signalov EBILock 950* [*Computer-based interlocking of points and signals EBILock 950*]. Ed. by G. D. Kazieva. Moscow, "TRANSIZDAT" Publ., 2008, 368 p. (In Russian)

2. Malinovskiy M. L., Alenin D. A., Barsov V. I. & Konovalenko N. V. Perspektivy ispolzovaniya FPGA-tekhnologiy v sistemakh zheleznodorozhnoy avtomatiky [The prospects of using technologies in the systems of railroad automation]. *Vestnik Kharkovskogo Natsionalno tekhnicheskogo selskokhozyaistvennogo Universiteta imeny Petra Vasilenko. Tekhnicheskiye nauky. Vyp. 130. Problemy energoobespecheniya i energosberezheniya v APK "Ukraina"* [*Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko. Engineering sciences. Issue 130. Problems of power supply and power saving in AIC "Ukraina"*]. Kharkiv, Kharkiv National Technical University of Agriculture Publ., 2012, pp. 79–81. (In Russian)

3. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Khristov Kh. A. & Gavzov D. V. *Metody postroeniya bezopasnykh mikroelektronnykh system zheleznodorozhnoy avtomatiky* [*The methods of building safe microelectronic systems of railroad automation*]. Moscow, Transport Publ., 1995, 272 p. (In Russian)

4. Parkhomenko P. P. & Sogomonyan E. S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiky (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturniye sredstva)* [*The foundations of technical diagnostics (optimization of diagnosis algorithms, hardware equipment)*]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981, 320 p. (In Russian)

5. Matrosova A. Y. *Algoritmicheskiye metody sinteza testov* [*Algorithmic methods of test synthesis*]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1990, 206 p. (In Russian)

6. Drozd A. V., Kharchenko V. S., Antonshchuk S. G., Drozd Yu. V., Drozd M. A. & Sulima Yu. Yu. *Rabocheye diagnostirovaniye bezopasnykh informatsionno-upravlyayushchykh system* [*Operational diagnosis of safe information management systems*]. Eds by A. V. Drozd, V. S. Kharchenko. Kharkov, N. E. Zhukovskiy National Aerospace University (KhAI) Publ., 2012, 614 p. (In Russian)

7. Mitra S. & McCluskey E. J. Which concurrent error detection scheme to choose. *Proceedings of International Test Conference.* Atlantic City, New York, USA, 03–05 October, 2000, pp. 985–994. DOI: 10.1109/TEST.2000.894311

8. Nicolaidis M. & Zorian Y. On-line testing for VLSI – a compendium of approaches. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, no. 12, pp. 7–20. DOI: 10.1023/A:1008244815697

9. Saposhnikov Vl. V., Moshanin V., Saposhnikov V. V. & Goessel M. Experimental results for self-dual multi-output combinational circuits. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*,1999, vol. 14, issue 3, pp. 295–300.

10. Sogomonyan E. S. & Slabakov E. V. *Samoproveryayemiye ustroistva i otkazoustoichiviye sistemy* [*Self-testing checkers and fail-safe systems*]. Moscow, Radio and communication Publ., 1989, 208 p. (In Russian)

11. Fujiwara E. *Code design for dependable systems: theory and practical applications.* New-Jersey, John Wiley & Sons Press, 2006, 720 p.

12. Lala P. K. *Principles of modern digital design.* New-Jersey, John Wiley & Sons Press, 2007, 436 p.

13. Castagnoli G., Brauer S. & Herrmann M. Optimization of cyclic redundancy-check codes with 24 and 32 parity bits. *IEEE Transactions on Communications*, 1993, vol. 41, issue 6, pp. 883–892. DOI: 10.1109/26.231911

14. Koopman P. & Chakravarty T. Cyclic Redundancy Code (CRC) polynomial selection for embedded networks. *The Intern. Conference on Dependable Systems and Networks*, *DSN–2004*, 28 June–1 July 2004. Florence, Italy, 2004, pp. 145–154. DOI: 10.1109/DSN.2004.1311885

15. Efanov D. V. *Funktsionalniy control i monitoring ustroistv zheleznodorozhnoy avtomatiky i telemekhaniky:* monografiya [*Concurrent error detection and monitoring of devices of railroad automation and telemechanics*: monograph]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, 171 p. (In Russian)

16. Sagalovich Yu. L. *Vvedeniye v algebraicheskiye kody* [*Introduction to algebraic codes*]. Moscow, A. A. Kharkevich Institute for Information Transmission Problems RAS Publ., 2010, 302 p. (In Russian)

17. Sellers F. F., Hsiao M.-Y. & Bearnson L. W. *Error detecting logic for digital computers.* New York, McGraw-Hill Press, 1968, XXI + 295 p.

18. Goessel M. & Graf S. *Error detection circuits.* London, McGraw-Hill Press, 1994, 261 p.

19. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Dmitriyev V. V. Noviye struktury system funktsionalnogo kontrolya logicheskykh skhem [The new structures for concurrent error detection of logical circuits]. *Automation and telemechanics*, 2017, no. 2, pp. 127–143. (In Russian)

20. Berger J. M. A note on error detection codes for asymmetric channels. *Information and Control*, 1961, vol. 4, issue 1, pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5

21. Bose B. & Lin D. J. Systematic unidirectional error-detection codes. *IEEE Transaction on Computers*, 1985, vol. C-34, Nov., pp. 1026–1032.

22. Aksenova G. P. Neobkhodimiye i dostatochniye usloviya dlya postroyeniya polnostyu proveryaemykh shkem svertky po modulyu 2 [The necessary and sufficient conditions for building totally self-checking circuits of modulo 2 convolution]. *Automation and telemechanics*, 1979, no. 9, pp. 126–135. (In Russian)

23. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. Postroyeniye modifitsirovannogo koda Bergera s minimalnym chislom neobnaruzhyvayemykh oshibok informatsionnykh razryadov [The design of a modified Berger code with minimum number of undetected errors of data bits]. *Electronic modeling*, 2012, vol. 34, no. 6, pp. 17–29. (In Russian)

24. Sapozhnikov V., Efanov D., Sapozhnikov Vl. & Dmitriev V. Method of combinational circuits testing by dividing its outputs into groups and using codes, that effectively detect double errors. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017).* Novi Sad, Serbia, 2017, September 29–October 2, pp. 129–136. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110123

25. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. O svoistvakh koda s summirovaniyem v skhemakh funktsionalnogo kontrolya [On the properties of a summation code in concurrent error detection circuits]. *Automation and telemechanics*, 2010, no. 6, pp. 155–162. (In Russian)

26. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. Primeneniye modulnykh kodov s summirovaniyem dlya postroyeniya system funktsionalnogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskykh skhem [Application of module summation codes for building concurrent error detection systems of combinational logic circuits]. *Automation and telemechanics*, 2015, no. 10, pp. 152–169. (In Russian)

27. *Collection of Digital Design Benchmarks.* URL: http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks (accessed: 20.12.2017).

САПОЖНИКОВ Валерий Владимирович – д-р техн. наук, профессор, port.at.pgups1@gmail.com; САПОЖНИКОВ Владимир Владимирович – д-р техн. наук, профессор, at.pgups@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); *ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – д-р техн. наук, доцент, TrES-4b@yandex.ru (Российский университет транспорта (МИИТ)); АБДУЛЛАЕВ Руслан Борисович – аспирант, ruslan_0507@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 69.003:65

С. В. Соловьев, А. В. Кабанов, Н. А. Жемчугова

К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ СХЕМ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ И РЕКОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СОРТИРОВОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Дата поступления: 09.06.2018
Решение о публикации: 17.09.2018

Аннотация

Цель: Дальнейшее совершенствование методов организации работ по строительству и реконструкции железнодорожных станций на примере инфраструктуры сортировочных комплексов. **Методы:** Методами теории поточного строительства в зависимости от технологической компоновки и структуры объектов железнодорожных станций выделяются оптимальные объемы фронтов работ для развертывания строительных потоков. Эффективные варианты организации работ выбираются по рациональным значениям коэффициента совмещения объектных и специализированных потоков, при которых сохраняется максимально возможная (для условий строительства или реконструкции) перерабатывающая способность станции. **Результаты:** Определены зависимости перерабатывающей способности станции от объема фронта работ для строительства и реконструкции сортировочных комплексов различных типов – односторонних, комбинированных и пр. **Практическая значимость:** Ввиду отсутствия современных научно-методических и производственных регламентирующих документов по организации строительства и реконструкции данного типа объектов транспорта материалы, приведенные в статье, имеют большое практическое значение.

Ключевые слова: Теория поточного строительства, инфраструктура железнодорожных станций, сортировочные комплексы, коэффициент совмещения.

Sergey V. Solovyev, director general, SolovyevSV@rzdstroy.ru (AO "RZhDstroy"); ***Alexander V. Kabanov,** Cand. Eng. Sci., associated professor, avkabanov07@inbox.ru; ***Nadezhda A. Zhemchugova,** postgraduate student, dguchila@rambler.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University)
ON THE DEVELOPMENT OF LAYOUTS ON CONSTRUCTION AND RENOVATION OF MARSHALLING COMPLEXES

Summary

Objective: Further improvement of organizational management methods for construction and renovation of railroad stations by the example of marshalling complexes infrastructure. **Methods:** By means of the methods of continuous construction theory, depending on technological arrangement and structure of facilities of railroad stations, an optimum amount of work was singled out for the purpose of construction lines development. Effective variants of organizational management were selected according to rational coefficient values of combining the facility and specialized flows, in case of which the maximum possible (for conditions of construction and renovation) estimated capacity of the station was preserved. **Results:** The dependencies of estimated capacity and the amount of work for construction and renovation of marshalling complexes of different types (one-way, combined, etc.) were determined. **Practical importance:** The data presented in the article is of high practical relevance due to the absence of modern research and industrial regulatory documents on construction and renovation management of the given type of transport facilities.

Keywords: The theory of continuous construction, railway stations infrastructure, marshalling complexes, combining coefficient.

Эффективные схемы организации работ по сооружению объектов железнодорожной инфраструктуры обеспечивают сокращение сроков реализации инвестиционных проектов, планомерный ввод мощностей и прирост технической оснащенности железных дорог, рентабельность деятельности подрядных строительных организаций [1–14]. Перспективные объемы строительных и реконструктивных работ по наращиванию поездопотоков на различных полигонах закреплены в рамках Генеральной схемы развития сети железных дорог ОАО «РЖД» до 2020 и 2025 годов в региональном разрезе (рис. 1) [1–16].

Предусматривается большой объем (30–40 % от общего) работ по строительству и реконструкции объектов станционной инфраструктуры. При строительстве и реконструкции железнодорожных сортировочных комплексов специализированные строительные потоки [5–16] формируются из следующих видов работ:

– строительство внутриузловых соединительных путей;

– строительство новых главных путей;

– увеличение длины приемо-отправочных путей;

– реконструкция существующих сортировочных горок;

– строительство дополнительных сортировочных систем;

– укладка дополнительных съездов;

– реконструкция стрелочных групп и стрелочных горловин;

– реконструкция и модернизация систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) приемо-отправочных путей;

– строительство и реконструкция систем энергоснабжения.

– реконструкция, модернизация устройств ЖАТ и горочного оборудования сортировочных систем.

Для обеспечения эксплуатационных показателей работы комплекса как на время строи-

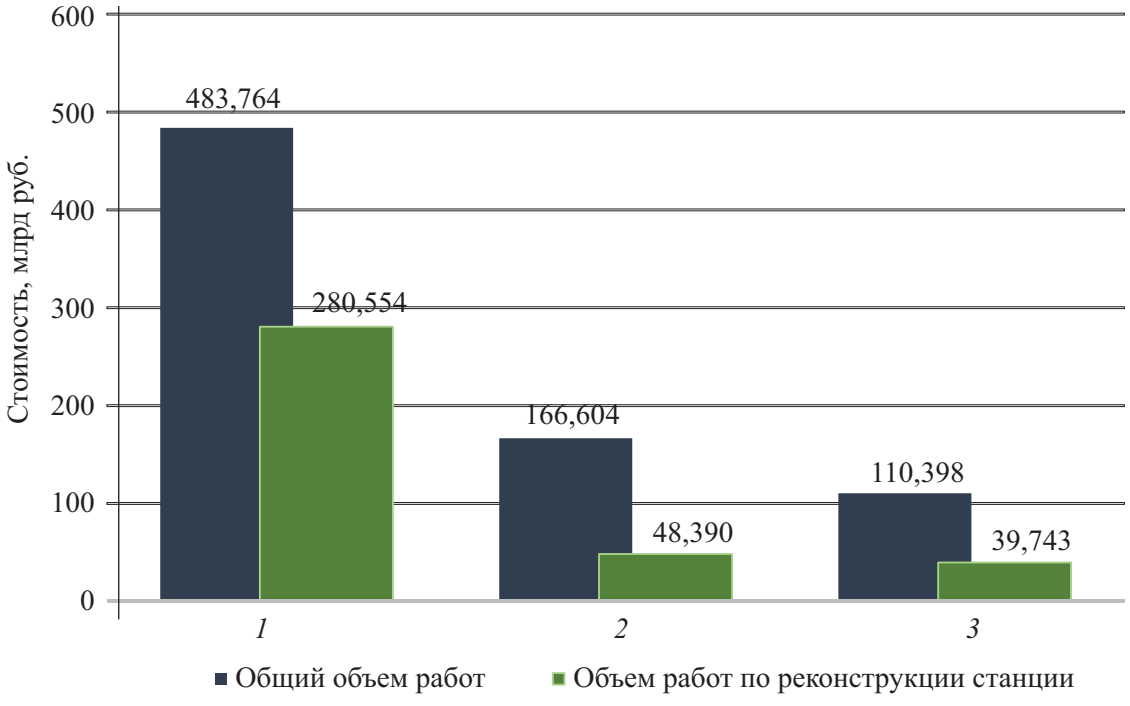


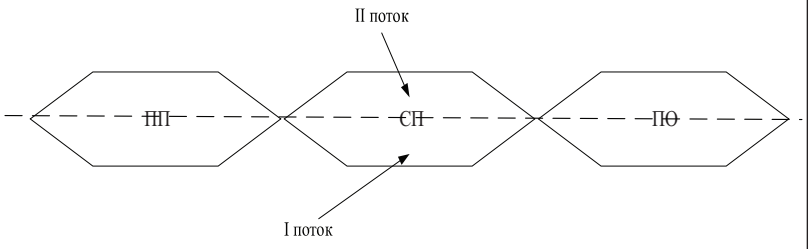
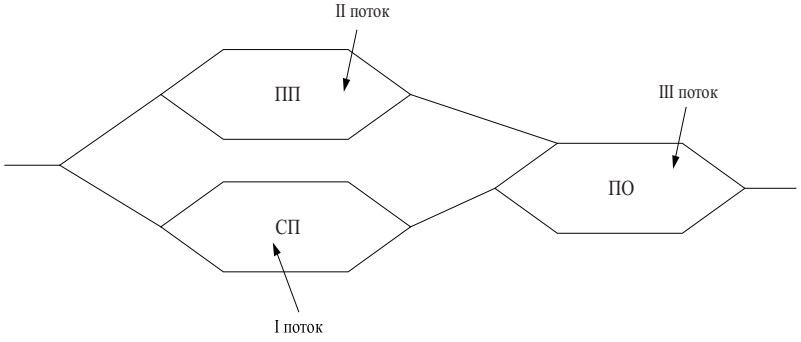
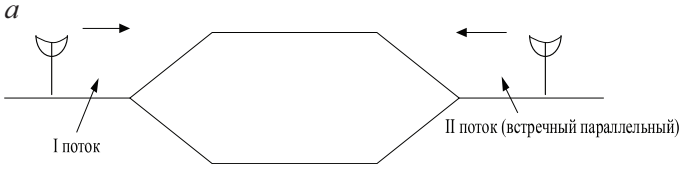
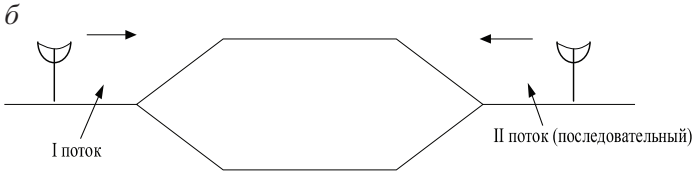
Рис. 1. Объемы выполнения работ по инфраструктуре железнодорожных станций в государственных инвестиционных проектах развития железнодорожной инфраструктуры: *1* – на подходах к портам Северо-Запада; *2* – на подходах к портам Азово-Черноморского бассейна; *3* – восточной части БАМА

тельства, так и во время ввода в эксплуатацию требуются оптимальные организационно-технологические решения, учитывающие многокритериальную специфику выполнения строительных работ. Авторами разработаны основные варианты организации системы строительных потоков по критерию оптимального коэффициента совмещения, снижения себестоимости строительно-монтажных работ (текущие затраты C); эффективному использованию капитальных вложений в машины и механизмы (единовременные затраты $K_ф$) (таблица).

Сортировочные комплексы (СК) представляют собой транспортные перерабатывающие системы, регулирующие пропуск вагонопотока по направлениям. Такие комплексы состоят из последовательного расположения парков приема (ПП), сортировочного (СП) и параллельного или последовательного расположения отправочных (ПО) или передаточных парков.

Организация работ по строительству сортировочных комплексов проектируется комплексными потоками. Объемы и фронты работ

Варианты специализированных строительных потоков строительства и реконструкции сортировочных станций

№ пп.	Элементы станционной инфраструктуры	Варианты схем развития потоков	Критерий
1	Схемы расположения парков: – односторонняя (*а*) – комбинированная (*б*) *(в пределах этапа строительства)*	*а*  *б*  	$K_{c\ \min}$ $K_{c\ \max}$
2	Схемы устройства входных и выходных горловин *(в пределах этапа строительства)*	*а*  *б*  	$K_c^{\max}$ $K_c^{\min}$

Окончание таблицы

№ пп.	Элементы станционной инфраструктуры	Варианты схем развития потоков	Критерий
3	Последовательность включения (по мере готовности) элементов верхнего строения пути в систему ЖАТ станции	Схема развития потоков разрабатывается с учетом ввода объектов ЖАТ в эксплуатацию	$K_{c\,\min}$
4	Схемы развязки подходов, примыкающих к сортировочной станции	Варианты схем этапности производства работ	$0 < K_c < 1$
5	Схемы расположения приемо-отправочных транзитных парков	Варианты схем организации стройгенплана.	$0 < K_c < 1$
6	Схемы расположения ходовых путей для поездных локомотивов	Варианты схем этапности производства работ. Варианты схем организации стройгенплана.	$1 < K_c < 1$
7	Количество парковых, вытяжных и подъездных путей, включаемых в объемы работ по реконструкции или вводимых в эксплуатацию при строительстве	Варианты схем этапности производства работ. Варианты схем реконструкции, обеспечивающие максимальную в этих условиях перерабатывающую способность станции	$K_c \rightarrow \min$, $N_{\text{В}} \rightarrow \max$

для комплексного потока группируются по элементам сортировочной системы (рис. 2):

$$T_{\text{ср.с.с}} = (t_{1\text{к.п}} + t_{2\text{к.п}} + t_{3\text{к.п}}) \cdot K_c,$$

$$t_{1\text{к.п}} = t'_{\text{Г1}} + t_{\text{ППП}} + t''_{\text{Г1}},$$

$$t_{2\text{к.п}} = t'_{\text{Г2}} + t_{\text{ПСП}} + t''_{\text{Г2}},$$

$$t_{3\text{к.п}} = t'_{\text{Г3}} + t_{\text{ППО}} + t''_{\text{Г3}},$$

$$K_c = [K_{c\text{ПП}}; K_{c\text{СП}}; K_{c\text{ПО}}].$$

Здесь 1′ – входная горловина парка приема (стрелочные переводы, замедлители); 1 – верхнее строение пути парка приема; 1″ – выходная горловина парка приема; 2′ – входная горловина сортировочного парка; 2 – верхнее строение пути сортировочного парка; 2″ – выходная горловина сортировочного парка; 3′ – входная горловина парка отправления; 3 – верхнее строение пути парка отправления; 3″ – выходная горловина парка отправления; $t_{\text{Г}}$ – продолжительность специализированного потока по строительству горловины; сроки производства работ по строительству сортировочной станции: $t'_{\text{Г1}}$ – продолжительность выполнения работ по входной горловине парка приема (укладка стрелочных переводов); $t_{\text{ППП}}$ – продолжительность выполнения работ по устройству путей парка приема; $t''_{\text{Г1}}$ – продолжительность выполнения работ по выходной горловине парка приема (укладка стрелочных переводов); $t'_{\text{Г2}}$ – продолжительность выполнения работ по входной горловине сортировочного парка; $t_{\text{ПСП}}$ – продолжительность выполнения работ по устройству путей сортировочного парка; $t''_{\text{Г2}}$ – продолжительность выполнения работ по выходной горловине сортировочного парка; $t'_{\text{Г3}}$ – продолжительность выполнения работ по входной горловине парка отправления; $t_{\text{ППО}}$ – продолжительность выполнения работ по устройству путей парка отправления; $t''_{\text{Г3}}$ – продолжительность выполнения работ по выходной горловине парка отправления.

В условиях большой сложности данного типа объектов, специфики возведения различных объектов инфраструктуры станции, сложных организационно-технологических зависимостей между исполнителями – специализированными подрядными строительными организациями основным критерием оптимальности является максимальный ввод (по грузообороту) в действие производственных мощностей при минимальных издержках. Исследованиями, проведенными авторами, получены зависимости (рис. 3), позволяющие определять величину оптимальной перерабатывающей способности станции $N_{\text{в}}$ в зависимости от размера (F) фронта работ (в процентах от общей сметной стоимости объекта).

Для получаемых на этой основе формообразований комплексов работ (ФКР) [8] и технологических схем разрабатываются варианты календарных графиков. Оптимальным является вариант, соответствующий рациональному коэффициенту совмещения (K_c).

Значение K_c по вариантам организационно-технологических схем (рис. 4) соответствует

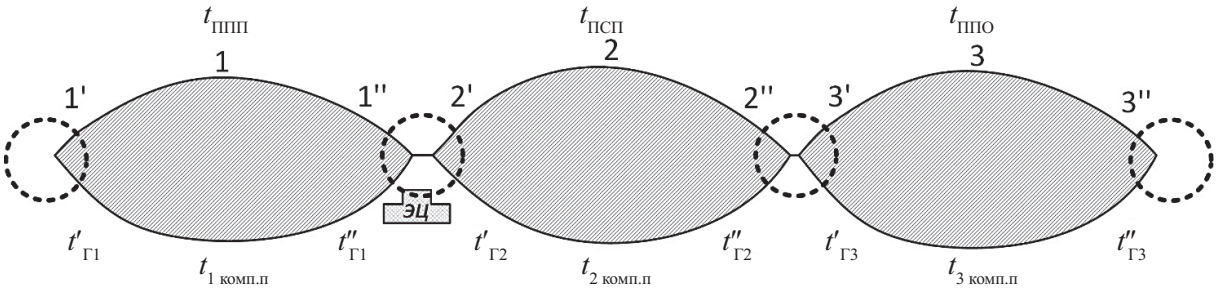


Рис. 2. Схема определения фронтов работ и расчета продолжительности специализированных потоков при строительстве сортировочной станции

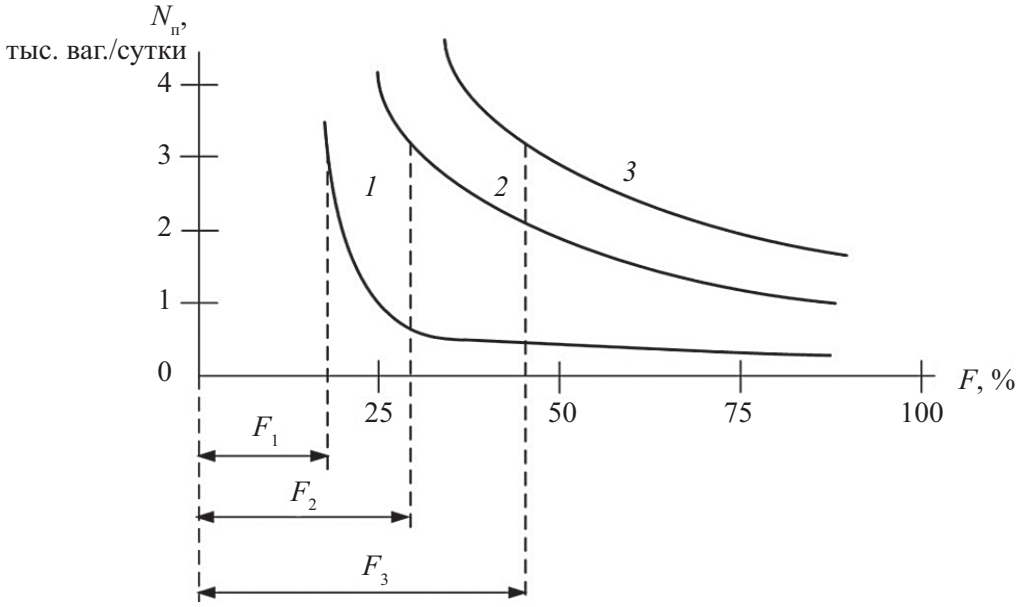


Рис. 3. Изменение перерабатывающей способности ($N_п$) железнодорожной станции в зависимости от объема выделяемых фронтов работ (F) на развертывание строительных потоков: F_1, F_2, F_3 – размер строительных потоков фронта предварительных работ до уменьшения перерабатывающей способности соответствующих станций (*1* – при строительстве железнодорожной сортировочной станции; *2* – при реконструкции станций, оборудованных горками с последовательным роспуском; *3* – при реконструкции станций с параллельным роспуском)

пересечению кривых зависимостей K_c от прироста текущих затрат на себестоимость работ (ΔC_{1-i}) и единовременных затрат в виде капитальных вложений ($\Delta K_{\Phi_{1-i}}$).

Анализ моделей календарных графиков на объектах реконструкции и строительства станционной инфраструктуры государственного инвестиционного проекта развития железнодорожной инфраструктуры на подходах к портам Северо-Запада показал, что снижение стоимостных показателей в результате применения изложенной методики выбора оптимального варианта схем организации работ по сортировочным станциям составляет 6–8 % от общей сметной стоимости объекта.

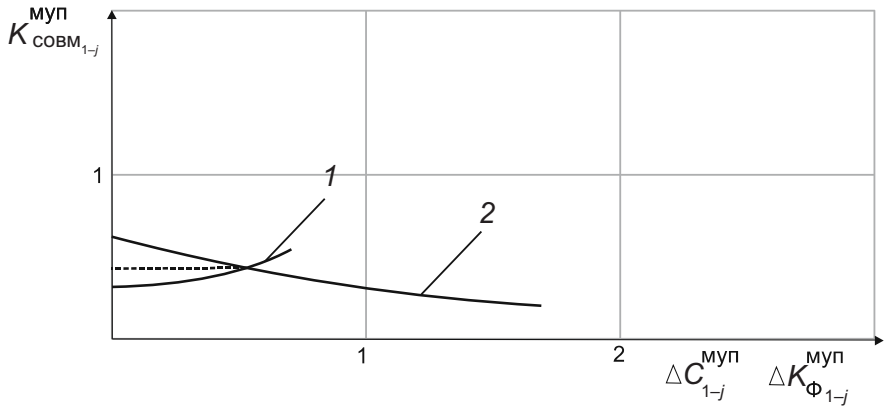


Рис. 4. Определение рационального коэффициента совмещения:
1 – $K_{совм} = f(\Delta K_{\Phi_{1-i}})$; *2* – $K_{совм} = f(\Delta C_{1-i})$

Библиографический список

1. Генеральная схема развития сети железных дорог ОАО «РЖД» до 2020 и 2025 года.

2. СП 48.13330.2011. Организация строительства. – М. : ЦПП, 2011. – 48 с.

3. СНиП 3.01.01–85. Организация строительного производства. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 56 с.

4. Инструкция по содержанию технической документации на устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) ЦШ-617-10 (первая редакция). – М. : ЦУКС, 2010. – 47 с.

5. Инструкция о порядке разработки, согласования и утверждения проектной документации на строительство объектов, финансируемое ОАО «РЖД» от 27 октября 2005 г. № 1701р (ред. Распоряжений ОАО «РЖД» от 12.10.2009 № 2076р, от 13.08.2010 № 1748р). – М. : ЦУКС, 2010. – 30 с.

6. Правила приемки в эксплуатацию законченных строительством усилением, реконструкцией объектов федерального железнодорожного транспорта. – Утв. МПС Российской Федерации 25.12.2000 г. № ЦУКС. – 799 с.

7. Будников М. С. Основы поточного строительства / М. С. Будников, П. И. Недавний, В. И. Рыбальский. – Киев : Будівельник, 1961. – 361 с.

8. Болотный В. Я. Совершенствование схем и технологии работы железнодорожных станций : учеб. пособие для вузов / В. Я. Болотный. – М. : Транспорт, 1986. – 280 с.

9. Кельчевский А. К. Обоснование сроков реконструкции раздельных пунктов. / А. К. Кельчевский, К. В. Симонов, А. Г. Бойко // Информационное обеспечение технологии и управления строительством. Проблемы и решения : сб. науч. трудов. – М. : МИИТ, 1998. – Вып. 920. – С. 24–25.

10. Методические рекомендации по выбору оптимального варианта организации строительных работ при развитии станций. – М. : ЦНИИС, 1984. – 87 с.

11. Шепитько Т. В. Рекомендации по технологии и организации укладки и балластировки пути при скоростном переустройстве станций и реконструкции железных дорог / Т. В. Шепитько, Б. В. Гашков, С. А. Шепитько. – М. : ЦНИИС, 1989.

12. Луцкий С. Я. Проблемы оптимальной организации переустройства железнодорожных узлов / С. Я. Луцкий, Э. С. Спиридонов // Фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы в области железнодорожного транспорта 1998 г. : сб. науч. трудов. – М. : МИИТ, 1999. – Вып. 921. – С. 136.

13. Соколов В. Г. Взаимодействие генподрядных и субподрядных организаций в подготовке строительного производства / В. Г. Соколов, Б. В. Сакун // Транспортное строительство. – 1988. – № 9. – С. 8–10.

14. Кабанов А. В. Исследование организационно-технологических моделей переустройства железнодорожных сортировочных станций / А. В. Кабанов, Н. А. Жемчугова // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2016. – Т. 13, вып. 3 (46). – С. 303–310.

15. Кабанов А. В. Узловой метод организации строительства крупных транспортных объектов на примере реконструкции железнодорожной станции / А. В. Кабанов // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 10. – С. 108–111.

16. Реконструкция станции Лужская-Северная для подключения новых терминалов и соединительных путей : отчет АО «РЖДстрой». – 2016. – URL : http://www.rzdstroy.ru/objects/transport/rekonstrukciya-stancii-luzhskaya-severnaya (дата обращения : 16.04.2018).

References

1. *Generalnaya schema razvitiya sety zheleznykh dorog OAO "RZhD" do 2020 i 2025 goda* [*General development scheme of OAO "Russian Railways" railway network until 2020 and 2025*]. (In Russian)

2. *SP 48.13330.2011. Organizatsiya stroitelstva* [*Set of rules 48.13330.2011 "Construction management"*]. Moscow, ZhPP Publ., 2011, 48 p. (In Russian)

3. *SNiP 3.01.01–85. Organizatsiya stroitelnogo proizvodstva* [*Construction Rules and Regulations 3.01.01–85. Management of construction operations*]. Moscow, Gosstroi USSR Publ., 1985, 56 p. (In Russian)

4. *Instruktsiya po soderzhaniyu tekhnicheskoy dokumentatsii na ustroistva signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovky (STsB) TsSh-617–10 (Pervaya Redaktsiya)* [*Instruction on maintenance of engineering documentation on signalling, centralization and blocking devices*

(STsB) TsSH –617–10 (The Department of signalling, centralization and blocking of the Russian Railways) (The first version)]. Moscow, TsUKS, 2010, 47 p. (In Russian)

5. *Instruktsiya o poryadke razrabotki, soglasovaniya i utverzhdeniya proektnoy dokumentatsii na stroitelstvo obyektov, finansiruyemoye OAO "RZhD" ot 27 oktyabrya 2005 g. no. 1701p* [*Instruction on the order of development, endorsement and approval of project documentation on construction of facilities, financed by OAO "Russian Railways" dated October 27th 2005 no. 1701p*]. As amended by the regulations of OAO "RZhD" dated 12.10.2009 N 2076p, dated 13.08.2010 no. 1748p). Moscow, TsUKS, 2010, 30 p. (In Russian)

6. *Pravila priyemky v ekspluatatsiyu zakonchennykh stroitelstvom usileniyem, rekonstruktsiyey obyektov federalnogo zheleznodorozhnogo transporta* [*The rules of acceptance into service of the completed federal railroad facilities, strengthened by means of reconstruction*]. Utverzhdeny MPS Rossiyskoy Federatsii 25.12.2000 [Approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation 25.12.2000, no. TsUKS (The Department of Major Construction and Operation of Rail Transport Facilities of the Russian Railways)], 799 p. (In Russian)

7. Budnikov M. S., Nidavniy P. I. & Rubalskiy V. I. *Osnovy potochnogo stroitelstva* [*The foundations of continuous construction*]. Kiev, Budivelnik Publ., 1961, 361 p. (In Russian)

8. Bolotniy V. Y. *Sovershenstvovaniye i tekhnologii raboty zheleznodorozhnykh stantsiy* [*The improvement of schemes and operating procedures of railway stations*]. Moscow, Transport Publ., 1986, 280 p. (In Russian)

9. Kelchevskiy A. K., Simonov K. V. & Boiko A. G. Obosnovaniye srokov rekonstruktsii razdelnykh punktov [Justification of operation points reconstruction period]. *Informatsionnoye obespecheniye tekhnologii i upravleniya stroitelstvom. Problemy i resheniya* [*Information support of construction technology and management. Problems and solutions*]. *Sbornik nauchnykh trudov* [*Collection of studies*]. Moscow, MIIT Publ., 1998, issue 920, pp. 24–25. (In Russian)

10. *Metodicheskiye rekomendatsii po vyboru optimalnogo variant organizatsii stroitelnykh rabot pry razvitii stantsiy* [*Recommended practice for the choice of an optimum alternative of building activity organization during the development of stations*]. Moscow, TsNIIS (Central Scientific Research Institute of Construction) Publ., 1984, 87 p. (In Russian)

11. Shepitko T. V., Gashkov B. V. & Shepitko S. A. *Rekomendatsii po tekhnologii i organizatsii ukladky i ballastirovky puty pry skorostnom pereustroistve stantsiy i rekonstruktsii zheleznykh dorog* [*Recommendations for technology and management of track laying during fast-track rearrangement of stations and railroad reconstruction*]. Moscow, TsNIIS (Central Scientific Research Institute of Construction) Publ., 1989, 89 p. (In Russian)

12. Lutskiy S. Y. & Spiridonov E. S. Problemy optimalnoy organizatsii pereustroistva zheleznodorozhnykh uzlov [The reconstruction of junctions: issues of optimal management]. *Sbornik nauchnykh trudov "Fundamentalniye i poiskoviye nauchno-issledovatelskiye raboty v oblasty zheleznodorozhnogo transporta 1998 g."* [*Coll. of studies "Fundamental and basic research in the sphere of railway transport 1998"*]. Moscow, MIIT Publ., 1999, issue 921, p. 136. (In Russian)

13. Sokolov V. G. & Sakun B. V. Vzaimodeystviye genpodryadnykh i subpodryadnykh organizatsiy v podgotovke stroitelnogo proizvodstva [Interaction of general contractors and subcontractors during the organization of construction operations]. *Transportnoye stroitelstvo* [*Transport construction*], 1988, no. 9, pp. 8–10. (In Russian)

14. Kabanov A. V. Issledovaniye organizatsionno-tekhnologicheskykh modeley pereustroistva zheleznodorozhnykh sortirovochnykh stantsiy [The study of management and engineering models of railway yards reconstruction]. *Izvestiya Peterburgskogo Universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, vol. 13, issue 3 (46), pp. 303–310. (In Russian)

15. Kabanov A. V. Uzlovoy metod organizatsii stroitelstva krupnykh transportnykh obyektov na primere rekonstruktsii zheleznodorozhnoy stantsii [Node analysis of large transport facilities construction management by the example of the railway station reconstruction]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo* [*Industrial and civil construction*], 2014, no. 10, pp. 108–111. (In Russian)

16. *Rekonstruktsiya stantsii Luzhskaya-Severnaya dlya podklyucheniya novykh terminalov i soyedinitelnykh putey. Otchet AO "RZhDstroy". 2016 god* [*Reconstruction of Luzhskaya-Severnaya station for connection of terminals and exchange tracks. Report AO "RZhDstroy". 2016*]. URL: http://www.rzdstroy.ru/objects/transport/rekonstrukciya-stancii-luzhskaya-severnaya (accessed: 16.04.2018). (In Russian)

СОЛОВЬЕВ Сергей Вячеславович – генеральный директор АО «РЖДстрой», SolovyevSV@rzdstroy.ru; *КАБАНОВ Александр Васильевич – канд. техн. наук, доцент, avkabanov07@inbox.ru; ЖЕМЧУГОВА Надежда Александровна – аспирант, dguchila@rambler.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I)

УДК 629.083

Д. Н. Аршинцев, С. В. Толмачев, А. М. Бржезовский

РАЗРАБОТКА УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВАГОНОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Дата поступления: 27.07.2018
Решение о публикации: 29.09.2018

Аннотация

Цель: Разработка условий обращения по сети железных дорог ОАО «РЖД» общего пользования специальных грузовых железнодорожных вагонов, многоосных вагонов-контейнеров и железнодорожных неавтономных секций для перевозки грузов специального назначения. В режиме номинальной загрузки специальные вагоны обращаются в составах эшелонов с отдельным локомотивом, при этом скорости движения таких эшелонов могут быть выше по сравнению со скоростями, установленными действующими нормативными документами ОАО «РЖД» для грузовых поездов. **Методы:** Оценка условий обращения специального подвижного состава проводится на основе результатов комплексных динамических ходовых и по воздействию на путь и стрелочные переводы испытаний специального подвижного состава по методикам аттестованных испытательных центров с учетом требований ГОСТ Р 55050–2012. **Результаты:** Установлены условия обращения рабочего парка 8–32-осных специальных железнодорожных вагонов, многоосных вагонов-контейнеров и железнодорожных неавтономных секций. **Практическая значимость:** Разработан пакет нормативных документов ОАО «РЖД» в форме положений о технических условиях эксплуатации специальных железнодорожных вагонов, транспортеров и секций, предназначенных для перевозки грузов специального назначения.

Ключевые слова: Специальные железнодорожные вагоны, комплексные динамические и по воздействию на путь испытания, допускаемые скорости.

Dmitriy N. Arshintsev, Cand. Eng. Sci., chief of laboratory, 5017@mail.ru; **Sergey V. Tolmachev,** senior research associate, karst@yandex.ru; ***Alexander M. Brzhezovskiy,** Cand. Eng. Sci., leading research associate, s_brz@mail.ru (AO "Railway Research Institute") THE DEVELOPMENT OF SERVICE CONDITIONS FOR SPECIAL-PURPOSE CARS BASED ON THE RESULTS OF FULL-SCALE TESTS

Summary

Objective: To develop the conditions of special cargo railway cars, multi-axis container cars and railway non-autonomous multiple unit trains circulation for transportation of special-purpose goods on public railways of OAO "RZhD". The speeds of such trains can be higher in comparison with the speeds established by the existing normative documents of JSC "Russian Railways" for cargo trains. Special-purpose cars in nominal loading mode circulate in a train set with a unit locomotive. **Methods:** The assessment of conditions of the special-purpose rolling stock circulation was carried out by the results of tests on the line as well as the impact on the track and pointwork in the accredited centers, based on the regulations of GOST R 55050–2012. **Results:** The conditions for the fleet circulation consisting of 8–32-axle special-

purpose railway cars, multiaxial container cars and non-autonomous multiple unit trains were established. **Practical importance:** A set of regulatory documents of JSC "Russian Railways" was developed in the form of regulations on technical conditions of special-purpose railway cars, conveyors and multiple unit trains designed for transportation of special purpose freight.

Keywords: Special-purpose railway cars, complex dynamic tests, the impact on the track tests, permissible speed.

С целью допуска на сеть специальных железнодорожных вагонов, вагонов-контейнеров и железнодорожных секций для перевозки грузов специального назначения разрабатываются нормативные документы ОАО «РЖД» – Положения об условиях эксплуатации (ПУЭ). Они устанавливают правила безопасной эксплуатации специального подвижного состава на железнодорожных путях общего пользования колеи 1520 мм с учетом нормативных документов отрасли: Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (ПТЭ) [1], Инструкции по перевозке негабаритных грузов № ДЧ-1835 [2], Норм допускаемых скоростей движения подвижного состава (распоряжение ОАО «РЖД» от 08.11.2016 г. № 2240р) [3] и др.

Основные положения ПУЭ базируются на результатах габаритных [4–6] и комплексных динамических и по воздействию на путь и стрелочные переводы испытаний [6–10], стационарных и динамических тормозных испытаний и последующих расчетов.

В ПУЭ, как правило, содержится общее описание единицы или сцепа (секции) специального подвижного состава, особенностей конструкции экипажной части подвижного состава, тележек, автотормозов, технических характеристик каждой единицы специального подвижного состава, требования к содержанию и эксплуатации вагонов и автотормозов, порядок подготовки вагонов к перевозке груза и технического осмотра в пути следования, даются условия обращения вагонов и секций в порожнем и груженом состояниях, включая нормы допускаемых скоростей движения в прямых, кривых участках пути и по стрелочным переводам при движении в составе как специального, так и грузового поезда.

К специальному подвижному составу (несамоходному), для которого разрабатываются ПУЭ, относятся, например: вагоны-контейнеры для перевозки отработанного ядерного топлива (ОЯТ); железнодорожные изотермические секции; 4–32-осные транспортеры для перевозки крупногабаритных тяжеловесных несимметричных металлоконструкций и изделий нефтегазового и энергетического оборудования, обладающие высокой степенью заводской готовности.

Вагоны-контейнеры (рис. 1) представляют собой 4–12-осные грузовые вагоны, состоящие из кузова, несущей балки, опирающейся на систему несущих промежуточных балок по схеме «пятник–подпятник», двух концевых балок с автосцепными устройствами, тормозного оборудования. Ходовые части формируются из соединительных балок и комбинаций двух-, трех- и четырехосных грузовых тележек.

Железнодорожные изотермические секции – это сцепы, состоящие из 4–8-осных изотермических вагонов и используемые для перевозки специальных грузов по железным дорогам общего пользования в составах специальных и грузовых поездов. В состав секции могут входить один или несколько изотермических вагонов и вагоны сопровождения. Возможный вариант формирования секции с 8-осными изотермическими вагонами представлен на рис. 2.

Специальные 8–12-осные длиннобазные вагоны (с базой кузова более 14 м) выполняют, как правило, с подвижной хребтовой балкой. В качестве ходовых частей применяются комбинации 2-осных трехэлементных грузовых тележек модели 18-9965 или 4-осные тележки модели 18-9935, сформированные посредством объединения двух 2-осных трехэлементных

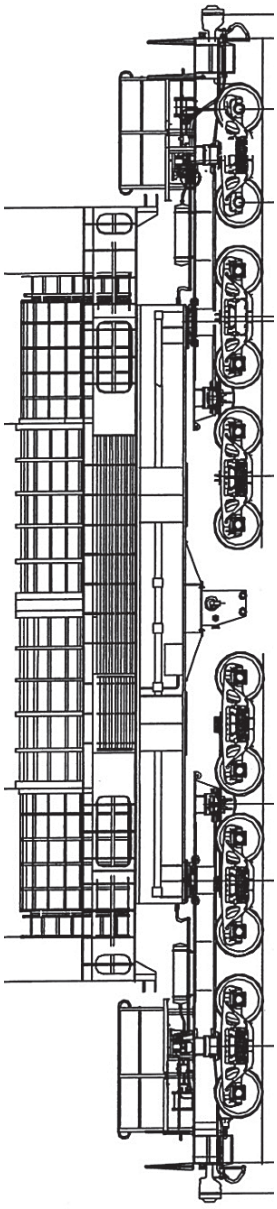


Рис. 1. 12-осный вагон-контейнер унифицированный

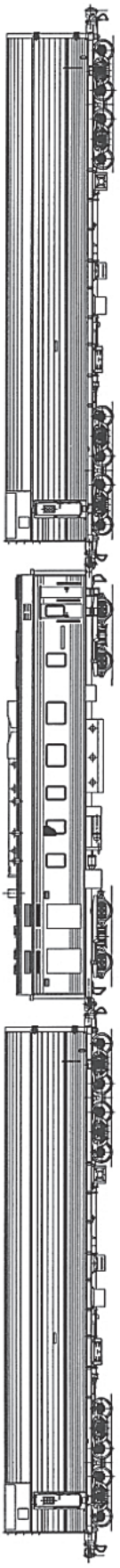


Рис. 2. Состав железнодорожной изотермической секции с 8-осными изотермическими вагонами

Рис. 3. Схема формирования комплекта железнодорожных 4- и 8-осных секций

тележек модели 18-9965 соединительной балкой тележек. Конструктивные особенности, отличающие эти тележки от серийных грузовых тележек, заключаются в наличии диагональных связей боковых рам и гидравлических гасителей колебаний, размещенных в вертикальном направлении параллельно пружинам центрального рессорного подвешивания.

В составы железнодорожных секций включаются один или несколько пассажирских вагонов сопровождения на двухосных тележках моделей 68-4065 и 68-4066.

Для перевозки негабаритных грузов, требующих специальных условий, в части как пропуска через постоянные сооружения железных дорог, так и установления допускаемых скоростей движения, используют комплекты железнодорожных секций. Возможная схема формирования такого комплекта представлена на рис. 3.

Для выявления условий обращения специальных железнодорожных вагонов проводятся приемочные и сертификационные комплексные динамические ходовые и по воздействию на путь и стрелочные переводы испытания, в рамках которых исследуются, в частности, показатели воздействия на путь и их соответствие критериям установления допускаемых скоростей движения по ГОСТ Р 55050–2012 [7–9].

Комплексные испытания в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55050–2012 проводятся, как правило, на участках пути и стрелочных переводах Скоростного испытательного полигона (СИП) АО «ВНИИЖТ» Белореченская–Майкоп Северо-Кавказской железной дороги. В качестве измерительных принимаются прямой участок пути, кривые радиусами 625 и 350 м, стрелочный перевод типа Р65 марки 1/11 на железобетонных шпалах (проект 2750).

На рис. 4 и 5 представлены некоторые результаты статистической обработки показателей динамических качеств груженых 12-осного вагона-контейнера и 8-осного изотермического вагона в составе железнодорожной секции при движении в прямых и кривых участках пути. На них наибольшие рамные силы и коэффициенты динамических добавок во всем диапазоне скоростей движения по измерительным участкам пути не превышали критериальных

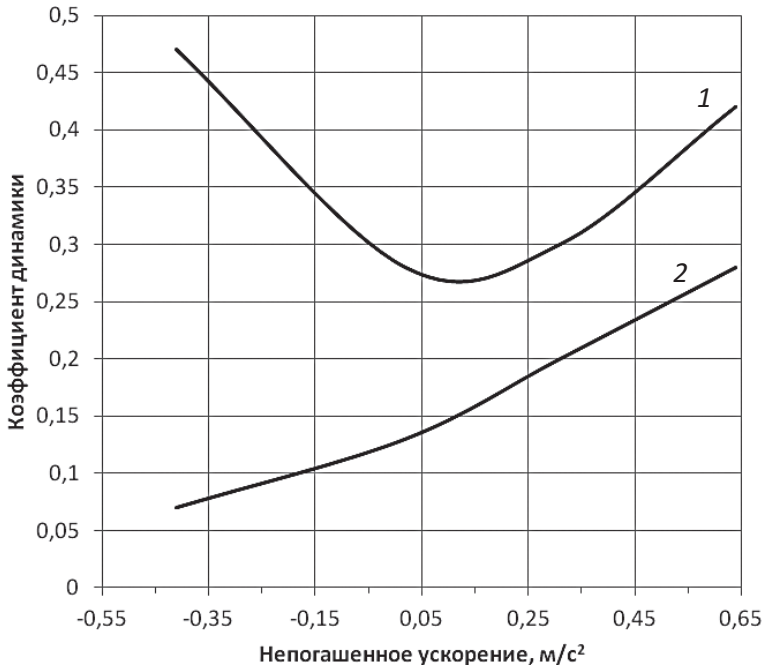


Рис. 4. Коэффициенты динамики обрессоренных масс в круговой кривой радиусом 350 м: *1* – 12-осный вагон-контейнер унифицированный; *2* – 8-осная железнодорожная изотермическая секция

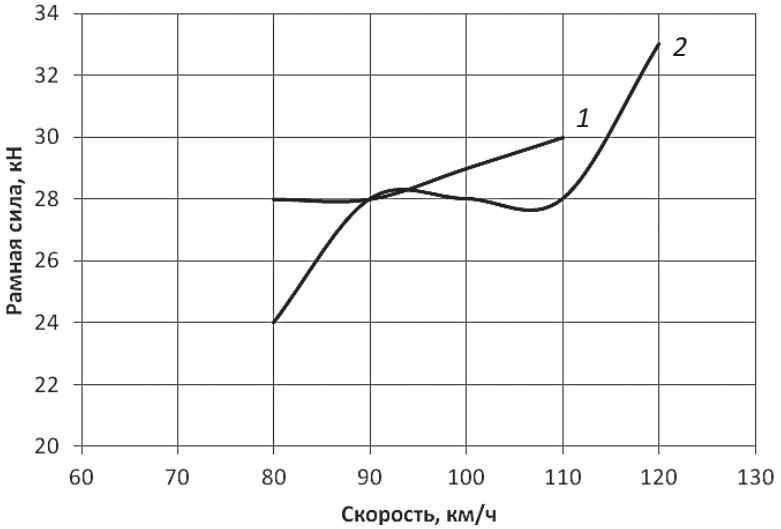


Рис. 5. Рамные силы в прямом участке (обозначения см. рис. 4)

значений, равных соответственно 0,40 от величины статической осевой нагрузки и 0,60 [7].

На рис. 6 и 7 представлены результаты статистической обработки показателей воздействия на путь 12-осного вагона-контейнера и 8-осного изотермического вагона железнодорожной секции. Из приведенных данных следует, что критериальные значения боковой силы и динамических напряжений в кромках подошвы рельса, равные соответственно 100 кН и 240 МПа [7], также не были превышены в исследованном диапазоне скоростей движения.

Как показано на рис. 4, с ростом скорости движения наблюдалось увеличение рамных сил, при этом на скоростях от 90 до 110 км/ч рамные силы были в пределах 28–30 кН. Коэффициенты динамических добавок по вертикальным колебаниям обрессоренных масс в круговой кривой радиусом 350 м (см. рис. 5) возрастали, начиная с равновесной скорости. При отрицательных непогашенных ускорениях характер показателей вертикальной динамики существенно различается, в связи с конструктивными особенностями этих экипажей.

Анализ боковых сил в кривом участке пути в зависимости от непогашенного ускорения показывает незначительные изменения их амплитуд для вагона-контейнера и 8-осного изотермического вагона в диапазоне непогашенных ускорений от –0,45 до 0,35 м/с^2 в кривой радиусом 350 м и от –0,10 до 0,89 м/с^2 в кривой радиусом 625 м. Наибольшие динамические напряжения в кромках подошвы рельса (рис. 7) изменяются во всем диапазоне непогашенных ускорений в пределах от 113 до 128 МПа как для вагона-контейнера, так и для 8-осного изотермического вагона; причем наименьшие напряжения зарегистрированы при движении в кривых с равновесными скоростями.

Совместно с экспериментальными данными производились также расчеты устойчивости рельсошпальной решетки от поперечного сдвига по балласту и напряжений на основной площадке земляного полотна [11]. Критериальные значения указанных показателей равны соответственно 1,4 (для пути со щебеночным балластом) и 0,08 МПа [7]. Расчетами пути на прочность установлено, что как для 8-осного изотермического вагона, так и для вагона-контейнера напряжения на основной площадке земляного полотна при движении по пути с рельсами Р65 составили 0,066 и 0,065 МПа соответственно; коэффициенты запаса устойчивости рельсошпальной решетки от поперечного сдвига по балласту не превышали 1,13 для пути на щебеночном балласте.

Таким образом, на основании экспериментальных и расчетных данных были даны следующие рекомендации:

– допускаемые скорости движения вагона-контейнера следует принимать по аналогии с 6–8-осными грузовыми вагонами общесетевого обращения на тележках модели 18–100 со статической осевой нагрузкой не более 22 т в соответствии с действующими нормами допускаемых скоростей движения [3];

– допускаемые скорости движения 8-осного изотермического вагона в прямых участках – не выше 120 км/ч, по стрелочным переводам на боковое направление – 40 км/ч; в кривых участках на пути с типовой конструкцией верхнего строения они определяются нормативом непогашенного ускорения 0,7 м/с^2, но не более 120 км/ч.

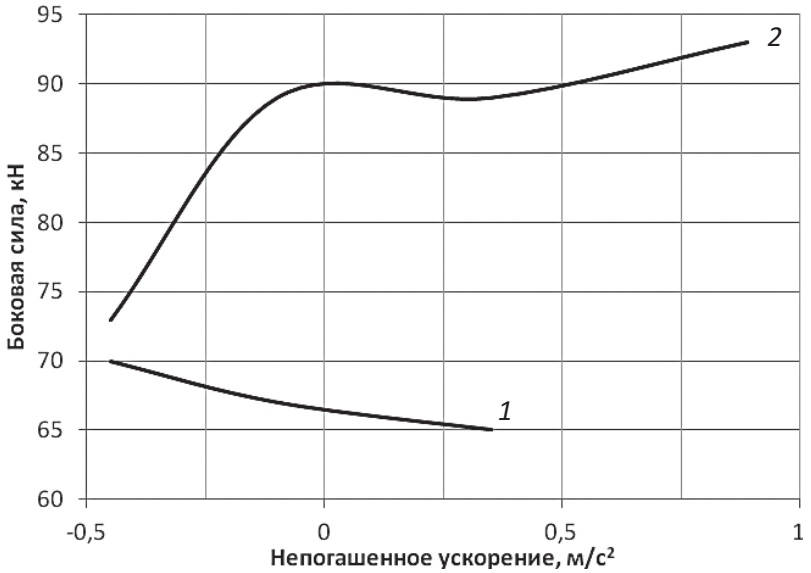


Рис. 6. Боковые силы в круговой кривой радиусом 625 м (обозначения см. рис. 4)

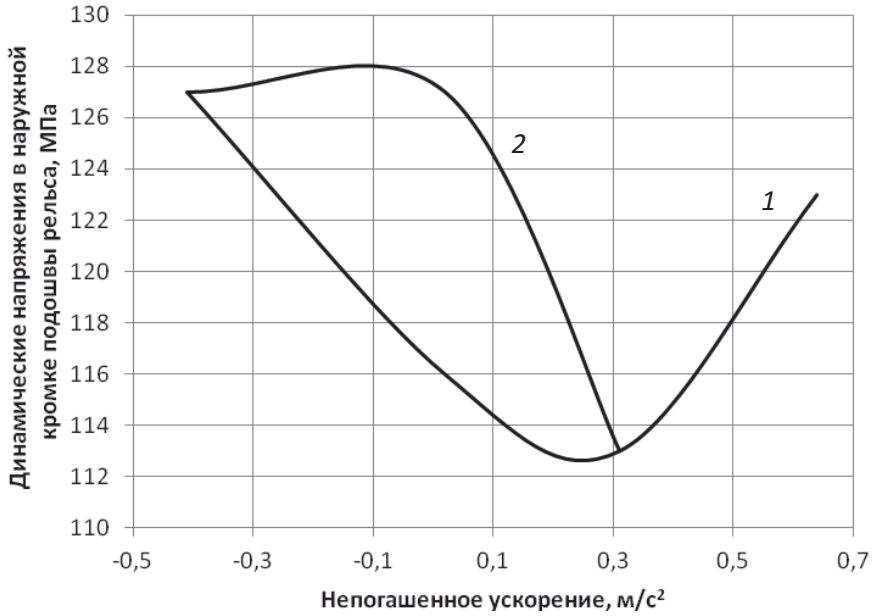


Рис. 7. Динамические напряжения в кромках подошвы рельса в круговой кривой радиусом 350 м (обозначения см. рис. 4)

Библиографический список

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – Приказ Минтранса России от 21.12.2012 г. № 286 (с изменениями по приказу Минтранса России от 30.03.2015 г. № 57).

2. Инструкция по перевозке негабаритных и тяжеловесных грузов на железных дорогах государств-участников СНГ, Латвийской Республики, Литовской Республики, Эстонской Республики – ДЧ-1835. – Совет по железнодорожному транспорту государств-участников СНГ. – М. : НПФ «Планета», 2007. – 191 с.

3. О нормах допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм. – Распоряжение ОАО «РЖД» от 08.11.2016 г. № 2240р.

4. ГОСТ 9238–2013. Габариты подвижного состава и приближения строений. – М. : Стандартинформ, 2014. – 173 с.

5. Львов А. А. Транспортеры для перевозки энергетического оборудования / А. А. Львов, А. М. Бржезовский // Железнодорожный транспорт. – 1982. – № 8. – С. 78–79.

6. Лазаренко Ю. М. Динамические качества специализированной платформы для перевозки полуприцепов и контейнеров / Ю. М. Лазаренко, А. М. Бржезовский, В. В. Семерханов // Динамические качества современного подвижного состава и особенности его воздействия на путь : труды ВНИИЖТ. – М. : Транспорт, 1997. – С. 10–27.

7. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2013. – 16 с.

8. Бржезовский А. М. Нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний подвижного состава / А. М. Бржезовский, А. В. Заверталюк, Ю. С. Ромен // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 5. – С. 40–45.

9. Бржезовский А. М. Актуализация норм допускаемых скоростей движения железнодорожного подвижного состава на инфраструктуре ОАО «РЖД» /А. М. Бржезовский, Б. Э. Глюзберг, И. В. Смелянский // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 5. – С. 26–33.

10. Бржезовский А. М. Результаты динамических испытаний вагона-контейнера на тележках модели 18-102 / А. М. Бржезовский // Динамические качества современного подвижного состава и особенности его воздействия на путь : труды ВНИИЖТ. – М. : Транспорт, 1997. – С. 68–76.

11. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, № ЦПТ-52/14. – М. : МПС РФ, 2000. – 38 с.

References

1. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii* [*Railway operating rules of the Russian Federation*]. Prikaz Mintransa Rossii ot 21.12.2012 g. no. 286 (s izmeneniyamy po prikazu Mintransa Rossii ot 30.03.2015 g. no. 57). [Order of the Russian Federation Ministry of Transportation dated December 12th, 2012, N 286 (as amended by the order of the Russian Federation Ministry of Transportation dated the 30th of March 2015 N 57)]. (In Russian)

2. *Instruktsiya po perevozke negabaritnykh i tyazhelovesnykh gruzov na zheleznykh dorogakh gosudarstv-uchastnikov SNG*, *Latviyskoy Respubliky*, *Litovskoy Respubliky*, *Estonskoy Respubliky – DCh-1835* [*Instruction on hauling of out-of-gauge and heavy loads on the railroads of member states of the CIS*, *the Republic of Latvia*, *the Republic of Lithuania*, *the Republic of Estonia – DCh-1835*]. Sovet po zheleznodorozhnomu transport gosudarstv-uchastnikov SNG [Railroad transport board of member states of the CIS]. Moscow, NPF (Scientific and Production Firm) “Planeta” Publ., 2007, 191 p. (In Russian)

3. *O normakh dopuskayemykh skorostey dvizheniya podvizhnogo sostava po zheleznodorozhnym putyam kolei 1520 (1524) mm* [*On the norms of the rolling stock free speed on 1520 (1524) mm gauge track*]. Rasporyazheniye OAO “RZhD” ot 08.11.2016 g. no. 2240p [OAO “Russian Railways” regulation dated November 8th], 2016, N 2240p]. (In Russian)

4. *GOST 9238–2013. Gabarity podvizhnogo sostava i priblizheniya stroyeniy* [*GOST 9238–2013. Minimum fixed structure and clearance to obstructions*]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 173 p. (In Russian)

5. Lvov A. A. & Brzhezovskiy A. M. Transportery dlya perevozky energeticheskogo oborudovaniya [Conveyors for power-generating equipment transportation].

Zheleznodorozhniy transport [*Railroad transport*], 1982, no. 8, pp.78–79. (In Russian)

6. Lazarenko Y. M., Brzhezovskiy A. M. & Semerkhanov V. V. Dinamicheskiye kachestva spetsializirovannoy platrormy dlya perevozky polupritsepov i konteinerov [Dynamic qualities of a specialized flat car for transportation of trailer-trucks and containers]. *Dinamicheskiye kachestva sovremennogo podvizhnogo sostava i osobennosty yego vozdeistviya na put* [*Dynamic qualities of the modern rolling stock and specificities of its impact on the track*]. *Trudy VNIIZhT* [*Proceedings of VNIIZhT*]. Moscow, Transport Publ., 1997, pp.10–27. (In Russian)

7. *GOST R 55050–2012. Zheleznodorozhniy podvizhnoy sostav. Normy opustimogo vozdeistviya na put i metody ispytaniy* [*GOST R 55050–2012. Railway rolling stock. The norms of acceptable impact on the track and test methods*]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 16 p. (In Russian)

8. Brzhezovskiy A. M., Zavertalyuk A. V. & Romen Y. S. Normy dopustimogo vozdeistviya na put i metody ispytaniy podvizhnogo sostava [The norms of acceptable impact on the track and the rolling stock test methods]. *Zheleznodorozhniy transport* [*Railroad transport*], 2015, no. 5, pp. 40–45. (In Russian)

9. Brzhezovskiy A. M., Glyuzberg B. E. & Smelyanskiy I. V. Aktualizatsiya norm dopuskayemykh skorostey dvizheniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava na infrastruture OAO “RZhD” [Actualization of the rolling stock free speed norms on OAO “Russian Railways” infrastructure]. *Zheleznodorozhniy transport* [*Railroad transport*], 2017, no. 5, pp. 26–33. (In Russian)

10. Brzhezovskiy A. M. Rezultaty dinamicheskykh ispytaniy vagona-konteinera na telezhkakh modely 18-102 [The results of container car dynamic tests conducted on 18-102 model car truck]. *Dinamicheskiye kachestva sovremennogo podvizhnogo sostava i osobennosty yego vozdeistviya na put* [*Dynamic qualities of the modern rolling stock and specificities of its impact on the track*]. *Trudy VNIIZhT* [*Proceedings of VNIIZhT*]. Moscow, Transport Publ., 1997, pp. 68–76. (In Russian)

11. *Metodika otsenky vozdeistviya podvizhnogo sostava na put po usloviyam obespecheniya yego nadezhnosty no. ЦПТ-52/14* [*Estimation technique of the rolling stock impact on the track based on the conditions of its reliability control*, *N TsPT-52/14*]. Moscow, The Ministry of Railways of the Russian Federation Publ., 2000, 38 p. (In Russian)

АРШИНЦЕВ Дмитрий Николаевич – канд. техн. наук, заведующий лабораторией, 5017@mail.ru; ТОЛМАЧЕВ Сергей Владимирович – старший научный сотрудник, karst@yandex.ru; *БРЖЕЗОВСКИЙ Александр Менделович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, s_brz@mail.ru (АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ)).

УДК 504.06:622.3

Е. И. Верех-Белоусова, Т. С. Титова

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ЛУГАНЩИНЫ

Дата поступления: 13.02.2018
Решение о публикации: 14.06.2018

Аннотация

Цель: Эколого-геохимическое обоснование возможности переработки породных отвалов угольных шахт Луганщины для получения металлов. **Методы:** Использованы общепринятые методики химического и физико-химического анализов проб отвальной породы, почвы и растительности, а также методы оценки экологической ситуации. **Результаты:** Приведены результаты исследования миграции тяжелых металлов на прилегающие к отвалам почвы и в системе «почва–растение». Установлен тип экологической ситуации по загрязнению растительности тяжелыми металлами. Основной причиной миграции тяжелых металлов являются процессы химического и биохимического окисления сульфидных минералов в составе складированной отвальной породы и процессы образования серной кислоты. Показано, что в составе отвальной породы содержится большое количество металлов с преобладанием оксидов железа, алюминия и кремния, а отвальную породу угольных шахт можно рассматривать как бедное алюминиевое сырье. **Практическая значимость:** Предложено применять естественные процессы образования серной кислоты в отвальной породе для биохимического выщелачивания алюминия как основного способа уменьшения их негативного влияния на окружающую среду и рационального использования природных ресурсов.

Ключевые слова: Породные отвалы, серная кислота, загрязнение, тяжелые металлы, биохимическое выщелачивание, переработка отвальной породы, алюминий.

***Ekaterina I. Verekh-Belousova,** Cand. Eng. Sci., associate professor, head of a chair, kate3152@yandex.ru (Luhansk Taras Shevchenko National University); **Tamila S. Titova,** D. Eng. Sci., professor, head of a chair, prorector (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) THE POSSIBILITY OF PROCESSING ROCK DUMP OF THE LUHANSK REGION COAL MINES: ENVIRONMENTAL AND GEOCHEMICAL JUSTIFICATION

Summary

Objective: To justify ecologically and geochemically rock dump processability of the Luhansk region coal mine for obtaining metals. **Methods:** The common methods of chemical and physicochemical analysis of debris, soil and vegetation samples as well as the valuation methods of ecological situation were applied. **Results:** The research data on migration of heavy metals to soils contiguous to dump and in the "soil-plant" system were presented. The type of ecological situation when heavy metals pollute vegetation was established. The main cause of heavy metals migration is in the processes of chemical and biochemical oxidation of sulfide minerals being a part of stock debris as well as the processes of sulfuric acid formation. It was shown that debris contained a large number of metals with ferrous oxide, aluminum and silicon prevailing. While the debris of coal mines could be regarded as lean aluminum raw material. **Practical importance:** It was suggested to use natural processes for the formation of sulfuric acid in debris for the purpose of biochemical oxidation of aluminum as the main method of reducing the environmental impact and rational use of natural resources.

Keywords: Rock dump, sulfuric acid, pollution, heavy metals, biochemical desalination, rock dump processing, aluminum.

Луганщина расположена в восточной части Донбасса, и угледобывающая отрасль здесь уже более 230 лет является основой экономического и социального развития региона. Однако негативным результатом добычи и обогащения угля стало интенсивное образование крупнотоннажных отходов – породных отвалов и терриконов. Добыча угля в регионе осуществляется с полным обрушением кровли углесодержащей породы, что приводит к «взрыхлению» горной породы и увеличению ее объема. Так, на каждые 1000 т угля приходится от 150 т породы, а в некоторых случаях и до 800 т [1]. К факторам образования большого количества отходов угледобычи относится и то, что бóльшая часть промышленных запасов на шахтах Донбасса (84,8 %) приходится на тонкие пласты мощностью не более 1,2 м, на пласты средней мощности – 15,2 % от общих промышленных запасов бассейна [2].

Проблема переработки породных отвалов угольных шахт в регионе, как и в целом в Донбассе, в настоящее время остается нерешенной и выступает предметом многочисленных научных исследований, которые показывают, что подавляющее большинство известных методов и способов переработки отходов угледобычи чаще всего являются энерго- или капиталоемкими и не предлагают экологически безопасных и малоотходных схем. В основном отходы добычи и обогащения угля используются для производства строительных материалов, удобрений, заменителей почво-грунтов и как сырье для получения некоторых металлов [3–8]. Некоторые исследователи для минимизации негативного воздействия отвалов на окружающую среду предлагают технологии их консервации [9].

Цель работы – эколого-геохимическое обоснование возможности переработки породных отвалов угольных шахт Луганщины для получения металлов как основного способа уменьшения их негативного влияния на окружающую среду и рационального использования природных ресурсов.

В Луганщине насчитываются 556 терриконов, из которых приблизительно 90 горят и ежегодно выбрасывают в атмосферу более 500 тыс. т вредных газовых и пылевых веществ. Ежегодно с 1 га среднего по размеру отвала выдувается больше 35 т мелкозема и вымывается большая масса водорастворимых солей. Продукты ветровой эрозии негативно влияют на окружающую среду на расстоянии до 100 км от отвала. Кроме загрязнения воздуха, терриконы и отвалы в результате дренажа дождевых и талых вод интенсивно загрязняют поверхностные и подземные воды токсичными элементами, которые входят в состав породы, а также существенно изменяют гидродинамический режим и уровень подземных вод [1, 10, 11]. По данным лаборатории экологии почв Луганского института агропромышленного производства на расстоянии 0,5 км по периметру от отвала черноземы полностью теряют свои свойства до глубины 0,6 м. А в зоне до 5 км происходят накопление тяжелых металлов, потеря гумуса и деградация почв [10].

Основной причиной негативного влияния породных отвалов угольных шахт на окружающую среду выступают процессы химического и биохимического окисления сульфидов (в основном пирита), протекающие в складированной отвальной породе.

Породы отвалов имеют своеобразные, отличающиеся от типичных ненарушенных почв водно-физические свойства: скелет и каменистость обусловливают их высокую водопроницаемость, а мелкоземлистый элювий глинистых пород и щебнисто-каменистые фракции аргиллита с влагоемкостью около 8–10 % приводят к достаточно большому запасу влаги. Благодаря этому создается стабильный водный режим, сохраняются значительные запасы производительной влаги [12]. Потому ранее существующее динамическое равновесие между поровыми растворами и твердой фазой нарушается и результатом становятся сложные геохимические процессы взаимодействия поровых растворов обновленного состава с разнообразными компонентами породы [13]. Основной и опаснейший из них – процесс образования серной кислоты при взаимодействии пирита и влаги, сконцентрированной на

его поверхности с растворенным в ней кислородом атмосферного воздуха. А при наличии в поровых растворах тионовых бактерий *Th. ferrooxidans* процесс кислотообразования имеет уже биохимическую природу. Химические и биохимические реакции образования серной кислоты являются экзотермическими и протекают с выделением большого количества тепла.

По результатам исследований донецких ученых М. П. Зборщика и В. В. Осокина [12, 13], установлено, что при длительном самонагревании отвальной породы в ней формируются сернокислотные зоны, которые наполнены отбеленной бесструктурной горной массой и дымящей на воздухе концентрированной серной кислотой. Последняя взаимодействует с карбонатами кальция и ускоряет при повышенных температурах гидролиз полевых шпатов, окисляет уголь и углефицированное вещество, а также взаимодействует с элементной серой.

Серная кислота интенсивно разлагает силикаты угленосных пород, переводя их компоненты в виде сульфатов в раствор. Насыщенные H_2SO_4 растворы берут из вмещающих пород Fe, Al, Mg, Na, K, Co, Ni, Zn, Cu и другие элементы [14].

На примере типичного породного отвала шахты «Луганская» (шахтоуправления «Луганское» государственного предприятия «Луганскуголь») было комплексно исследовано влияние биохимических процессов образования серной кислоты на прилегающие к отвалам территории. Отвал имеет высоту 95 м и площадь основания 180 тыс. м^2. Шахта добывает уголь марки ДГ, средней степени метаморфизма. Согласно проектной документации, санитарно-защитная зона отвала занята сельскохозяйственными угодьями (преимущественно пашней) [15].

Спектральный анализ образцов складируемой породы показал, что в ее химическом составе преобладают такие токсичные компоненты как As, Cr, Mn, Co, Ba, Ni, Zn и Pb. По своему содержанию в отвальной породе геохимический фон региона превысили Co, Zn и Ni.

В почвах поля, которое расположено на расстоянии 25 м от отвала и было засеяно озимой пшеницей, валовое содержание Cr составило 150 мг/кг, что превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 1,5 раза. Количество Mo в почве превысило $ПДК_{пр}$ в 1,4 раза. Содержание Zn в пахотном слое составило по результатам исследований 100 мг/кг, т. е. находилось на грани допустимой концентрации. Были определены коэффициенты концентраций и суммарные показатели загрязнения почвы на обследуемом участке по Cr, Zn, Cu и Mo (с учетом фоновых показателей загрязнения для черноземов обыкновенных). Оценка опасности загрязнения почв комплексом металлов Z_c составила 4,03, что за градацией оценочной шкалы характеризует обследуемую территорию по уровню загрязнения химическими элементами как высоко опасную.

Принимая во внимание то, что подвижность тех или иных элементов в значительной степени зависит от кислотных условий, на которые оказывают влияние процессы химического и биохимического окисления сульфидов в отвальной породе, было определено pH отобранных образцов почвы в зоне влияния отвала. В пробах, взятых в непосредственной близости к отвалу (30–40 м), pH имеет слабокислую реакцию (pH = 5). На удалении от отвала pH повышается до 6. Установлено, что в слабокислых и нейтральных условиях реакции почвы малоподвижны Cu, Cr, Mo, Ni, Co, практически неподвижен Pd [16]. Поэтому в данных условиях наблюдается интенсивное накопление тяжелых металлов. Результаты проведенных нами анализов на наличие подвижных форм металлов приведены в табл. 1.

Так как прилегающая к отвалу территория используется в сельскохозяйственных целях и была засеяна в период проведения исследований озимой пшеницей, то следующим этапом работы стало изучение содержания тяжелых металлов в пробах озимых. Результаты спектрального анализа приведены в табл. 2.

Таким образом, анализ концентраций тяжелых металлов в зерновой культуре, отобранной в непосредственной близости от отвала,

ТАБЛИЦА 1. Результаты анализа проб почвы на наличие подвижных форм тяжелых металлов

Элемент	Содержание, мг/кг	$ПДК_{пр}$, мг/кг
Zn	24	23
Cu	2,9	3
Cr	7	6
Pb	0,5–0,6	2

ТАБЛИЦА 2. Результаты спектрального анализа проб озимой пшеницы

Элемент	Содержание, мг/кг	$ПДК_{пр}$ (зерновые культуры), мг/кг
Zn	26	50
Cu	15	10
Cr	0,7	0,2
Pb	0,5	0,5

показал повышение $ПДК_{пр}$ таких тяжелых металлов как Cr и Cu. Концентрация Pb колеблется на грани допустимой.

В результате проведенных анализов был установлен тип экологической ситуации по содержанию тяжелых металлов в пробах озимых (табл. 3). Полученные данные показывают, что химические и биохимические процессы окисления сульфидов в отвальной породе приводят к интенсивной миграции тяжелых металлов на прилегающие к отвалам территории и в результате к загрязнению окружающей среды.

Учитывая все факторы негативного влияния на окружающую среду складируемых отходов добычи угля, становится актуальным вопрос их экологически безопасной переработки. Одним из таких направлений, по нашему мнению, является биохимическое выщелачивание металлов из породных отвалов при помощи выделяющейся в результате жизнедеятельности бактерий *Th. ferrooxidans* серной кислоты. Концентрация образованных растворов кислоты может быть разнообразная – от слабых растворов до концентрированных. Она зависит от количества сульфидной серы в составе минералов породы, количества влаги в поровых растворах, скорости выщелачивания, времени года и жизнедеятельности бактерий (на стадии биохимического выщелачивания). Растворы серной кислоты даже небольших концентраций способны выщелачивать металлы из минералов и служить оптимальным фактором для развития бактерий.

ТАБЛИЦА 3. Оценка экологической ситуации по загрязнению озимых тяжелыми металлами

Элемент	Отношение фактического содержания к ПДК зерновых культур	Экологическая ситуация
Cu	1,5	Предкризисная
Pb	1	Предкризисная/удовлетворительная
Mn	0,3	Благополучная
Ni	0,6	Удовлетворительная
Zn	0,5	Благополучная
Cr	3,5	Кризисная
Mo	0,4	Благополучная

ТАБЛИЦА 4. Валовое содержание оксида алюминия в исследуемых образцах отвальной породы

Отвальная порода	Содержание Al_2O_3, %
Сильнометаморфизованная (г. Свердловск)	20,87
Сильнометаморфизованная (г. Антрацит)	19,80
Среднеметаморфизированная (г. Луганск)	13,79
Слабометаморфизированная (г. Лисичанск)	18,30

Согласно проведенным нами исследованиям и данным донецких ученых [12, 17], в отвальной породе преобладают оксиды кремния, железа и алюминия. Результаты анализа на содержание оксида алюминия в пробах отвальной породы четырех типичных породных отвалов Луганщины разной степени метаморфизма представлены в табл. 4.

Они показывают, что отвальную породу угольных шахт можно рассматривать как бедное алюминиевое сырье. Для получения алюминия можно использовать способ кучного выщелачивания, используя естественные биохимические процессы образования серной кислоты бактериями *Th. ferrooxidans*, которая активно взаимодействует с карбонатами кальция и ускоряет при повышенных температурах гидролиз полевых шпатов. Гидролиз полевых шпатов в породе сопровождается появлением каолина $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$. Так как реакции биохимического и химического образования серной кислоты являются экзотермическими, каолин превращается в метакаолин и под действием кислоты алюминий переходит в свободную ионную форму (сульфатные растворы металла). Из сульфатных растворов металл можно извлекать известными в биотехнологии выщелачивания металлов методами (осаждения, сорбции, экстракции и т. п.).

Эти факторы, по нашему убеждению, обосновывают необходимость и возможность переработки породных отвалов угольных шахт Луганщины для получения металлов, как основного способа уменьшения их негативного влияния на окружающую среду и рационального использования природных ресурсов.

Таким образом, анализ результатов эколого-геохимических исследований возможности переработки породных отвалов угольных шахт Луганщины позволяет прийти к следующим выводам:

1) основной причиной негативного влияния породных отвалов угольных шахт на окружающую среду выступают процессы химического и биохимического окисления сульфидов, протекающие в складированной отвальной породе, в результате чего естественным путем образуется серная кислота, которая интенсивно разлагает минералы угленосных пород, загрязняя прилегающие к отвалам территории тяжелыми металлами;

2) улучшение экологического состояния территорий с наличием крупнотоннажных отходов угольной промышленности – породных отвалов – может быть достигнуто обоснованием особенностей экологически безопасной их переработки, а именно использования отвальной породы как сырья для биохимического выщелачивания металлов. Отвальная порода угольных шахт может быть отнесена к техногенному промышленному сырью – бедным алюминиевым рудам и применена для биохимического выщелачивания алюминия серной кислотой, образованной в поровых растворах отвальной породы в результате деятельности микроорганизмов, которые используют для своей жизнедеятельности энергию от окисления сульфидов и серы;

3) экологичность и экономичность процесса биохимического выщелачивания обеспечиваются тем, что основной реагент – серная кислота – возникает естественным путем, и процесс не нуждается в дополнительных технологических единицах для производства кислоты. Переработка отвальной породы может проводиться на территории закрытых шахт.

Транспортные расходы ограничиваются угледобывающим регионом, что также значительно удешевит процесс.

Библиографический список

1. Бурлака В. И. Шахты и экология / В. И. Бурлака // Топливно-энергетический комплекс. – 2006. – № 7. – С. 11–13.

2. Стариков А. В. Комплексное освоение угольных месторождений / А. В. Стариков ; отв. ред. Е. И. Панфилов ; Ин-т проблем комплексного освоения недр АН СССР. – М. : Наука, 1990. – 183 с.

3. Уваров Д. Р. Исследование возможностей производства глинозема из техногенных материалов / Д. Р. Уваров, М. И. Биломеря // Сб. материалов конференции «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» : в 2 т. – Донецк : Изд-во ДонНТУ, 2005. – Т. 1. – С. 95–96.

4. Бект О. И. Геолого-промышленная оценка техногенных образований в качестве строительного сырья / О. И. Бект, В. К. Яцун // Строительные материалы и конструкции. – 1991. – № 10. – С. 24–25.

5. Баталин Б. С. Строительная керамика из терриконików Кизеловского угольного бассейна / Б. С. Баталин, Т. А. Белозерова, М. Ф. Гайдай // Стекло и керамика. – 2014. – № 3. – С. 8–10.

6. Олейник Н. В. Агроэкологическое обоснование способа восстановления нарушенных земель в угледобывающих регионах / Н. В. Олейник // Вестн. Полтавск. гос. аграрн. академии (ПГАА). – 2010. – № 4 (59). – С. 196–199.

7. Зубова Л. Г. Использование породы угольных шахт Донбасса для получения висмута и железа / Л. Г. Зубова, Н. В. Олейник // Уголь Украины (Киев). – 2010. – № 11. – С. 39–41.

8. Zubova L. G. Wood recycling of the coal mine's reclaimed banks plantation / L. G. Zubova, A. V. Kharlamova // Сб. материалов Междунар. конференции «Инженерная биология в современном мире». – Майкоп : Изд-во Майкоп. ГТУ, 2010. – С. 238–242.

9. Vaisman Ia. I. Development of the technology for conservation of spoil heaps in order to reduce its negative impact on the environment and preserve resource potential / Ia. I. Vaisman, M. F. Gaidai//Bulletin of PNRPU. – Geology. – Oil & Gas Engineering & Mining. – 2016. – Vol. 15, N 19. – P. 175–184.

10. Луганщина – край нашей любви и надежды. По материалам годового отчета состояния окружающей среды в Луганской области в 2011 году / под ред. А. О. Арапова. – Луганск : ФЛП И. Б. Малыхина, 2012. – 187 с.

11. Пашковский П. С. Исследование вредных выбросов породных отвалов и разработка их научно-технических нормативов / П. С. Пашковский, С. П. Греков, И. Н. Зинченко, О. П. Пашковский // Вісті Донецького гірничого інституту : Всеукраїнськ. наук.-техніч. журн. гірничого профілю. – Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – № 2. – С. 122–130.

12. Зборщик М. П. Природа опасных и экологически вредных проявлений в пиритсодержащих породах / М. П. Зборщик, В. В. Осокин // Уголь Украины (Киев). – 1998. – № 5. – С. 26–27.

13. Зборщик М. П. Предотвращение экологически вредных проявлений в породах угольных месторождений / М. П. Зборщик, В. В. Осокин. – Донецк : ДонГТУ, 1996. – 178 с.

14. Панов Б. С. Модель самовозгорания породных отвалов угольных шахт Донбасса / Б. С. Панов, Ю. А. Проскурня // Геология угольных месторождений : Межвуз. науч. темат. сб. – Екатеринбург : Донецк. нац. техн. ун-т, 2002. – С. 274–281.

15. Рабочий проект «Увеличение емкости породного отвала ШУ "Луганское" за счет прирезки территории» : в 2 т. – Луганск : Гос. предприятие «Луганскуголь», 1996. – Т. 1 : Пояснит. зап. РП 1342-1-ПЗ. – Арх. № 50019. – 32 с.

16. Никовская Г. Н. Некоторые коллоидно-химические аспекты биотрансформации комплексов тяжелых металлов / Г. Н. Никовская, З. Р. Ульберг, Л. А. Коваль, Л. Г. Надел // Коллоид. журн. – 2002. – Т. 64, № 4. – С. 518–523.

17. Верех-Белоусова Е. И. Использование отходов угольной промышленности как источников алюминиевого сырья / Е. И. Верех-Белоусова // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2011. – № 3. – С. 79–80.

References

1. Burlak V. I. Shakhty i ekologiya [Mines and ecology]. *Toplivno-energeticheskiy kompleks* [*Fuel and energy complex*], 2006, no. 7, pp. 11–13. (In Russian)

2. Starikov A. V. *Kompleksnoye osvoyeniye ugolnykh mestorozhdeniy* [*Integrated development of coal deposits*]. Ed. in chief E. I. Panfilov; Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS USSR. Moscow, Nauka Publ., 1990, 183 p. (In Russian)

3. Uvarov D. R. & Bilomerya M. I. Issledovaniye vozmozhnostey proizvodstva glinozema iz tekhnogennykh materialov [The study of alumina producibility from by-products]. *Sb. materialov konferentsii "Okhrana okruzhayushchey sredy i ratsionalnoye ispolzovaniye prirodnykh resursov"* [*Conference coll. of writings: "Environmental protection and conservation of nature"*]. In 2 vol. Donetsk, DonNTU Publ., 2005, vol. 1, pp. 95–96. (In Russian)

4. Bekt O. I. & Yatsun V. K. Geologo-promyshlennaya otsenka tekhnogennykh obrazovaniy v kachestve stroitelnogo syriya [Geological and commercial value of man-made mineral formations functioning as construction raw materials]. *Stroitelniye materialy i konstruktsii* [*Building materials and constructions*], 1991, no. 10, pp. 24–25. (In Russian)

5. Batalyn B. S., Belozerova T. A. & Gaiday M. F. Stroitelnaya keramika iz terrikonikov Kizelovskogo ugolnogo basseina [Ceramics made from pit refuse heap of Kizelovsky coal-mining field]. *Steklo i keramika* [*Glass and ceramics*], 2014, no. 3, pp. 8–10. (In Russian)

6. Oleynik N. V. Agroekologicheskoye obosnovaniye sposoba vosstanovleniya narushennykh zemel v ugledobyvayushchykh regionakh [Agro-ecological grounding of the disturbed land restoring method in coal-mining regions]. *Vestnik Poltavskoy gos. agrarn. akademii* [*Bulletin of Poltava State Academy of Agriculture*], 2010, no. 4 (59), pp. 196–199. (In Russian)

7. Zubova L. G. & Oleynik N. V. Ispolzovaniye porody ugolnykh shakht Donbassa dlya polucheniya vismuta i zheleza [The use of rock obtained in Donbass coalmines for obtaining bismuth and iron]. *Ugol Ukrainy* [*Ukraine's Coal*] (Kiev), 2010, no. 11, pp. 39–41. (In Russian)

8. Zubova L. G. & Kharlamova A. V. Wood recycling of the coal mine's reclaimed banks plantation. *Sb. materialov mezhdunarodnoy konferentsii "Inzhenernaya biologiya v sovremennom mire"* [*Coll. papers of the International conference "Engineering biology in the modern world"*]. Maikop, State University of Technology Publ., 2010, pp. 238–242. (In Russian)

9. Vaisman Ia. I. & Gaidai M. F. Development of the technology for conservation of spoil heaps in order to reduce its negative impact on the environment and preserve resource potential. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol. 15, no. 19, pp. 175–184.

10. *Luganshchina – krai nashey lyubvi i nadezhdy. Po materialam govogo otcheta sostoyaniya okruzhayushchey sredy v Luganskoy oblasty v 2011 godu* [*Luganshchina – the land of our love and hope. Adapted from the annual report on environmental state in Luhansk province in 2011*]. Ed. by A. O. Arapov. Lugansk, FLP I. B. Malykhina Publ., 2012, 187 p. (In Russian)

11. Pashkovskiy P. S., Grekov S. P., Zinchenko I. N. & Pashkovskiy O. P. Issledovaniye vrednykh vybrosov porodnykh otvalov i razrabotka ikh nauchno-tekhnicheskykh normativov [The study of hazardous emissions of waste dump and the development of its research and engineering standards]. *Vesty Donetskogo gornogo instituta. Vseukrainskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal gornogo profilya* [*Proceedings of Donetsk Mining Institute. All-Ukranian scientific and technical mining journal*]. Donetsk, State Institution of Higher Education "DonNTU" Publ., 2008, no. 2, pp. 122–130. (In Russian)

12. Zborshchik M. P. & Osokin V. V. Priroda opasnykh i ekologichesky vrednykh proyavleniy v piritcoderzhashchykh porodakh [The nature of hazardous and ecologically destructive effects in pyritic rock]. *Ugol Ukrainy* [*Ukraine's Coal*] (Kiev), 1998, no. 5, pp. 26–27. (In Ukrainan)

13. Zborshchik M. P. & Osokin V. V. *Predotvrashcheniye ekologicheski vrednykh proyavleniy v porodakh ugolnykh mestorozhdeniy* [*Prevention of ecologically destructive effects in rock at coal deposits*]. Donetsk, DonGTU Publ., 1996, 178 p. (In Russian)

14. Panov B. S. & Proskurnya Y. A. Model samovyzgoraniya porodnykh otvalov ugolnykh shakht Donbassa [Spontaneous firing model of rock dump at Donbass coal deposits]. *Geologiya ugolnykh mestorozhdeniy:* mezhvuz. nauch.-temat. sb. [*Geology of coal deposits:* interuniversity collection of research related works]. Yekaterinburg, Donetsk National Technical University Publ., 2002, pp. 274–281. (In Russian)

15. *Rabochiy proekt "Uvelichen iye yemkosty porodnogo otvala ShU "Luganskoye" za schet prirezky*

territorii" [*Execution plan "Capacity increase of rock dump at "Luganskoye" ShU (mine office) by means of the territory cutback"*]. In 2 vol. Lugansk, State-run enterprise "Luganskugol" Publ., 1996, vol. 1: Explanatory note RP 1342–1-PZ. Arch. no. 50019, 32 p. (In Russian)

16. Nikovskaya G. N., Ulberg Z. R., Koval L. A. & Nadel L. G. Nekotoriye kolloidno-khimicheskiye aspekty biotransformatsii kompleksov tyazhelykh metallov [Some colloid-chemical aspects of biotransformation of heavy metal complexes]. *Kolloid. zhurn.* [*Colloid journal*], 2002, vol. 64, no. 4, pp. 518–523. (In Russian)

17. Verekh-Belousova E. I. Ispolzovaniye otkhodov ugolnoy promyshlennosty kak istochnikov alyuminiyevogo syriya [The use of coal refuse as the sources of aluminum raw materials]. *Energotekhnologii i resursosberezheniye* [*Energy technology and resource-saving*], 2011, no. 3, pp. 79–80. (In Russian)

*ВЕРЕХ-БЕЛОУСОВА Екатерина Иосифовна – канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой, kate3152@yandex.ru (Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко); ТИТОВА Тамила Семеновна – д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой, проректор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004.056.2

С. В. Клименко, В. В. Яковлев, Е. А. Благовещенская

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИЙ АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЬНОЙ СУММЫ CRC32

Дата поступления: 23.04.2018
Решение о публикации: 28.05.2018

Аннотация

Цель: Дать сравнительную оценку основных способов формирования контрольной суммы (CRC кода) на основе прямого, табличного и матричного алгоритмов. **Методы:** Алгоритмы сравнивались с помощью математических методов, для достижения результата использовано программное обеспечение Java Development Kit версии 1.8 и среда разработки NetBeans IDE 8.2. **Результаты:** Подробно описаны способы формирования контрольных сумм при помощи алгоритмов. Для каждого рассматриваемого способа приведены временные характеристики их работы. Проведено сравнение анализируемых способов. **Практическая значимость:** По полученным результатам эксперимента сделан вывод, какой способ оптимален для формирования контрольных сумм.

Ключевые слова: CRC код, контрольная сумма, порождающий полином, обнаружение ошибок, алгоритмы.

***Sergey V. Klimenko,** postgraduate student, s.klimenko@live.ru; **Valentin V. Yakovlev,** D. Eng. Sci., professor, jakovlev@pgups.ru; **Yekaterina A. Blagoveshchenskaya,** D. Phys. and Math. Sci., professor, head of chair, vmkaf@pgups.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) THE STUDY OF IMPLEMENTATIONS OF CRC32 ALGORITHMS

Summary

Objective: To give comparative assessment of the basic ways of generating a checksum (CRC code) based on direct, table and matrix algorithms. **Methods:** Algorithms were compared by means of mathematical methods. In order to achieve the result Java Development Kit software version 1.8 and NetBeans IDE 8.2 development environment were used. **Results:** The methods of generating checksums by means of algorithms were described in detail. For each method under consideration, the time characteristics of their work were given. The comparison of the analyzed methods was conducted. **Practical importance:** Based on the results of the experiment, it was concluded which method was optimal for the generation of checksums.

Keywords: CRC code, checksum, generating polynomial, error detection, algorithms.

Введение

Методы обнаружения ошибок предназначены для выявления искажений в сообщениях при их передаче по зашумленным каналам. Для этого передающее устройство вычисляет некоторое число, называемое контрольной суммой и являющееся функцией сообщения, и добавляет его к этому сообщению. Приемное устройство, используя тот же самый алгоритм, рассчитывает контрольную сумму принятого сообщения и сравнивает ее с переданным значением [1].

Под контрольной суммой CRC (Cyclic Redundancy Check) понимается некоторое значение, рассчитанное по набору данных путем применения математических алгоритмов, обеспечивающих устойчивость к хэш-коллизиям

[2]. Под хэш-коллизией понимается равенство контрольных сумм для различных входных данных. Контрольные суммы широко применяются для осуществления контроля правильности хранимой и передаваемой информации.

Логической предпосылкой использования контрольной суммы этого типа явилось то, что размер контрольной суммы значительно меньше формата преобразуемых чисел/сообщений, следовательно, вероятность искажения контрольной суммы (при передаче информации по какому-либо каналу или при ее хранении на носителе) значительно ниже вероятности искажения массива информации.

Циклические избыточные коды (CRC) являются подклассом блочных кодов и применяются в протоколах HDLC, Token Ring, Token Bus, в семействах протоколов Ethernet и других протоколах канального уровня. Популярность CRC-кодов обусловлена тем, что процедуры кодирования и декодирования достаточно просты и не требуют больших вычислительных ресурсов.

Алгоритм CRC базируется на свойствах деления с остатком двоичных полиномов, таким образом, значение CRC – остаток от деления полинома, соответствующего входным данным, на некий фиксированный порождающий (генераторный) полином [1].

К важнейшим задачам построения CRC-кодов относится выбор порождающего полинома. Существует множество стандартизованных и рекомендованных разными организациями порождающих полиномов, используемых для генерации CRC. Например, порождающий полином CRC32 по стандарту IEEE 802.3 выглядит так:

$$x^{32}+x^{26}+x^{23}+x^{22}+x^{16}+x^{12}+x^{11}+x^{10}+$$
$$+x^8+x^7+x^5+x^4+x^2+x+1=$$
$$=0x04C11DB7$$
(в шестнадцатеричном виде),
$$=10011000001000111011011 0111$$
(в двоичном виде).

Одним из основных условий для выбора полинома является то, что коэффициенты в старшем и младшем битах были равны единице.

Математическая модель нахождения контрольной суммы может быть записана следующим образом:

$$R(x) = P(x)\cdot x^N \bmod G(x), \qquad (1)$$

где $R(x)$ – полином, представляющий значение CRC; $P(x)$ – полином, коэффициенты которого представляют входные данные; $G(x)$ – порождающий полином; N – степень порождающего полинома ($1 \le N \le 256$).

Таким образом, вычисление CRC возможно реализовать на базе любого языка программирования за счет использования операций XOR (логическая операция «сложение по модулю два») и SHL (логическая операция «сдвиг влево»), поскольку они встроены практически в любой язык программирования [3, 4].

Вероятность того, что искажение передаваемого сообщения в нескольких позициях будет таковым, что итоговая контрольная сумма не изменится, определяется по формуле [5–8]

$$P = \frac{1}{2^N}. \qquad (2)$$

Краткое описание алгоритмов подсчета CRC

Прямой алгоритм вычисления CRC определяет контрольную CRC побитно [9], его можно описать следующим образом в соответствии с (1):

1) дополнить исходное сообщение нулями для выравнивания (количество нулей обусловливается степенью порождающего полинома). $P(x)' = P(x)000\ldots N$;

2) выполнять операцию сдвига влево последовательности бит сообщения $P(x)'$ до тех пор, пока бит в ячейке не станет равным единице или количество бит станет меньше, чем в делителе;

3) если старший бит станет равным единице, то производим операцию XOR между

сообщением и порождающим полиномом и повторяем шаг 2;

4) конечный остаток от последовательности $P(x)'$ является CRC-остатком.

В приведенном описании $G(x)$ – полином, N – степень полинома, $P(x)$ – исходное сообщение, а $P(x)'$ – дополненное исходное сообщение.

Необходимость выполнения множества итераций при генерации контрольной суммы CRC приводит к значительным временным затратам.

Табличный алгоритм вычисления CRC используется для ускорения расчета контрольной суммы CRC.

Ускорение осуществляется за счет замены восьми операций сдвига одной операцией поиска по таблице, которая содержит 256 значений. Поэтому при расчете контрольной суммы CRC выполняется цикл по 256 значениям.

Предпосылкой появления таблицы явилось то, что при выполнении операции XOR содержимого с постоянной величиной при различных ее сдвигах всегда будет существовать некоторое значение, которое при применении операции XOR с исходным содержимым даст тот же самый результат. Следовательно, можно составить таблицу таких величин, где индексом является исходное содержимое [1].

Алгоритм составления таблицы:

1) вычислить значение в таблице для каждого байта от 0x00 до 0xff:

а) выполнять 8 раз операцию «сдвиг вправо», причем, если младший бит равен 1, то выполняется операция XOR с полиномом G;

б) все что осталось от двух байт, становится значением в таблице.

Алгоритм вычисления контрольной суммы CRC по таблице:

1) просматривается каждый байт сообщения $P(x)$:

а) над младшим байтом текущего значения CRC и текущим байтом сообщения проводится операция XOR – это индекс в таблице;

б) старший байт текущего значения CRC сдвигается вправо на 8 и становится младшим, затем объединяется по XOR со значением таблицы – это будет новое значение CRC;

2) в результате получено значение CRC.

Матричный алгоритм вычисления CRC используется для расчета контрольной суммы и похож на табличный, за исключением того, что вместо таблицы применяется операция умножения вектора (выдвинутый байт) на матрицу.

Основным преимуществом матричного алгоритма над табличным является размер памяти, требуемый для хранения таблицы. Так, для реализации табличного алгоритма требуется 1 Кб (256 элементов по 4 байта каждый) памяти на хранение таблицы, в то время как для матричного алгоритма – всего 32 байта (8 элементов по 4 байта каждый) [10].

Оценка временной эффективности

Чтобы сопоставить рассматриваемые способы генерации CRC по производительности в одинаковых условиях, было написано приложение на языке высокого уровня Java, позволяющее получить статистику по каждому из способов с производящим полиномом $0xEDB88320$. Статистика показывает зависимость времени их выполнения от размера исходной строки (сообщения).

Для написания приложения использованы программное обеспечение Java Development Kit версии 1.8 и среда разработки NetBeans IDE 8.2. Эксперимент проводился с помощью следующих аппаратных и программных ресурсов:

1) операционная система Windows 10 (64-разрядная);

2) двуядерный процессор Intel Core i7-7600U с тактовой частотой 2,8 Ггц;

3) 16 Гб оперативной памяти;

4) диск объемом 512 Гб.

Приложение генерирует строки (сообщения) случайным образом заданного размера на основе символов: «A»–«Z», «a»–«z», «0»–«9» и пунктуационных знаков, после чего для по-

лученной строки строится контрольная сумма по описанным ранее способам. Например, случайно сгенерированная строка, состоящая 12 символов, может выглядеть таким образом:

O h 3Tj + J71L.

Для определения времени работы алгоритмов применялся статический метод nanoTime() класса System пакета java.lang, который возвращает текущее значение времени. Таким образом, можно посчитать время работы всего приложения или отдельного его фрагмента (рис. 1). В рассматриваемом случае использовались возможность данного метода и замер времени работы отдельного фрагмента (метода) приложения, определяемого видом алгоритма.

Анализ проводился для случайно сгенерированных строк следующих размеров (h, в Мб): 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 и 128.

Для вычисления среднеарифметического значения времени подсчета контрольной суммы использовалась формула

$$\overline{t} = \frac{1}{P} \cdot \sum_{i=1}^{P} t_i , \qquad (3)$$

в которой t_i – время подсчета i-й контрольной суммы; P – общее количество.

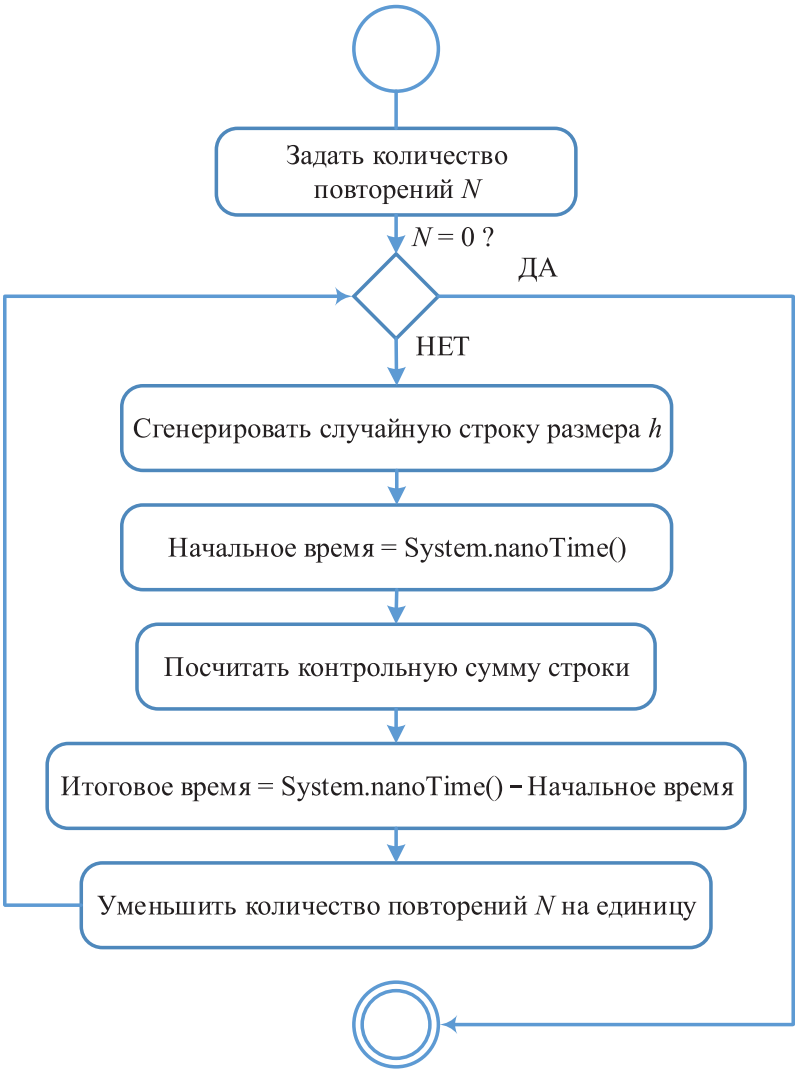


Рис. 1. Блок-схема – структура теста

Среднеквадратичное отклонение рассчитывалось следующим образом:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{P}\cdot\sum_{i=1}^{P}(t_i - \overline{t})}\,, \qquad (4)$$

где $\overline{t}$ – среднеарифметическое значение.

Результаты вычислений по формулам (1)–(4) представлены в таблице.

Заключение

В статье рассмотрены прямой, табличный и матричный алгоритмы вычисления контрольной суммы CRC32. Проведено сравнение по времени работы (рис. 2).

В результате установлено, что табличный алгоритм является оптимальным по скорости вычисления контрольной суммы CRC32. Ускорение в нем по сравнению с прямым алгоритмом было достигнуто путем замены восьми операций сдвига одной операцией поиска по таблице, которая содержит 256 значений. Стоит также отметить, что если речь идет о микроконтроллерах, то использование матричного алгоритма может быть обусловлено значительной экономией памяти по сравнению с табличным алгоритмом.

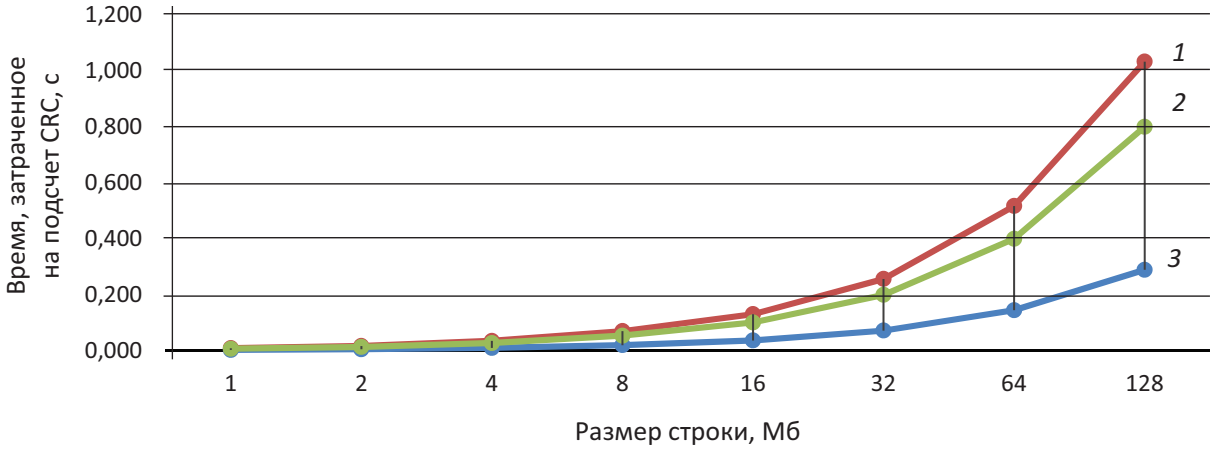


Рис. 2. Зависимость времени работы прямого (*1*), матричного (*2*) и табличного (*3*) алгоритмов вычисления CRC от размера строки

Зависимость времени работы алгоритмов вычисления CRC от размера строки

h, Мб	Табличный алгоритм		Прямой алгоритм		Матричный алгоритм	
	$\overline{t}$, с	σ, с	$\overline{t}$, с	σ, с	$\overline{t}$, с	σ, с
1	0,0024	0,0008	0,0085	0,0019	0,0065	0,0013
2	0,0046	0,0007	0,0165	0,0021	0,0128	0,0017
4	0,0094	0,0011	0,0346	0,005	0,0268	0,0037
8	0,0193	0,0046	0,0697	0,0134	0,0534	0,0101
16	0,0361	0,0041	0,1302	0,0158	0,1005	0,0121
32	0,0716	0,0031	0,2564	0,0142	0,1993	0,01
64	0,1446	0,0056	0,5171	0,0234	0,3998	0,0164
128	0,2891	0,0187	1,0337	0,0668	0,8006	0,0385

Библиографический список

1. Ross N. W. A Painless guide to CRC error detection algorithms / N. W. Ross. – 16 Lerwick Avenue, Hazelwood Park, 5066. – Australia, 1993. – URL : http://www.ross.net/crc/download/crc_v3.txt (дата обращения : 01.04.2018).

2. Мыцко Е. А. Особенности программной реализации вычисления контрольной суммы CRC32 на примере PKZIP, WINZIP, ETHERNET / Е. А. Мыцко, А. Н. Мальчуков // Вестн. науки Сибири. – 2011. – № 1 (1). – С. 279–282.

3. Мальчуков А. Н. Быстродействующие алгоритмы вычисления контрольной суммы на примере CRC8 / А. Н. Мальчуков, А. Н. Осокин // Молодежь и современные информационные технологии : сб. трудов VIII Всерос. науч.-практич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 3–5 марта 2010 г. – Томск : СПБ Графикс, 2010. – С. 34–35.

4. Буркатовская Ю. Б. Быстродействующие алгоритмы деления полиномов в арифметике по модулю два / Ю. Б. Буркатовская, А. Н. Мальчуков, А. Н. Осокин // Изв. Томск. политехн. ун-та. – 2006. – № 1 (309). – С. 19–24.

5. Koopman P. 32-Bit cyclic redundancy codes for internet applications / P. Koopman // Intern. Conference on Dependable Systems and Networks (DSN). – Washington, DC, July, 2002. – P. 459–468.

6. Яковлев В. В. Оценка влияния помех на производительность протоколов канального уровня / В. В. Яковлев, Ф. И. Кушназаров // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 1 (42). – С. 133–138.

7. Halsall F. Data communications, computer networks and open systems / F. Halsall. – Addison-Wesley : Pearson Education, 1996. – 907 p.

8. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб. : Питер, 2008. – 958 с.

9. Темников Ф. Е. Теоретические основы информационной техники : учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. / Ф. Е. Темников, В. А. Афонин, В. И. Дмитриев. – М. : Энергия, 1979. – 512 с.

10. Мальчуков А. Н. Быстрое вычисление контрольной суммы CRC: таблица против матрицы / А. Н. Мальчуков, А. Н. Осокин // Прикладная информатика. – 2010. – № 2 (26). – С. 58–63.

References

1. Ross N. W. *A Painless guide to CRC error detection algorithms.* Australia, 1993. URL: http://www.ross.net/crc/download/crc_v3.txt (accessed: 01.04.2018).

2. Mytsko E. A. & Malchukov A. N. Osobennosti programmnoy realizatsii vychisleniya kontrolnoy summy CRC32 na primere PKZIP, WINZIP, ETHERNET [The specificities of software implementation of CRC32 checksum calculation by the example of PKZIP, WINZIP, ETHERNET]. *Vestnik nauki Sibiri* [*The Siberian Science newsletter*], 2011, no.1 (1), pp. 279–282. (In Russian)

3. Malchukov A. N. & Osokin A. N. Bystrodeistvuyushchiye algoritmy vychisleniya kontrolnoy summy na primere CRC8 [Fast algorithms for calculating the checksum using the example CRC8]. *Molodezh i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii: Sbornik trudov VIII Vseros. nauch.-prakt. konference studentov*, *aspirantov i molodykh uchenykh* [*The youth and modern information technologies: Proceedings of the VIII All-Russian research and training conference of students*, *postgraduates and young scientists*]. Tomsk, March 3–5th, 2010. Tomsk, SPB Grafiks Publ., 2010, pp. 34–35. (In Russian)

4. Burkatovskaya Yu. B., Malchukov A. N. & Osokin A. N. Bystrodeystvuyushchiye algoritmy deleniya polinomov v arifmetike po modulyu dva [Fast-acting algorithms for dividing polynomials in arithmetics modulo two]. *Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta* [*Proceedings of Tomsk Polytechnic University*], 2006, no. 1 (309), pp. 19–24. (In Russian)

5. Koopman P. 32-Bit Cyclic Redundancy Codes for Internet Applications. *Intern. Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)* (Washington, July 2002). Washington, DC, 2002, pp. 459–468.

6. Jakovlev V. V. & Kushnazarov F. I. Otsenka vlijanija pomekh na proizvoditelnost protokolov kanalnogo urovnya [Estimating the impact of interference on the performance of link layer protocols]. *Izvestija Peterburgskogo Universiteta putej soobshchenija* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, issue 1 (42), pp. 133–138. (In Russian)

7. Halsall F. Data communications, computer networks and open systems. Addison-Wesley, Pearson Education Press, 1996, 907 p.

8. Olifer V. G. & Olifer N. A. *Kompjuterniye sety. Printsipy*, *tekhnologii*, *protokoly* [*Computer networks. Principles*, *technologies*, *protocols*]. Saint Petersburg, Peter Publ., 2008, 958 p. (In Russian)

9. Temnikov F. E., Afonin V. A. & Dmitriev V. I. *Teoreticheskie osnovy informatsionnoy tekhniky:* uchebnoye posobiye [*Theoretical basis of information technology*: study guide]. Moscow, Energia Publ, 1979, 512 p. (In Russian)

10. Malchukov A. N. & Osokin A. N. Bystroje vychislenije kontrolnoy summy CRC: tablitsa protiv matritsy [Fast calculation of CRC checksum: table versus matrix]. *Prikladnaja informatika* [*Applied informatics*], 2010, no. 2 (26), pp. 58–63. (In Russian)

*КЛИМЕНКО Сергей Витальевич – аспирант, s.klimenko@live.ru; ЯКОВЛЕВ Валентин Васильевич – д-р техн. наук, профессор, jakovlev@pgups.ru; БЛАГОВЕЩЕНСКАЯ Екатерина Анатольевна – д-р физ.-мат. наук, доцент, vmkaf@pgups.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I)

УДК 656.02

П. К. Рыбин, Н. В. Ершиков, Н. С. Комовкина, Д. В. Путилина

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПОЕЗДОПОТОКОВ И ВАГОНОПОТОКОВ, ПОСТУПАЮЩИХ В АДРЕС РОССИЙСКИХ ПОРТОВ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

Дата поступления: 17.09.2018
Решение о публикации: 03.10.2018

Аннотация

Цель: Исследовать прибывающие и отправляемые поездопотоки с основных припортовых станций (ПС), обслуживающих порты Финского залива: Лужская, Автово и Новый Порт, в период максимальной работы – январь и февраль 2015 и 2016 гг.; проанализировать влияние среднесуточных размеров движения поездов и уровня маршрутизации на потребное путевое развитие и схему ПС. **Методы:** Применялся статистический анализ данных. **Результаты:** Проверена гипотеза о возможности использования γ-распределения для моделирования интервалов прибытия поездов на ПС, а также доказана возможность использования γ-распределения при моделировании интервалов отправления поездов с ПС. **Практическая значимость:** Подтверждены возможность и корректность использования в теоретических расчетах и при построении имитационной модели ПС функции плотности обобщенного γ-распределения, что позволит более достоверно определять ее потребное путевое развитие.

Ключевые слова: Интервалы прибытия и отправления поездов, схема припортовой станции, γ-распределение, доля маршрутизации.

Petr K. Rybin, Cand. Eng. Sci., associated professor, prorector, rybin@pgups.ru; ***Nikolay V. Yershikov,** Cand. Eng. Sci., associated professor, prorector, yorshikov@mail.ru; **Natalya S. Komovkina,** Cand. Eng. Sci., senior lecturer; **Darya V. Putilina,** assistant (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) THE ANALYSIS OF STRUCTURE OF TRAIN AND CAR TRAFFIC VOLUME DESTINED FOR RUSSIAN PORTS OF THE GULF OF FINLAND

Summary

Objective: To study the traffic flows arriving at and departing from the main port stations which service the ports of the Gulf of Finland, including: Luzhskaya, Avtovo and Noviy Port in the period of maximum operation – January and February of 2015 and 2016. To analyze the influence of the daily volume of train traffic and the routing level on the required arrangement of tracks and lay-out of port stations (PS). **Methods:** Statistical data analysis was applied. **Results:** The hypothesis for applicability of γ-distribution for arrival frequency modeling of train arrival at PS was checked. The applicability of γ-distribution for arrival frequency modeling of train departure from PS was proved. **Practical importance:** Applicability and robustness of generalized γ-distribution frequency function in theoretical calculations and in the construction of PS simulation model was justified, making it possible to adequately determine its required arrangement of tracks.

Keywords: Train arrival and departure intervals, lay-out of a port station, γ-distribution, contribution of routing.

Введение

Среди припортовых железнодорожных узлов РФ в настоящее время особый интерес представляет динамично развивающаяся железнодорожная сеть, обслуживающая российские морские порты Финского залива, поскольку в ней в определенной степени про-

слеживаются новые подходы к формированию системы железнодорожного обслуживания припортового региона, имеющего в своем составе мегаполис. По-прежнему в этой системе важную роль играют размеры, структура и интенсивность поступающих и исходящих из припортового железнодорожного узла поездопотоков, с учетом которых устанавливают количество, схемы и потребное путевое развитие припортовых станций (ПС) и их взаимное расположение в припортовом узле. Но, например, при проектировании Усть-Лужского железнодорожного узла учитывалось еще и наличие в порту большого числа собственников грузовых терминалов.

Выполненные на кафедре «Железнодорожные станции и узлы» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС) в 2015 и 2016 гг. исследования входящих и исходящих поездопотоков Санкт-Петербургского и Усть-Лужского припортовых железнодорожных узлов не только подтвердили ранее сделанные выводы о функциях распределения плотности вероятностей интервалов поступления поездов на ПС, изложенные в работах [1, 2], но и дали возможность, применяя эти функции, аппроксимировать эмпирические распределения величин интервалов отправления с ПС, что позволяет использовать такие распределения при имитационном моделировании работы данных станций.

1. Использование γ-распределения при описании интервалов прибытия и отправления поездов на ПС

Количество путей в приемоотправочном парке определяют с учетом времени их занятия поступившим подвижным составом, которое зависит от интенсивности поступления и отправления поездов на ПС и продолжительности выполнения станционных технологических операций.

Очевидно, что количество путей в приемоотправочном парке ПС зависит от соотношений

$$\frac{I_{\text{пр}}}{t^{\text{р}}_{\text{зан}}} \gtrless 1,$$

$$\frac{I_{\text{от}}}{t^{\text{ф}}_{\text{зан}}} \gtrless 1,$$

где $I_{\text{пр}}$, $I_{\text{от}}$ – интервалы прибытия и отправления поездов с ПС соответственно; $t^{\text{р}}_{\text{зан}}$, $t^{\text{ф}}_{\text{зан}}$ – время занятия приемоотправочного пути одним поездом, прибывшим на ПС в расформирование, и своего формирования соответственно.

Расчетное время занятия приемоотправочного пути одним поездом, прибывшим на ПС в расформирование [3], определяется по формуле

$$t^{\text{р}}_{\text{зан}} = t_{\text{пр}} + t'_{\text{ож}} + t^{\text{р}}_{\text{оп}} + t''_{\text{ож}} + t_{\text{уб}},$$

в которой $t_{\text{пр}}$ – время занятия маршрута при приеме на станцию, мин; $t'_{\text{ож}}$ – среднее время ожидания начала выполнения операций по прибытию поезда на станцию, мин; $t^{\text{р}}_{\text{оп}}$ – время выполнения операций по прибытию согласно технологическому процессу, мин; $t''_{\text{ож}}$ – среднее время ожидания вывода состава с пути прибытия на вытяжной путь для расформирования, мин; $t_{\text{уб}}$ – время занятия пути приемоотправочного парка при уборке состава на вытяжной путь для расформирования, мин.

Время ожидания начала выполнения операций по прибытию поезда на станцию должно быть минимальным, чего можно достичь, ускорив время выполнения операций по прибытию путем совершенствования технологии выполнения этих операций.

Время ожидания вывода состава с пути прибытия на вытяжной путь для расформирования [4]

$$t''_{\text{ож}} = \frac{12\rho^2_{\text{л}}(\gamma^2_{\text{пр}} + \gamma^2_{\text{р}})}{N_{\text{п}}(1-\rho_{\text{л}})},$$

здесь $\rho_{\text{л}}$ – степень загрузки маневрового локомотива по расформированию–формированию передач; $\gamma_{\text{пр}}$, $\gamma_{\text{р}}$ – коэффициент вариации соответственно интервалов прибытия поездов

и времени их расформирования; $N_{п}$ – число поездов, прибывающих на станцию.

Расчетное время занятия приемоотправочного пути одним поездом своего формирования [3] составляет

$$t^{ф}_{зан} = t_{под} + t'_{ож} + t^{ф}_{оп} + t'_{ож} + t_{от},$$

где $t_{под}$ – время занятия пути подачей сформированного состава с вытяжного пути на путь приемоотправочного парка, мин; $t'_{ож}$ – среднее время ожидания начала выполнения операций по отправлению поезда со станции, мин; $t^{ф}_{оп}$ – время выполнения операций по отправлению согласно технологическому процессу, мин; $t''_{ож}$ – среднее время ожидания «нитки графика», мин; $t_{от}$ – время занятия маршрута при отправлении поезда от момента приготовления до момента освобождения маршрута, мин.

Время ожидания отправления поезда с ПС [4] находим следующим образом:

$$t''_{ож} = \frac{12\rho^2_{вых}(\gamma^2_{вх} + \gamma^2_{об})}{N_0(1-\rho_{вых})},$$

здесь $\rho_{вых}$ – уровень загрузки выходного участка; $\gamma_{вх}$, $\gamma_{об}$ – коэффициент вариации соответственно интервалов отправления поездов и времени обработки поездов по отправлению в парке; N_0 – число поездов, отправляющихся со станции.

Таким образом, очевидно, что интервалы прибытия и отправления поездов с ПС влияют на продолжительность занятия приемоотправочных путей и соответственно на число путей в парке:

$$m_{по} = \frac{(N_{пр}t^{р}_{зан} + N_{от}t^{ф}_{зан})(1+\beta_{п})}{24 - \sum T_{пост}},$$

где $\beta_{п}$ – коэффициент, учитывающий отказы устройств; $\sum T_{пост}$ – время занятия пути постоянными операциями, не зависящими от размеров движения, мин.

В качестве одной из характеристик входящих и исходящих поездопотоков были выбраны средние интервалы прибытия и отправления поездов с ПС (табл. 1).

Следовательно, моделируя работу ПС в различных режимах поступления и отправления поездов, появляется возможность определить ее потребное путевое развитие с учетом перспектив увеличения размеров работы.

Внешний вид гистограммы эмпирического и теоретического распределений интервалов прибытия и отправления поездов на рассматриваемые ПС, представленных на рис. 1 и 2, позволяет выдвинуть предположение о допустимости в теоретических расчетах и при построении имитационной модели использования функции γ-распределения.

Функция плотности γ-распределения имеет вид [5]

$$f_{\gamma}(x) = \frac{1}{\Gamma(r)} x^{r-1}\lambda^{r} \exp(-\lambda \cdot x),$$

где r и λ – параметры распределения, которые определяются по методу моментов:

$$r = \frac{m_1^2}{m_2 - m_1^2},$$

ТАБЛИЦА 1. Среднесуточные интервалы прибытия поездов на ПС

Станция	Средний интервал прибытия поездов на станцию	Средний интервал отправления поездов со станции
Лужская	40 мин	38 мин
Автово	1 ч 16 мин	1 ч 16 мин
Новый Порт	3 ч 24 мин	2 ч 58 мин

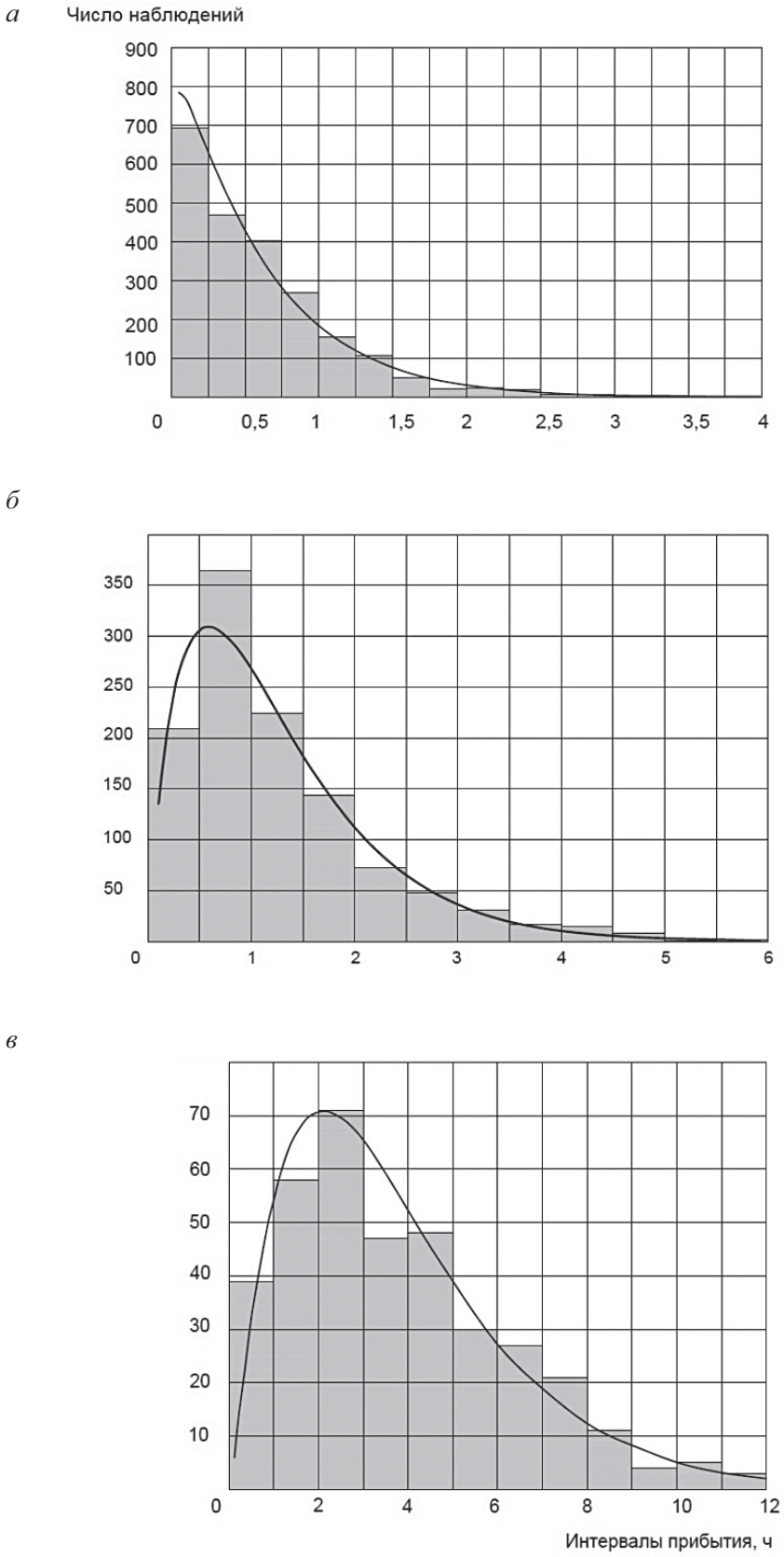


Рис. 1. Сравнение теоретического и эмпирического распределений величин интервалов поступления поездов на ПС Лужская (*а*), Автово (*б*) и Новый Порт (*в*)

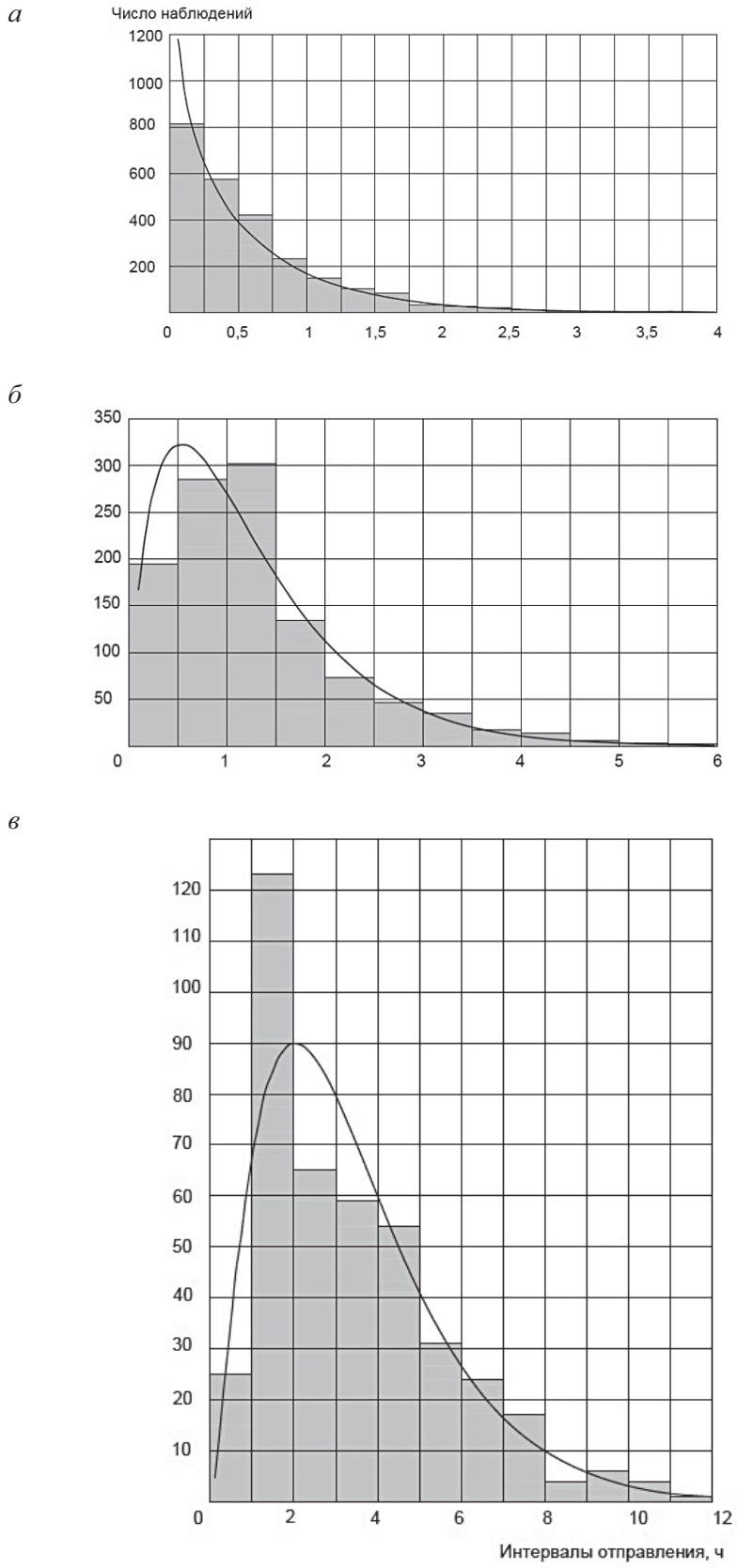


Рис. 2. Сравнение теоретического и эмпирического распределений величин интервалов отправления поездов с ПС Лужская (*а*), Автово (*б*) и Новый Порт (*в*)

$$\lambda = \frac{r}{m_1},$$

здесь $m_{1,2}$ – точечные оценки начальных моментов, определяемые по формуле

$$m_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_k^i.$$

Количество интервалов на числовой оси, на которые разбивается выборка, устанавливается на основе расчетов следующим образом:

$$m = \sqrt[3]{n}.$$

Гипотеза о законе распределения принимается с доверительной вероятностью $P_0 = 0{,}95$, если выполняется неравенство

$$x^2 < x_{P_0}^2(q),$$

в котором $x_{P_0}^2(q)$ – критическое значение x^2 с q степенями свободы по уровню $P_{0.}$

Эмпирическое значение x^2 находится по уравнению

$$x^2 = \sum_{i=1}^{m} \frac{(f_i - h_i)}{h_i},$$

где f_i и h_i – соответственно эмпирическое и теоретическое число наблюдений, приходящееся на каждый интервал.

Результаты расчетов с использованием критерия согласия Пирсона приведены в табл. 2.

На основании произведенных расчетов можно сделать вывод, что функцию плотности обобщенного γ-распределения можно использовать для описания распределения интервалов прибытия и отправления поездов с ПС с доверительной вероятностью $P_0 = 0{,}95$.

Для каждой ПС присущи свои параметры распределения интервалов прибытия и отправления, которые частично коррелируются между собой. Кроме того, установлено, что причинами того, что количество прибывших поездов меньше, чем отправленных с ПС за рассматриваемый период, являются более высокая доля маршрутизации и средняя величина составов по прибытию, чем по отправлению.

2. Оценка размеров поездопотоков и доли их маршрутизации

Действующие Правила и технические нормы проектирования станций и узлов [6] рекомендуют несколько схем железнодорожного обслуживания порта, при этом выбор той или иной схемы железнодорожного обслуживания морского порта предлагается осуществить с учетом двух параметров: годовой грузооборот порта (Q), млн т, и расстояние между ПС железнодорожными станциями и портом (L), км.

ТАБЛИЦА 2. Значения критерия согласия Пирсона для проверки гипотезы о принадлежности выборок интервалов поступления и отправления поездов с ПС γ-распределения

ПС	Направление поездопотока	Параметр формы, r	Параметр масштаба, λ	Эмпирическое значение χ^2	Критическое значение χ^2	Объем выборки
Лужская	Прибытие	1,09	1,81	42,22	43,77	2231
	Отправление	0,79	1,34	41,09	43,77	2486
Автово	Прибытие	1,86	1,44	43,78	44,99	1113
	Отправление	1,75	1,39	35,46	44,99	1137
Новый Порт	Прибытие	2,16	0,55	9,54	33,92	364
	Отправление	2,29	0,67	33,01	33,92	413

Но практика показывает, что существенные значения для принятия решения по выбору схемы железнодорожного обслуживания порта имеют еще два параметра – среднесуточные размеры движения (*N*), пар поездов в сутки, и среднее время нахождения вагона в системе «ПС–порт» ($T_{\text{нах}}^{\text{сист}}$), ч. Даже при наличии функциональной взаимосвязи между *Q* и *N*, и между $T_{\text{нах}}^{\text{сист}}$ и *L*, для более качественного определения потребного путевого развития припортовых железнодорожных станций и путевого развития железнодорожной сети порта следует учитывать значение каждого из этих четырех параметров.

Кроме того, величина потребного путевого развития и схема ПС также зависят от среднесуточного количества прибывших поездов, которые на станции не расформировывают и без подборки вагонов по погрузочно-выгрузочным фронтам подают в порт. В табл. 3 приведены сведения о количестве прибывших поездов и об уровне их маршрутизации (отношение поездов по прибытию, не требующих расформирования на ПС к общему количеству поездов по прибытию) для станций Лужская, Автово и Новый Порт в период максимальной работы.

Анализируя данные табл. 3 и существующие схемы рассматриваемых станций, можно сделать следующие выводы: 1) при больших размерах движения в направлении порта (более 30 пар поездов в сутки) и доле маршрутизации этого поездопотока более 60 %, помимо ПС необходимо создать на территории порта районные парки для реализации поэтапного продвижения маршрутизированного поездопотока к погрузочно-выгрузочным фронтам; 2) при малых размерах движения (менее 30 пар поездов в сутки) в направлении порта и низкой доле маршрутизации на ПС (менее 60 % от общего поездопотока) следует проектировать сортировочный парк (табл. 4).

ТАБЛИЦА 3. Сведения о количестве прибывших поездов на ряд ПС

Станция	Среднесуточное количество прибывших поездов		Уровень маршрутизации, %
	2015 г.	2016 г.	
Лужская	35	37	70
Автово	19	19	80
Новый Порт	8	6	55

ТАБЛИЦА 4. Условия применения схем железнодорожного обслуживания порта

Размеры движения поездов, пар поездов в сутки	Уровень маршрутизации поездопотоков, %	Схема железнодорожного обслуживания
< 30	> 60	УСС+ПС (ПОП)+$\sum$ПВФ
< 30	< 60	УСС+ПС (ПОП+СП)+$\sum$ПВФ
> 30	> 60	УСС+ПС*+$\sum$РП+$\sum$ПВФ
> 30	< 60	**УСС+С+$\sum$РП+$\sum$ПВФ**

Примечание: УСС – узловая сортировочная станция; РП – районный парк; ПВФ – погрузочно-выгрузочный фронт; ПОП – приемоотправочный парк; СП – сортировочный парк.

* Объект не является обязательным для схемы железнодорожного обслуживания порта.

Заключение

В результате выполненных исследований подтверждены возможность и корректность использования в теоретических расчетах и при построении имитационной модели ПС функции плотности обобщенного γ-распределения, что позволит более достоверно определять ее потребное путевое развитие с учетом перспектив развития в условиях роста объемов работы (роста грузооборота порта) и намечать перспективы развития всей системы железнодорожного обслуживания порта. Также на основе анализа существующих схем железнодорожного обслуживания ряда морских портов Северо-Запада РФ выявлена необходимость более детального изучения дополнительных факторов, оказывающих существенное влияние на проектные решения при выборе схем и места размещения ПС.

Библиографический список

1. Комовкина Н. С. Анализ интервалов поступления маршрутизированного и немаршрутизированного вагонопотоков на железнодорожные станции, взаимодействующие с морскими портами / Н. С. Комовкина, Ю. И. Ефименко, П. К. Рыбин, В. Н. Фоменко // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2012. – Вып. 1 (30). – 2012. – С. 48–55.

2. Рыбин П. К. Маневровое обслуживание морских портов и его влияние на путевое развитие портовых станций : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08 / П. К. Рыбин. – СПб. : ПГУПС, 2003. – 192 с.

3. Апатцев В. И. Железнодорожные станции и узлы : учебник / В. И. Апатцев, Ю. И. Ефименко, П. К. Рыбин ; под ред. В. И. Апатцева, Ю. И. Ефименко. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 855 с.

4. Правдин Н. В. Проектирование железнодорожных станций и узлов. Т. 2 : учеб. пособие для трансп. вузов / Н. В. Правдин, Т. С. Банек, В. Я. Негрей ; под общ. ред. Н. В. Правдина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Высшая школа, 1984. – 200 с.

5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Высшая школа, 2006. – 576 с.

6. Правила и технические нормы проектирования станций и узлов на железных дорогах колеи 1520 мм. – М. : Техинформ, 2001. – 256 с.

7. Рыбин П. К. Особенности организации маневровой работы на станции Лужская / П. К. Рыбин, А. А. Дегтярев, Н. В. Ершиков // Интеллектуальные системы на транспорте. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 431–438.

8. Багаев Д. М. Особенности работы автомобильно-железнодорожного паромного комплекса порта Усть-Луга / Д. М. Багаев, Н. В. Ершиков // Развитие инфраструктуры и логистики технологий в транспортных системах. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 100–108.

9. Рыбин П. К. К вопросу учета экологических требований в проектах развития транспортных узлов / П. К. Рыбин, Д. В. Жукова // Материалы конференции «Техносферная и экологическая безопасность на транспорте». – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 177–183.

10. Рыбин П. К. Ключевые факторы, определяющие развитие существующих припортовых железнодорожных узлов в XXI веке / П. К. Рыбин, Д. В. Путилина // Сб. трудов X Санкт-Петербургского конгресса «Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке». – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 154–159.

References

1. Komovkina N. S., Efimenko Y. I., Rybin P. K. & Fomenko V. N. Analiz intervalov postupleniya, marshrutizirovannogo i nemarshrutizirovannogo vagonopotokov na zheleznodorozhniye stantsii, vzaimoseistvuyushchiye s morskimy portamy [The analysis of routed and non-routed car traffic volume arrival intervals at railroad stations, interacting with seaports]. *Izvestiya Peterburgskogo Universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012, issue 1 (30), pp. 48–55. (In Russian)

2. Rybin P. K. *Manevrovoye obsluzhivaniye morskykh portov i yego vliyaniye na putevoye razvitiye portovykh stantsiy* [*Shunting maintenance of seaports*

and its influence on tracks of port terminals]: Ph. D. thesis in Eng., speciality: 05.22.08. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2003, 192 p. (In Russian)

3. Apattsev V. I., Efimenko Y. I. & Rybin P. K. *Zheleznodorozhniye stantsii i uzly* [*Railway stations and junctions*]. Ed. by V. I. Apattseva, Y. I. Efimenko. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2014, 855 p. (In Russian)

4. Pravdin N. V., Banek T. S. & Negrey V. Y. *Proektirovaniye zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov* [*The design of railway stations and junctions*]; under general ed. of N. V. Pravdin; 2nd ed., rev. and enlarged. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1984, 200 p. (In Russian)

5. Ventsel E. S. *Teoriya vozmozhnostey* [*Probability theory*]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006, 576 p. (In Russian)

6. *Pravila i tekhnicheskiye normy proektirovaniya stantsiy i uzlov na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm* [*Design regulations and engineering standards of railway stations and junctions at 1520 mm gauge railroads*]. Moscow, Tekhinform Publ., 2001, 256 p. (In Russian)

7. Rybin P. K., Degtyarev A. A. & Yershikov N. V. Osobennosty organizatsii manevrovoy raboty na stantsii Luzhskaya [The specificities of shunting operation management at Luzhskaya station]. *Intellektualniye sistemy na transporte* [*Intellectual systems for transport*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, pp. 431–438. (In Russian)

8. Bagaev D. M. & Yershikov N. V. Osobennosty raboty avtomobilno-zheleznodorozhnogo paromnogo kompleksa porta Ust-Luga [The specificities of automobile-railway ferry complex operation at Ust-Luga port]. *Razvitiye infrastruktury i logisticheskykh tekhnologiy v transportni sistemakh* [*The development of infrastructure and logistic technologies in transport systems*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, pp. 100–108. (In Russian)

9. Rybin P. K. & Zhukova D. V. K voprosu ucheta ekologicheskykh trebovaniy v proektakh razvitiya transportnykh uzlov [On environmental development projects of transportation nodes]. *Materialy konferenstii "Tekhnosfernaya i ekologicheskaya bezopasnost na transporte"* [*Proceedings of the conference "Technosphere and environmental transport safety"*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, pp. 177–183. (In Russian)

10. Rybin P. K. & Putilina D. V. Klyucheviye factory, opredelyayushchiye razvitiye sushchestvuyushchykh priportovykh zheleznodorozhnykh uzlov v XXI veke [Key factors, determining the development of the existing railway junctions adjacent to ports in the 21st century]. *Sbornik trudov X Saint Peterburgskogo kongressa "Professionalnoye obrazovaniye*, *nauka i innovatsii v XXI veke"* [*Coll. papers of the 10th Saint Petersburg congress "Vocational education*, *science and innovations in the 21st century"*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, pp. 154–159. (In Russian)

РЫБИН Петр Кириллович – канд. техн. наук, доцент, проректор; *ЕРШИКОВ Николай Васильевич – канд. техн. наук, доцент, проректор, yorshikov@mail.ru; КОМОВКИНА Наталия Сергеевна – канд. техн. наук, старший преподаватель; ПУТИЛИНА Дарья Валентиновна – ассистент (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).